

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav vodních staveb

Laboratoř vodohospodářského výzkumu



**HYDRAULICKÝ MODELOVÝ VÝZKUM
PROSTORU PRO SEDIMENTACI ŘÍČNÍCH
SPLAVENIN V HORNÍ ČÁSTI ZÁTOPY
VD NOVÉ HEŘMINOVY**

AKCE: OPATŘENÍ NA HORNÍ OPAVĚ, PŘÍPRAVA AKCE V OBDOBÍ 2013-2016

Závěrečná zpráva

Brno, březen 2016

Obsah

1. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE	3
2. PODKLADOVÁ DATA.....	5
3. ÚVOD	6
4. TRANSPORT SPLAVENIN PŘES VD NH.....	7
4.1. VYMÍLACÍ PROSTOR	7
4.2. USAZOVACÍ PROSTOR	8
5. NÁVRH USAZOVACÍHO PROSTORU SPLAVENIN	10
5.1. UMÍSTĚNÍ USAZOVACÍHO PROSTORU SPLAVENIN	10
5.2. KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ.....	12
5.3. PŘEDBĚŽNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	14
5.4. VÝPOČTY	15
5.4.1. Předběžný výpočet	15
5.4.2. 2D simulace proudění vody.....	18
5.4.3. 1D simulace proudění vody a dnových splavenin	34
5.5. ZHODNOCENÍ NÁVRHU.....	40
6. MODELOVÁ PODOBNOST	41
6.1. MECHANICKÁ PODOBNOST ÚPLNÁ	41
6.2. MECHANICKÁ PODOBNOST PŘIBLIŽNÁ	42
6.2.1. Princip dominantní síly	42
6.2.2. Automodelová oblast proudění	43
6.2.3. Podobnost pohybu splavenin.....	44
6.2.4. Meze podobnosti a přijatá zjednodušení	49
7. FYZIKÁLNÍ MODEL	50
7.1. STANOVENÍ MĚŘÍTKA MODELU A JEHO PARAMETRŮ	50
7.1.1. Měřítko modelu	50
7.1.2. Průtoky	51
7.1.3. Zrnitost materiálu v modelu	51
7.2. PROJEKT	53
7.3. VÝSTAVBA MODELU	54
8. MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ A MĚŘENÍ	60
8.1. MĚŘIDLA	60
8.2. MĚŘENÍ.....	61
8.3. TESTOVACÍ ZÁTĚŽOVÉ STAVY.....	63
9. KALIBRACE MODELU.....	65
9.1. PODOBNOST PROUDĚNÍ VODY	65
9.1.1. Dělení průtoku mezi kynetu a bermu nad mostem na Milotice	65
9.1.2. Proudění na spádový stupeň UPP.....	66
9.1.3. Počátek přepadu při hydrostatickém vzduť z UPDS do UPP	66
9.1.4. Proudění v UPP	66
9.2. PODOBNOST PROUDĚNÍ DNOVÝCH SPLAVENIN	66
9.2.1. Podobnost na základě vývoje koryta za období 2009 až 2015	66

9.2.1.	Průtok na počátku porušení dnové dlažby	70
10.	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ	71
10.1.	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ZA USTÁLENÝCH STAVŮ	71
10.1.1.	Odolnost prvků opevnění	72
10.2.	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ZA NEUSTÁLENÝCH STAVŮ	73
10.2.1.	PV ₅	76
10.2.2.	PV ₁₀	81
10.2.3.	PV ₂₀	86
10.2.4.	PV ₅₀	91
10.2.5.	PV ₁₀₀	96
10.2.6.	Vyhodnocení zanášení UPDS	101
11.	CHOVÁNÍ KORYTA POD PROSTOREM PRO USAZOVÁNÍ DNOVÝCH SPLAVENIN	103
12.	ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ	104
12.1.	ZHODNOCENÍ NÁVRHU UPDS	104
12.2.	DOPORUČENÍ	106
12.3.	OMEZENÍ	109
13.	ZÁVĚR	110
14.	LITERATURA	111
15.	SEZNAMY	113
15.1.	SEZNAM VELIČIN	113
15.2.	SEZNAM ZKRATEK	116
15.3.	SEZNAM OBRÁZKŮ	116
15.4.	SEZNAM TABULEK	119
16.	ZÁZNAMY Z JEDNÁNÍ	120
16.1.	PRVNÍ PRACOVNÍ JEDNÁNÍ 10.12.2015	120
16.2.	DRUHÉ PRACOVNÍ JEDNÁNÍ 25.2.2016	124

1. Identifikační údaje

Název akce: Opatření na horní Opavě, příprava akce v období 2013-2016

Název zprávy: Hydraulický modelový výzkum prostoru pro sedimentaci říčních splavenin v horní části zátopy VD Nové Heřminovy

Objednatel: AQUATIS a.s.
Botanická 834/56
602 00 Brno
Česká republika

IČ objednatele: 46347526

DIČ objednatele: CZ46347526

Číslo smlouvy objednatele: 15186/5855

Kontaktní osoby: Ing. Jiří Švancara, Ing. Marek Čejda

Zhotovitel: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav vodních staveb, Laboratoř vodohospodářského výzkumu
Veveří 331/95, 602 00 Brno

IČ zhotovitele: 00216305

DIČ zhotovitele: CZ00216305

Číslo smlouvy zhotovitele: HS 12557387L

Řešitel: doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Spoluřešitelé: prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

doc. Ing. Jaroslav Veselý, CSc.

Ing. Jakub Major

Ing. Adam Nehudek

Spolupracovníci: Jana Holbová

Bořivoj Macík

Luboš Pařílek

Oldřich Špatný

Termín zahájení úkolu: 30. 11. 2015

Termín ukončení úkolu: 18. 3. 2016

Práce byly provedeny s podporou projektu LO1408 AdMaS UP „Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ řešeného v rámci divize VHVS.

Stručný přehled provedené práce:

- Vybudování fyzikálního modelu prostoru pro usazování dnových splavenin a navazujících konstrukcí a úseků koryta s pohyblivým dnem v měřítku 1:30.
- Posouzení a případná optimalizace proudových poměrů realizujících se na objektu a v korytech přilehlých k prostoru pro usazování dnových splavenin.

Způsob odevzdání:

Výstupem je závěrečná zpráva ve čtyřech tištěných a digitálních vyhotoveních provedených v editovatelné i needitovatelné podobě (docx a pdf) na CD/DVD nosiči s pořízenou fotodokumentací.

Zvláštní ujednání – zkráceně:

Neposkytnutí výsledků prací třetím stranám, investor (Povodí Odry, s.p.) může s výsledky nakládat bez omezení.

2. Podkladová data

Podkladová data lze rozřadit následovně:

- Ucelené dokumenty:
 - Investiční záměr akce Opatření na horní Opavě, (Pöyry Environment, 04/2009)
 - Souhrnná zpráva investičního záměru (Pöyry Environment, 11/2009).
 - Dokumentace vývoje koryt rozramené řeky Opavy nad obcí Nové Heřminovy (Pöyry Environment, 2013).
- Výkresy:
 - Výkresová dokumentace současného stavu prostoru a navazujících koryt:
 - 3D model terénu s objekty.
 - Řez mostem na Milotice.
 - Příčný řez tokem nad mostem na Milotice.
 - Specifikace využití povrchů.
- Tabulková data:
 - N-leté průtoky.
 - M-denní průtoky.
 - Hydrogramy dostupných povodňových vln.
 - Hydrogram v profilu Karlovice v rozsahu let 2009 až 2015 (ČHMÚ, 2016)
 - Transformace PV VD Nové Heřminovy.
- Rastrová data:
 - Ortofotomapy.

Poznámka: V celé práci je použit jednotný výškový systém baltský – po vyrovnání (Bpv).

3. Úvod

Řeka Opava vzniká soutokem tří potoků Černé a Střední Opavy a Bílého potoka u Vrbna pod Pradědem. Potoky pramení na hlavním hřebeni Hrubého Jeseníku a stékají se ve výšce 550 m n. m. (Bpv). Opava se vlévá zleva do Odry. V horní části má řeka kamenité koryto s velkým sklonem a relativně zarostlými břehy, po povodních v řečišti bývají napadané stromy. Prudký sklon zmírňují jezy a spádové stupně.

Řeka Opava je tok s významným transportem splavenin. Transportuje jak dnové splaveniny, tak plaveniny. Součástí transportu je i plávi (splávi) především organického původu a splach (smyv) z půdy velmi jemných částic. Splach ani plaveniny se na formování koryta nepodílejí, protože proudí prakticky bez usazení níže po toku. Plávi na formování koryta vliv má, avšak vliv je velmi nahodilý. Na formování tvaru koryta se nejvýrazněji podílí dnové splaveniny. Dnové splaveniny se do Opavy dostávají buď z koryt přítoků a erozních rýh svahů koryta anebo vzniknou vymíláním vlastního koryta po porušení dnové dlažby, případně vymíláním při formování nového koryta.

Transport dnových splavenin je i při ustáleném proudění vody plošně nerovnoměrný a časově neustálený. Vlivem vymílání a usazování dochází ke změnám tvaru koryta, vyvolávajících změny proudění vody a následně k nerovnoměrnému proudění dnových splavenin. Nerovnoměrnost transportu dnových splavenin je v příčném profilu způsobena rozdílným průtokem splavenin a rozdílnou velikostí transportovaných zrn. Nerovnoměrnost v přímých úsecích způsobuje rozdílné tečné napětí na omočeném povrchu koryta. V obloucích je navíc podpořeno vznikem příčného proudění, které způsobuje, že splaveniny proudí po dně směrem ke konvexnímu břehu, který je splaveninami přesycen, proto zde sedimentují, namísto toho u konkávního břehu je proud nedostatečně sycen a dochází zde k vymílání (Thompson a kol., 1999; Thompson, 2006). Pokud není břeh dostatečně opevněn, vytvářejí se meandry. K nerovnoměrnému transportu v podélném profilu dochází při průtocích blízkých průtoku při porušení dnové dlažby, kdy dojde pouze k jejímu lokálnímu porušení, případně dojde pouze k třídění zrn v krycí vrstvě, anebo je způsoben přítokem. K nerovnoměrnému a neustálenému průtoku dnových splavenin rovněž dochází při extrémních průtokových stavech, kdy se vytvářejí dnové útvary, a kdy voda a dnové splaveniny proudí již významně mimo původní koryto.

Při neustáleném proudění vody je nerovnoměrnost a neustálenost transportu dnových splavenin významnější. Projevuje se oproti ustálenému proudění vody vlivem změny třetího napětí při změně průtoku v čase. Mimo to, že větší průtoky vody transportují více dnových splavenin a navíc větších velikostí, dochází vlivem třídění zrn v krycí vrstvě dna a vyčerpání zdrojů vymílaného materiálu k hysterezi křivky průtoku dnových splavenin vyjádřenou k průtoku vody. Při vzestupné větvi průtoku vody dochází k většímu průtoku dnových splavenin, než při sestupné větvi průtoku vody a navíc maximum průtoku dnových splavenin obvykle nastává dříve, než maximum průtoku vody.

Výše uvedená nerovnoměrnost a neustálenost je z makroskopického a dlouhodobého hlediska zanedbatelná v porovnání s dopadem výstavby vodního díla (VD) Nové Heřminovy, které přirozený transport dnových splavenin zcela přeruší. Cílem tedy je nalézt taková opatření, která uvedenou změnu v transportu dnových splavenin odstraní nebo alespoň minimalizují.

4. Transport splavenin přes VD NH

Popis transportu splavenin za současného a návrhového stavu i s prognózou jeho vývoje je podrobně uveden v práci Specializované studie, posudky a výzkumné práce, S.02 Posouzení splaveninového režimu a prognóza (Zachoval a kol., 2009). Z ní vyplývá, že výstavbou VD Nové Heřminovy bez dodatečných opatření dojde k usazení veškerých dnových splavenin a části plavenin v nádrži. Usazování zrn v nádrži postupně zmenší objem nádrže (Vincent, 1964; Bačík a kol., 1985) na jedné straně, na druhé způsobí vznik hladové vody pod nádrží a tím se vytvoří splaveninová diskontinuita.

Pro eliminaci splaveninové diskontinuity se uvažuje s vytvořením umělého transportu dnových splavenin. Filozofie transportu je založena na usazení splavenin v usazovacím prostoru nad nádrží VD Nové Heřminovy (ze splavenin se tak stanou usazeniny), těžbě usazenin z usazovacího prostoru, umělém transportu usazenin např. nákladními automobily, uložení usazenin do vymílacího prostoru pod VD Nové Heřminovy, kde se z nich po vymletí opět stanou splaveniny.

Správná funkce umělého transportu je mimo jiné podmíněna vhodným návrhem usazovacího a vymílacího prostoru.

4.1. Vymílací prostor

Vymílací prostor (VP) byl již předmětem výzkumu v roce 2010. Je situován bezprostředně pod jezem Zátor.

Úsek mezi jezem Zátor a hrází VD Nové Heřminovy je s hladovou vodou a předpokládá se dle S.02 Posouzení splaveninového režimu a prognóza (Zachoval a kol., 2009), že zde nebude po prvotním vytržení krycí vrstvy dna docházet k vymílání. Uvedené pro bezprostřední prostor nad jezem Zátor až do průtoku $100 \text{ m}^3/\text{s}$ potvrdil výzkum vymílacího prostoru včetně navazujících úseků koryt na fyzikálním modelu (Zachoval a kol., 2010).

VD Nové Heřminovy z hlediska průtoků rozhodných pro transport splavenin neovlivňuje průtoky až do $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Při vyšších přítocích do nádrže dojde k transformaci povodňových vln (PV) nádrží a to až do dosažení úrovně korun bezpečnostních přelivů, při uvedeném stavu se vypouští průtok $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Při ještě větších průtocích do nádrže dojde k přepadu vody přes přelivy.

Z pohledu průtoku vody dojde ke změně tvaru některých současných PV (snížení kulminačního průtoku, delší doba trvání kulminačního průtoku). To způsobí rozdílný transport dnových splavenin nad nádrží a pod ní. Dojde ke zmenšení maximální hodnoty třetího napětí, což má za následek zmenšení schopnosti transportovat velká zrna. Na druhou stranu, díky prodloužení doby působení průtoku $100 \text{ m}^3/\text{s}$ dojde ke zvýšenému množství transportovaného materiálu tímto průtokem. Oba vlivy na transport splavenin a vývoj koryta se do jisté míry vyruší, avšak vliv na uvedení největších zrn do pohybu uvedená skutečnost mít bude, což dokumentuje práce S.02 Posouzení splaveninového režimu a prognóza (Zachoval a kol., 2009). Podle fyzikálního modelu VP (Zachoval a kol., 2010) se jedná o zrna

cca 80 mm a větší, která nebudou uvedena do pohybu, proto se doporučuje je z dotace do VP vyloučit.

Uvedený limit se nevztahuje pouze na VP, ale i na koryto navazující.

Do VP se bude ukládat materiál, který bude těžen v usazovacím prostoru splavenin (UPS).

VP je navržen tak, aby si proud vody odnášel takové množství dnových splavenin, aby bylo dno níže po toku z dlouhodobého hlediska stabilní. Hlavní odnos materiálu bude vytvářen povodňovými průtoky, jimi odnesené množství podrobně uvádí tabulka Tab. 1. Je zde uvedeno jak množství odneseného materiálu z VP, tak celkové odnesené množství z fyzikálního modelu, tedy i s navazujícím korytem, které je třeba po větších PV upravit (dosypat). Materiál se do VP ukládá tak, že se obnovuje stále původní tvar. V případě jeho zanesení hrubozrnným materiálem je třeba jej odtěžit a tento materiál použít např. pro stabilizaci dna níže po toku.

Tab. 1 Množství odneseného materiálu z VP vybranými PV

PV	Kulminační průtok [m ³ /s]	Doba trvání PV [hod]	Odnesený objem z modelu [m ³]	Odnesený objem z VP [m ³]	Odnesená hmotnost z modelu [t]	Odnesená hmotnost z VP [t]
PV5	66	9,2	1974	1420	2961	2131
PV10	91	9,8	2330	1416	3494	2124
PV20	100	10,3	2493	1630	3739	2446
PV50	100	10,8	2646	1712	3969	2567
PV100	100	11,3	2701	1742	4052	2613

4.2. Usazovací prostor

Usazovací prostor (UP) by měl zabezpečit usazování co největšího množství splavenin tak, aby se nedostávaly do nádrže a nezanášely ji.

UP se navrhuje pro společné usazování jak dnových splavenin (jsou usazené, ale jsou v pohybu), tak oddělené usazování.

Nános může být ve tvaru (Moris a Fan, 2009):

- delty u konce vzduť, vzniká nejčastěji z dnových splavenin,
- poproudě se rozšiřujícího klínu u hráze, vzniká usazováním splavenin z hustotních proudů,
- poproudě zužujícího se klínu vzniká z usazování dnových splavenin a splavenin dohromady
- a rovnoměrného zanesení v případě usazování splavenin.

UP pro usazování dnových splavenin bývají u nádrží s malým rozkmitem úrovně hladiny v nádrži situovány do konce vzduť při nejčastější hladině (obvykle zásobní), kde se vytváří lokální nános, který se těží. Pokud se netěží, vytvoří se delta. Těžba probíhá těžebními stroji umístěnými buď na hladině, nebo po snížení úrovně hladiny na dně. Lokalizace nánosů je jednoznačná, vlivem rozdílné usazovací rychlosti dochází i k významnému třídění zrn. Pokud

je nános plochý, je třídění dáno dominantně rozdílnou usazovací rychlostí. Pokud jsou svahy nánosů se sklony blízkými synnému úhlu, dochází zde navíc k třídění zrn vlivem sesuvů. Hlavní tok se zde při velkém zanesení obvykle větví a vytváří říční deltu.

Při velkém rozkmitu úrovně hladiny se typický nános nevytvoří. Pokud se lokálně vytvoří, je prouděním při rozkmitu hladiny rozplavován. Lokalizace nánosů je náročná, protože se splaveniny při různé úrovni hladiny usazují jinde a při poklesu hladiny se vytváří nové koryto v nánosů. V těchto případech se zřizují předsazené usazovací nádrže, ve kterých se materiál usadí a nedostane se tak do hlavní nádrže. Při opadnutí PV dojde k vyprázdnění nádrže a tedy ke snadné těžbě. Nevýhodou tohoto řešení je doprovodné vzduť úrovně hladiny v usazovací nádrži a do krajiny obvykle obtížně začlenitelná a relativně nákladná hráz.

U navrženého VD Nové Heřminovy se uvažuje se značným rozkmitem úrovně hladiny při PV. Šířka nádrže v konci vzduť je značná. V konci vzduť nádrže při vyšších hladinách je ochranná hráz Nových Heřminov, most a násypy cest.

Pokud by se ponechalo usazování splavenin bez opatření, usazovaly by se nesystematicky v závislosti na momentálních podmínkách a těžba by proto byla obtížná. V daném případě by nevznikal typický nános. Proto ponechání usazování bez zásahu není vhodné.

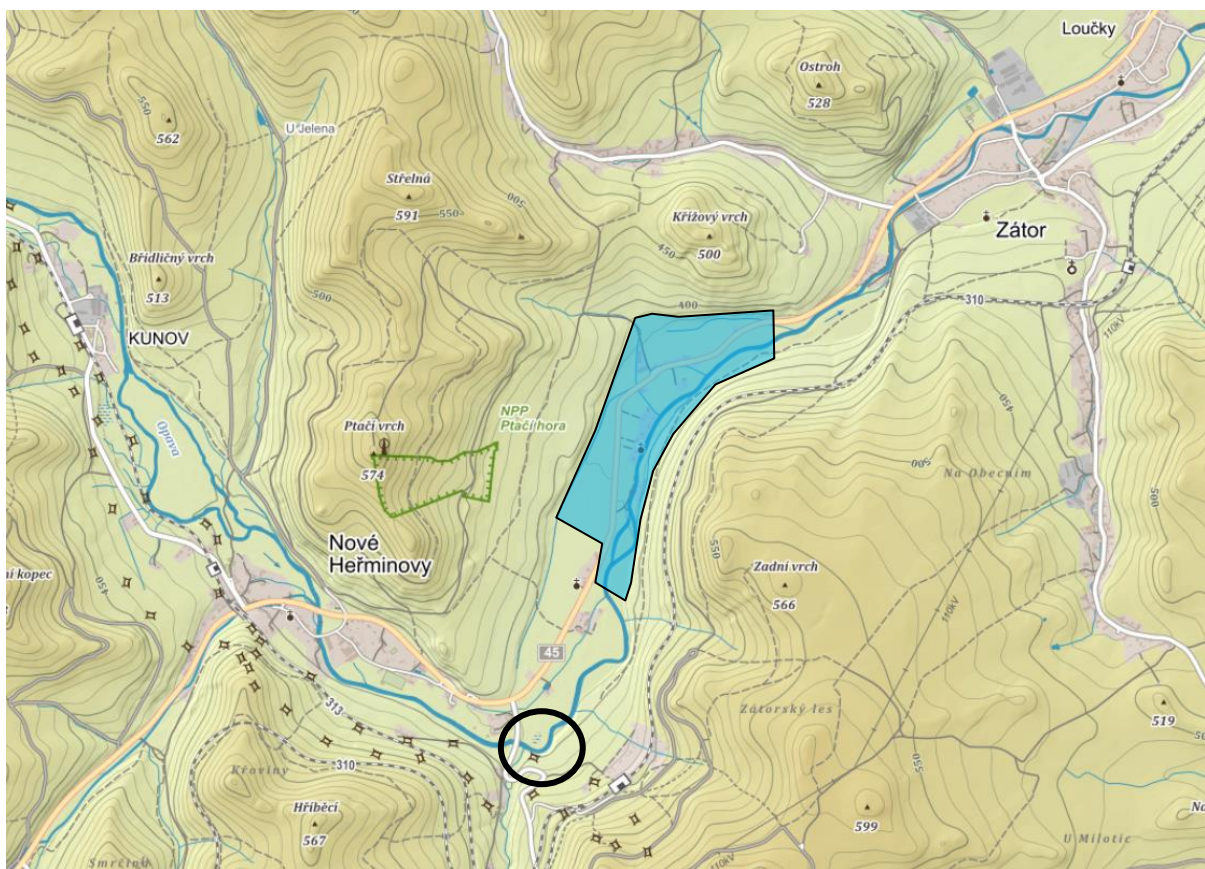
Použití usazovací nádrže rovněž není vhodné, protože jsou zde stavební objekty, které jeho použití znesnadňují, jedná se především o ochrannou hráz Nových Heřminov. Usazovací nádrž by zachytávala jak dnové splaveniny, tak plaveniny, avšak bez jejich třídění. Z uvedeného důvodu bylo nutné navrhnout zcela nový typ usazovacího objektu.

5. Návrh usazovacího prostoru splavenin

Návrh usazovacího prostoru splavenin (UPS) se skládal z několika částí. Nejdříve bylo nutné navrhnout jeho umístění, dále jeho koncepční řešení a posléze jeho předběžné konstrukční řešení.

5.1. Umístění usazovacího prostoru splavenin

UPS byl situován v zátokě připravovaného VD Nové Heřminovy. Využit je přirozený meandr řeky Opavy se změnou směru proudu o cca 90°, který je umístěný bezprostředně pod mostem přes řeku Opavu mezi Novými Heřminovými a Miloticemi (Obr. 1).



Obr. 1 Situování lokality (www.mapy.cz)

Jedná se o místo, kde se uvažuje s výstavbou kruhového objezdu a navazujících komunikací, které danou lokalitu zásadně pozmění a do jisté míry budou ovlivňovat proudění za velkých průtoků (Obr. 2). Předpokládá se doplnění mostu na Milotice o další pole, čímž se zásadně zvětší jeho průtočnost a rovněž se předpokládá zvýšení polohy mostovky tak, aby nebyla ovlivněna od hydrodynamického vzduť VD Nové Heřminovy.



Obr. 2 Situace lokality s vyznačením navrhovaných úprav (nahore) a vrstevnic (dole)

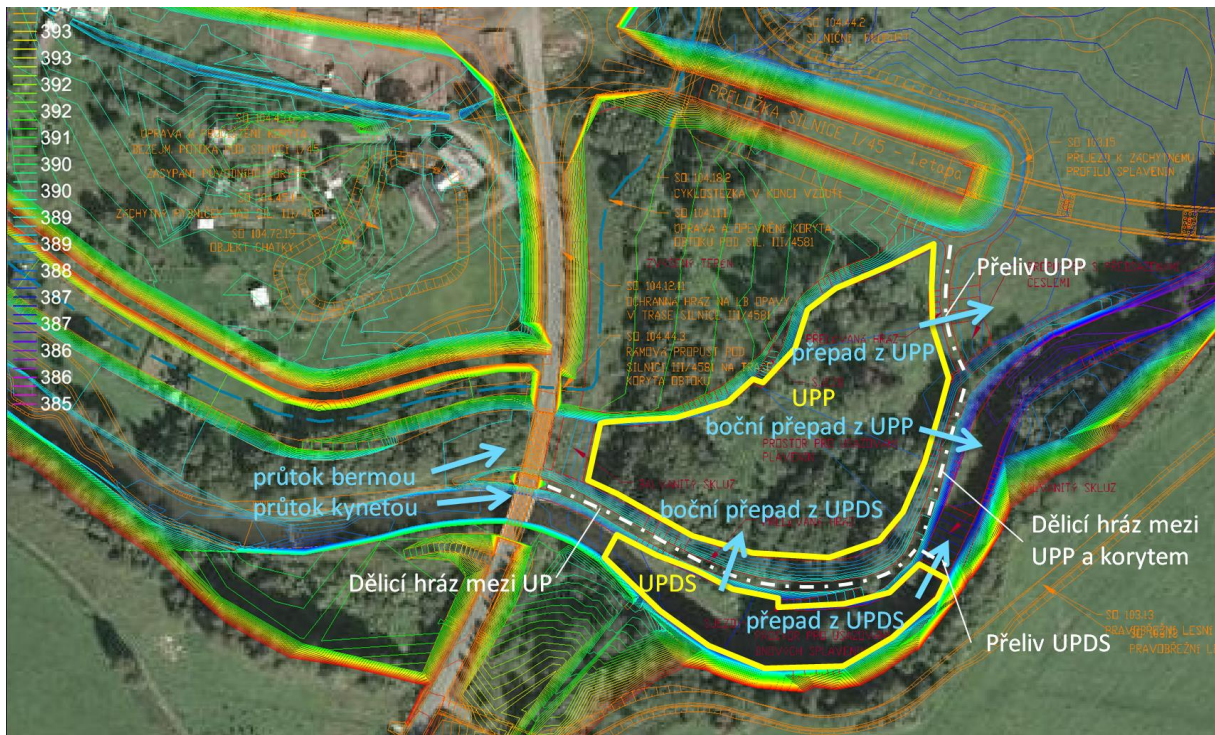
5.2. Konceptní řešení

Do výše uvedeného prostoru voda přitéká složeným lichoběžníkovým korytem, které se skládá z kynety a bermy. Při proudění splavenin budou kynetou proudit všechny dnové splaveniny a část plavenin. Bermou budou proudit pouze plaveniny (požadovaný předpoklad). Dělení plavenin mezi kynetu a bermu je závislé na dělení průtoku vody mezi kynetu a bermu a rovněž na hloubce (koncentrační profil). Tyto dva proudy v dané lokalitě rozdělují pilíř mostu na Mlotice. Z hlediska celkového průtoku splavenin je proud kynetou významnější a právě dnové splaveniny je třeba převážet do VP, proto byl využit k vytvoření samostatného prostoru pro usazování.

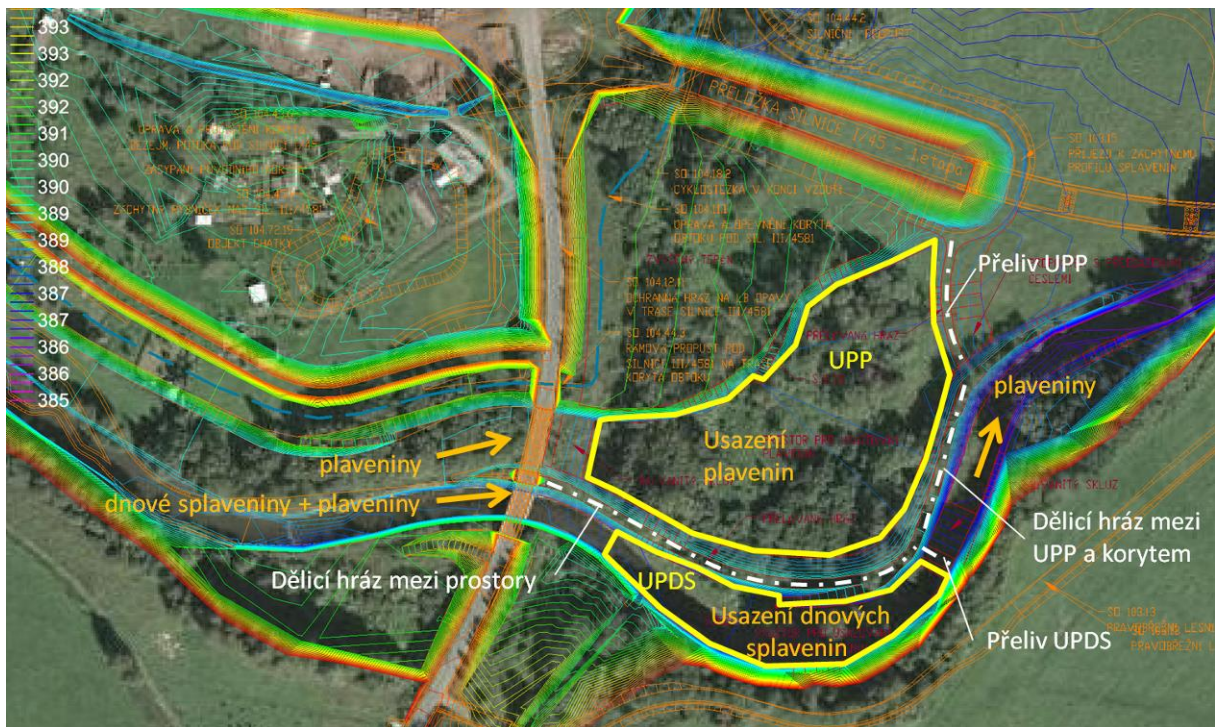
Základní koncepce návrhu tedy využívá rozdělení UPS na dva samostatné usazovací prostory:

- Usazovací prostor dnových splavenin (UPDS), kde se předpokládá usazování dnových splavenin a částečně i plavenin s lokalizací místa usazování a s tříděním zrn, což zlevní těžbu a umožní ji provádět řízeně s ohledem na plošné rozmístění frakcí usazenin v objektu. Předpokládá se relativně četná těžba, prakticky po každé významné PV.
- Usazovací prostor plavenin (UPP), kde se předpokládá usazování plavenin. Zde se předpokládá těžba s četností významně menší než v UPDS. Usazený materiál je s ohledem na velikost částic a relativně velké zastoupení organického materiálu nevhodný pro ukládání do VP.

Aby byl UPDS funkční při všech relevantních PV, bylo nutné, aby se v něm průtok od určitého stavu nezvětšoval, protože by mohlo dojít k opětovnému odnosu již usazeného materiálu. Uvedeného bylo dosaženo přeléváním dělicí hrází mezi oběma prostory.



Obr. 3 Konceptní řešení, proudění vody



Obr. 4 Konceptní řešení, proudění splavenin

5.3. Předběžné konstrukční řešení

Lokalita vymezená pro umístění UPS je ohraničena ze západu mostem na Milotice, z východu mostem nově navržené silnice I/45, ze severu násypy cest sevřených kruhovým objezdem a z jihu terénním svahem. Lokalita je poproudně se svažující.

Podélný sklon koryta toku je bezprostředně nad mostem na Milotice 0,0027, pod mostem se zvětší na 0,0052.

Skalní podloží se nachází v hloubce 3 m až 6 m, nad ním jsou obvykle štěrky, nad kterými se vyskytují písky a jíly jak písčité, tak štěrkovité.

Hladina podzemní vody v podélném profilu kopíruje úroveň hladiny v toku, ale v příčném profilu se snižuje do levé části údolí.

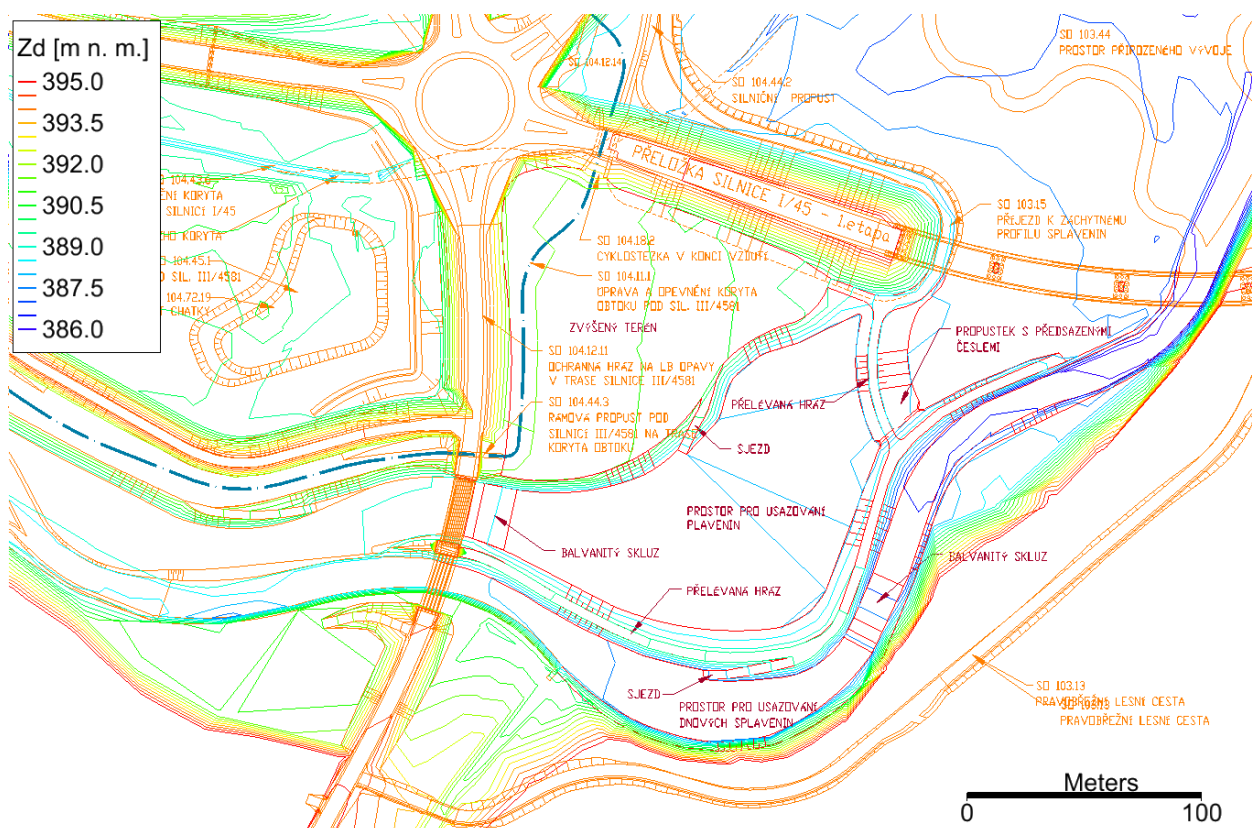
V lokalitě prakticky nelze využít plochy situované jižně od stávajícího koryta, protože by vytvářely neefektivní plochy proudění a ze stejného důvodu nebylo možné využít prostor sevřený násypy komunikací umístěný severně, který byl vyčleněný pro parkovou úpravu, vedení obtokového koryta a vedení cyklostezky.

Pro návrh velikosti UPDS posloužily níže uvedené výpočty, které určily jeho nutnou délku, šířku a hloubku. Rovněž určily požadované parametry přelivu spádového objektu a výškovou úroveň dělicí hráze mezi UPDS a UPP. Výškově byl UPDS situován tak, aby ovlivnění úrovně hladiny podzemní vody bylo minimální. Rozšiřující část byla navržena tak, aby byl minimalizován rozsah úplavů při průtoku Q_{100} prostorem s odlehčením přes dělicí hráz usazovacích prostorů. Uvedené umožní třídění zrn v UPDS při nižších průtocích a maximální využití jeho plochy. Zúžující se část byla navržena tak, aby byl minimalizován vliv místních ztrát při proudění, aby nemohlo dojít k jejímu zanesení a také, aby byl minimalizován vznik výmolů. Po zakreslení UPDS do digitálního modelu terénu byla vymezena plocha použitelná pro návrh UPP.

Pro návrh UPP bylo uvažováno se dvěma možnostmi jeho řešení, a to v podobě zatravněné plochy, nebo v podobě trvale zavodněné plochy. Na prvním pracovním jednání bylo rozhodnuto o řešení v podobě zatravněné plochy. Její výškové umístění bylo voleno s ohledem na úroveň hladiny podzemní vody. Šířka UPP byla volena maximální možná v dané lokalitě s takovým tvarováním, aby nedocházelo k vytvoření úplavů, a aby proudění v objektu (bez bočních přepadů) bylo po příčném profilu přibližně rovnoměrné. Jeho délka byla stanovena ze součtu dosahu turbulence způsobené balvanitým skluzem na přítoku do UPP a usazovací délky plavenin. K umístění přelivu byl použit násyp nové komunikace I/45. Šířka přelivu by však neumožňovala zabezpečení úrovně hladiny v UPP tak vysoko, aby byl přepad z UPDS dokonalý a současně řešení koruny takové, aby zde mohly jezdit nákladní automobily, proto byl navržen ještě přeliv na dělicí hrázi mezi UPP a odtokovou částí koryta. Pro odvodnění UPP byly na obou stranách jeho dna navrženy odvodňovací příkopy a v přelivu UPP propustek s předsazenými hrubými česlemi. Rozměry těchto prvků nebyly předmětem dalšího návrhu.

Koruny dělicích hrází a přelivu UPP byly navrženy se šířkou v koruně 4 m s tím, že jejich povrch umožňuje jízdu nákladních automobilů a přepad vody. Svahy hrází byly uvažovány ve sklonu 1:2. Do obou prostorů byly objednatel navrženy sjezdy.

Situaci předběžného návrhu dokumentuje Obr. 5.



Obr. 5 Situace předběžného návrhu

5.4. Výpočty

Během návrhu předběžného konstrukčního řešení byly provedeny výpočty, které umožnily předběžný konstrukční návrh provést a numericky ověřit jeho funkčnost.

5.4.1. Předběžný výpočet

K vytvoření základního návrhu sloužil výpočet založený na ustáleném proudění při hydrostatických hladinách v objektech vypočítaných dle rovnic přepadu. Uvedený výpočet umožnil rychle a při tom dostatečně přesně navrhnout předběžné řešení konstrukcí (šířky přelivů, úrovně přelivů a komunikací) a funkčnost usazovacích prostorů (úrovně dna prostorů).

Výpočet se skládal z následujících kroků:

- Výpočet konzumní křivky koryta na základě rovnoměrného proudění ve složeném korytě skládajícím se z kynety a bermy (Chow, 1959).
- Výpočet přepadu přes přeliv UPDS.
- Výpočet bočního přepadu přes dělicí hráz mezi objekty.
- Výpočet přepadu přes přeliv UPP (násyp obslužné komunikace).
- Výpočet bočního přepadu přes dělicí hráz mezi UPP a odtokovým korytem UPDS (násyp obslužné komunikace).
- Výpočet velikosti zrna na počátku pohybu v kynetě přítokového koryta.
- Výpočet mezní velikosti zrna plavenin v UPDS.
- Výpočet mezní velikosti zrna plavenin v UPP.

Teoretický základ výpočtu posledních tří bodů je uveden v kapitole 6.2.3.

Pro výpočet přepadu přes přeliv lichoběžníkového podélného a pravoúhlého příčného průřezu se širokou korunou (ČSN ISO 4362, 1995) se zanedbáním rychlostní výšky byla použita rovnice

$$Q = C_d \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot b \cdot g^{1/2} \cdot h^{3/2}, \quad (5.1)$$

kde C_d je součinitel průtoku (přepadu), b_p je šířka přelivu, g je tíhové zrychlení a h je přepadová výška. Součinitel průtoku byl volen s ohledem na sklon návodního líce přelivu a drsnost koruny přelivu (předpokládané využití koruny).

Pro výpočet přepadu přes přeliv lichoběžníkového příčného průřezu se širokou korunou byl průtok počítán odděleně pro pravoúhlou část a pro trojúhelníkovou část (ČSN ISO 8333, 1997) se zanedbáním rychlostní výšky

$$Q = C_{dt} \cdot \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot h^{5/2}, \quad (5.2)$$

kde C_{dt} je součinitel průtoku (přepadu) a β je vrcholový úhel. Součinitel průtoku byl volen s ohledem na sklon návodního líce přelivu, drsnost koruny a vrcholový úhel.

Celý výpočet byl programován, protože využíval dva iterační kroky při každém průtokovém stavu. Bylo provedeno značné množství simulací k dosažení vhodných parametrů objektů.

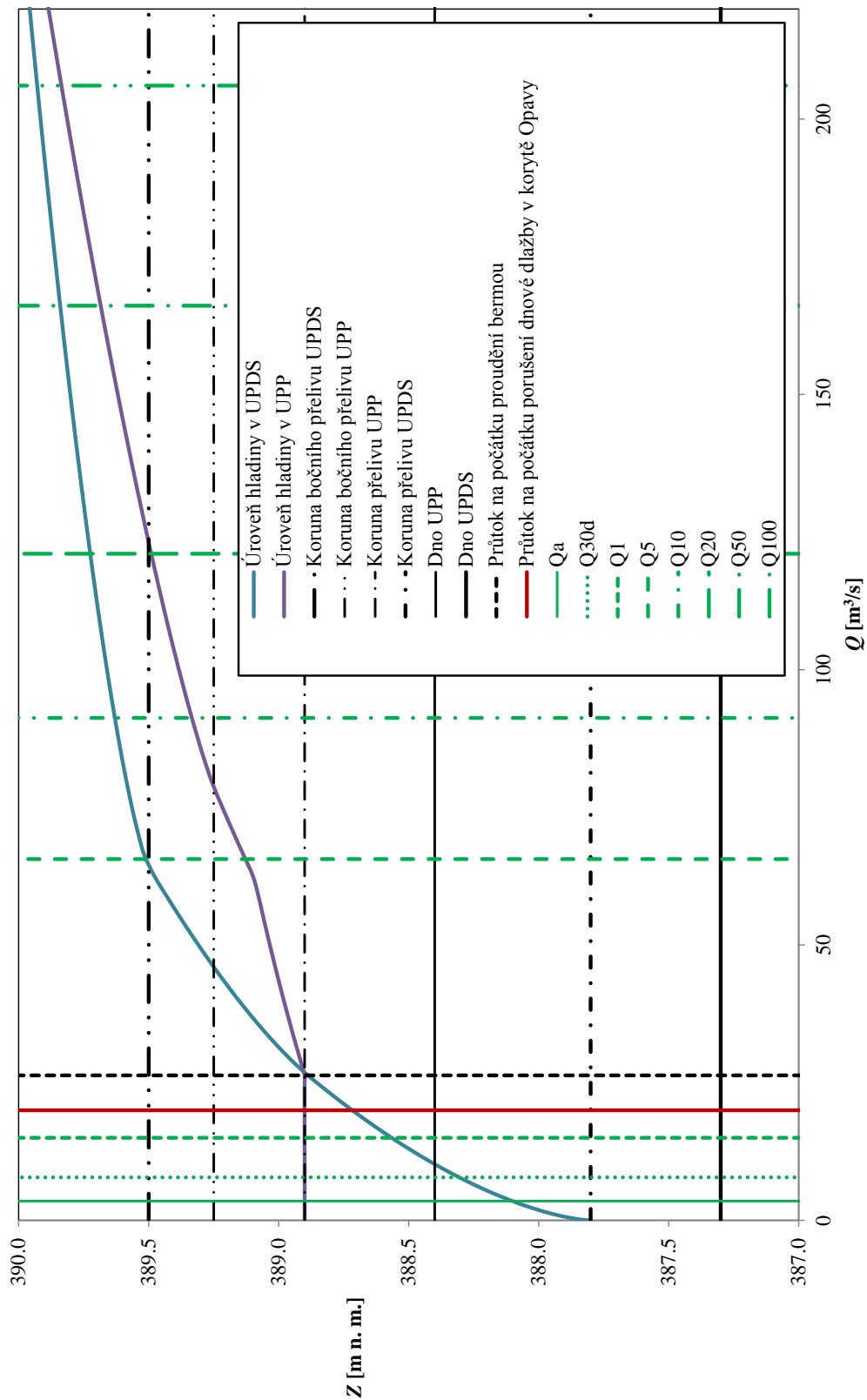
Výsledný stav dokumentuje Obr. 6, kde je uvedena úroveň hladiny v obou objektech v závislosti na průtoku v přítokovém korytě.

Z Obr. 6 vyplývá, že proudění lze rozdělit na tři specifické typy:

- Proudění pouze UPDS.
- Proudění oběma usazovacími prostory bez vzájemného ovlivnění.
- Proudění oběma usazovacími objekty se vzájemným ovlivněním.

Při větších průtocích, než jsou uvedeny na Obr. 6, dochází k ovlivnění proudění v objektech vzdutím hladiny v nádrži hrází VD Nové Heřminovy. Uvedené tři případy proudění jsou blíže popsány v následující kapitole.

Proudění vody bylo simulováno ve 2D, proudění dnových splavenin pouze v 1D. Důvodem bylo, že všechny 2D modely, které jsou autorům práce známé, jsou v současné době tak nestabilní, že by nebylo možné vypočítat většinu PV.



Obr. 6 Úroveň hladiny v obou objektech v závislosti na průtoku v přítokovém korytě

5.4.2. 2D simulace proudění vody

Pro stanovení proudění vody v usazovacích prostorech a v jejich bezprostřední vzdálenosti byl zhotoven 2D numerický model.

Teorie a použitý software

Pro vytvoření 2D numerického modelu proudění vody byl zvolen software SMS-TUFLOW, protože umožňuje řešení neustáleného proudění dostatečně přesně a výpočet je rychlý a stabilní. Možnosti programu TUFLOW jsou poměrně široké, mnohé z nich nebyly při výpočtu využity, proto jsou níže uvedeny upravené rovnice, které vyjadřují pouze řešený případ proudění.

Softwarový prostředek využívá pro řešení 2D proudění v ortogonálním souřadném systému x , y rovnici spjitosti

$$\frac{\partial Z_h}{\partial t} + \frac{\partial(hv_{sx})}{\partial x} + \frac{\partial(hv_{sy})}{\partial y} = 0, \quad (5.3)$$

kde Z_h je úroveň hladiny nad srovnávací hladinou, t je čas, h je hloubka, v_{sx} a v_{sy} jsou složky vektoru svislicové rychlosti.

Dále používá dvě pohybové rovnice (rovnice mělkého proudění)

$$\frac{\partial v_{sx}}{\partial t} + v_{sx} \frac{\partial v_{sx}}{\partial x} + v_{sy} \frac{\partial v_{sx}}{\partial y} - g \frac{\partial Z_h}{\partial x} + g v_{sx} \left(\frac{n^2}{h^{4/3}} + \frac{\xi}{2g\Delta x} \right) \sqrt{v_{sx}^2 + v_{sy}^2} - \nu_t \left(\frac{\partial^2 v_{sx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_{sx}}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial v_{sy}}{\partial t} + v_{sx} \frac{\partial v_{sy}}{\partial x} + v_{sy} \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} - g \frac{\partial Z_h}{\partial y} + g v_{sy} \left(\frac{n^2}{h^{4/3}} + \frac{\xi}{2g\Delta y} \right) \sqrt{v_{sx}^2 + v_{sy}^2} - \nu_t \left(\frac{\partial^2 v_{sy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_{sy}}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (5.5)$$

kde g je tíhové zrychlení, n je součinitel drsnosti ξ je součinitel místní ztráty Δx a Δy jsou rozměry prvku a ν_t je turbulentní viskozita.

Turbulentní viskozita je určena rovnicí

$$\nu_t = \nu + c\Delta x\Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial v_{sx}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_{sy}}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_{sx}}{\partial y} + \frac{\partial v_{sy}}{\partial x} \right)^2}, \quad (5.6)$$

kde ν je molekulární viskozita a c je součinitel Smagorinského modelu turbulence.

Model

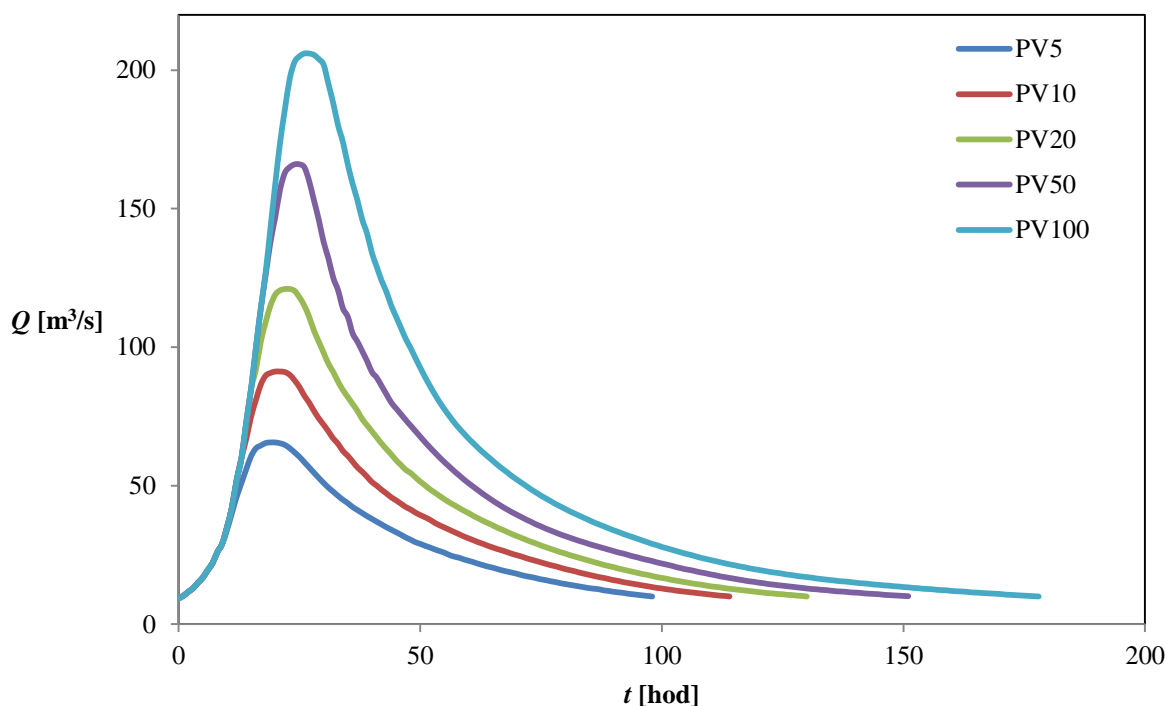
Byly vytvořeny dva rozsahově odlišné modely. Rozsah většího modelu byl od mostu pod rozdělovacím objektem až k hrázi VD Nové Heřminovy a sloužil k analýze proudění a vzdouvání hladiny v konci vzdutí, což bylo podkladem pro druhý plošně menší model s rozsahem od mostu pod rozdělovacím objektem až po konec vzdutí při zásobní hladině. Použití uvedeného zdvojení umožnilo podstatně rychlejší provádění výpočtů při změně geometrie UPS, případně dalších přilehlých částí. Větší model obsahoval geometrii současného stavu a menší model obsahoval geometrii návrhového stavu při prázdném UPDS. Základních návrhových variant geometrie bylo šest, uveden je pouze finální návrh zohledňující doporučení fyzikálního modelu.

Proudění bylo v celém rozsahu modelu řešeno 2D na ortogonální síti. Proudění mostem a spádovým objektem bylo rovněž řešeno 2D. Bližší informace o řešení lze nalézt v manuálu programu TUFLOW (2010).

Horními okrajovými podmínkami byly hydrogramy průtoků povodňových vln PV₅, PV₁₀, PV₂₀, PV₅₀, PV₁₀₀ (Obr. 7), dolními okrajovými podmínkami byly úrovně hladiny v čase stanovené z řešení transformace povodňových vln nádrží.

Počáteční podmínkou byla hydrostatická úroveň hladiny v nádrži.

Součinitele drsnosti povrchů byly voleny s ohledem na jejich předpokládané využití, viskozita a součinitel turbulence byly ponechány dle doporučení výrobce softwaru.



Obr. 7 PV použité při simulaci průtoku vody i splavenin

Výsledky

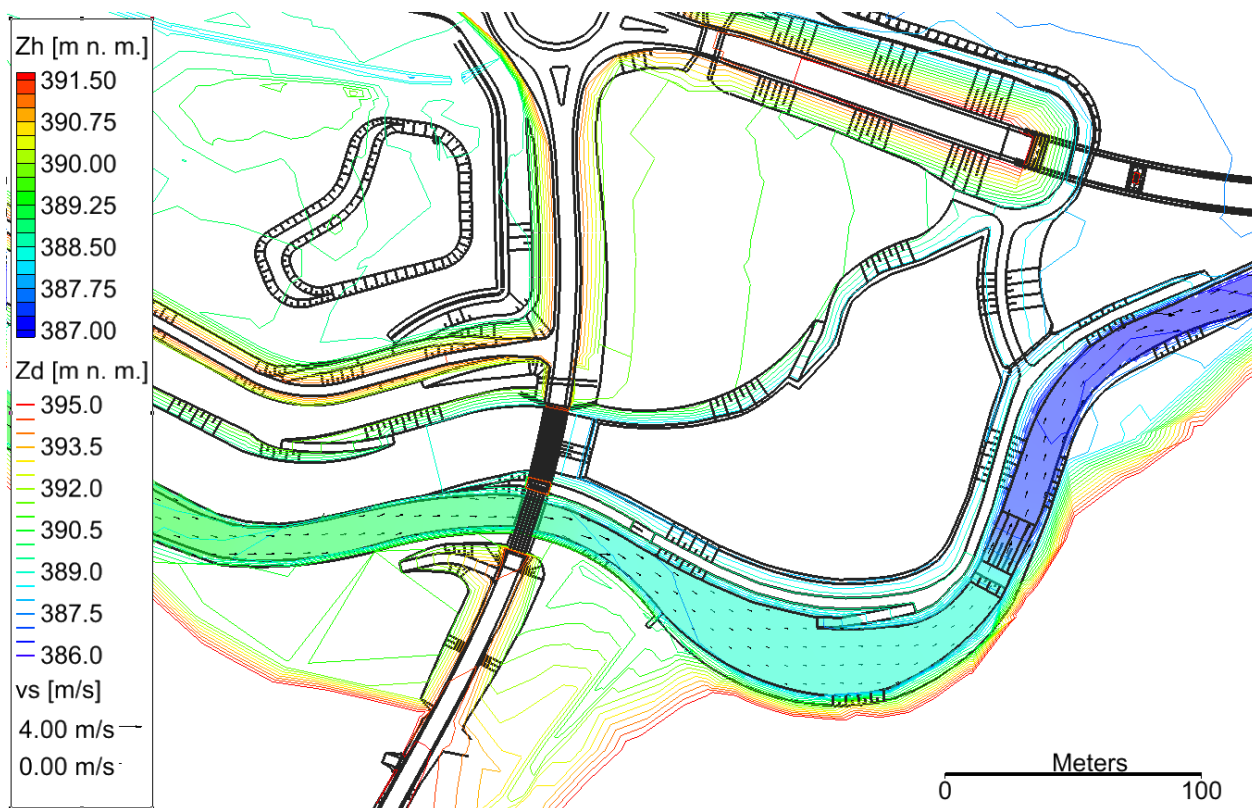
Výsledky pro Q_{30d} dokumentují mapy úrovně hladiny Z_h (Obr. 8), hloubky h (Obr. 9), svislicové rychlosti v_s (Obr. 10) a tečného napětí na dně τ (Obr. 11).

Výsledky pro jednotlivé PV dokumentují mapy úrovní hladiny Z_h , hloubek h , svislicových rychlostí v_s a tečných napětí τ při kulminačním průtoku.

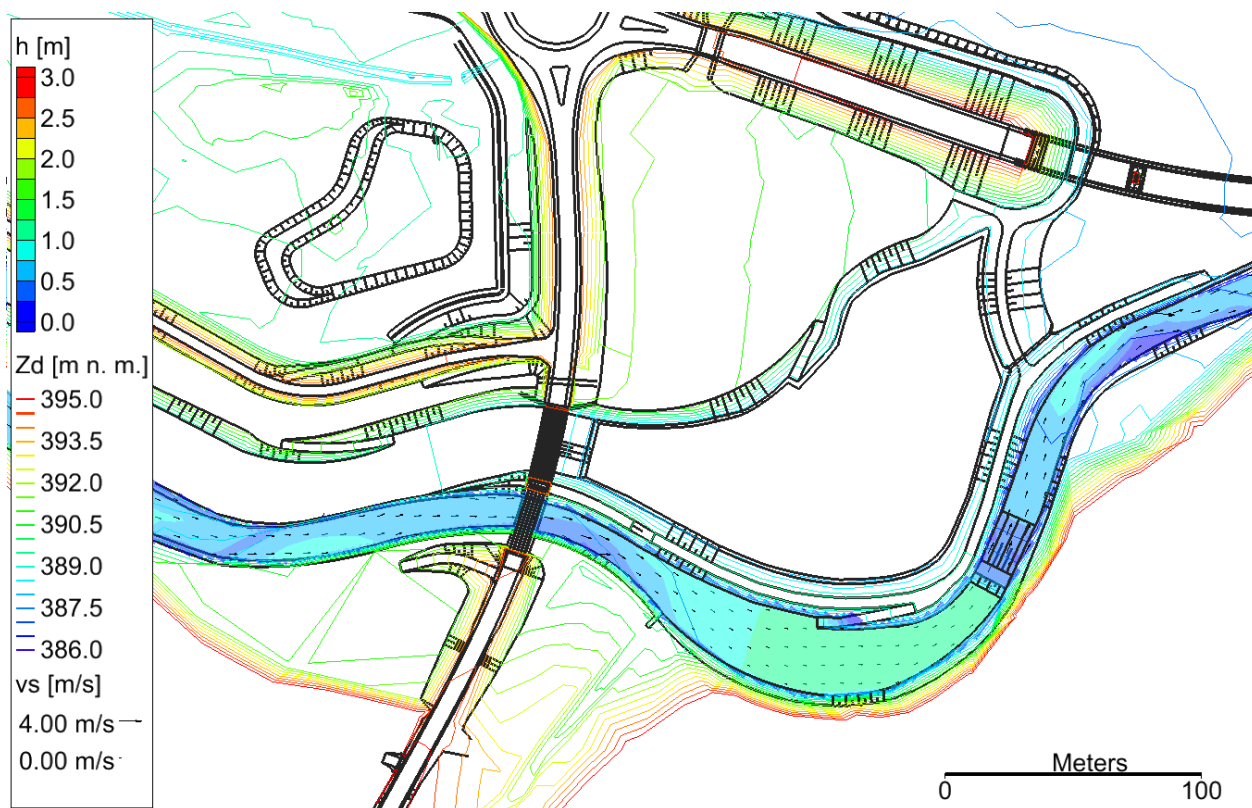
- Pro PV₅ jsou to Obr. 12 až Obr. 15.
- Pro PV₁₀ jsou to Obr. 16 až Obr. 19.
- Pro PV₂₀ jsou to Obr. 20 až Obr. 23.
- Pro PV₅₀ jsou to Obr. 24 až Obr. 27.
- Pro PV₁₀₀ jsou to Obr. 28 až Obr. 31.

Mapy proudění pro PV₁₀₀ při kulminaci hladiny v nádrži dokumentují Obr. 32 až Obr. 35.

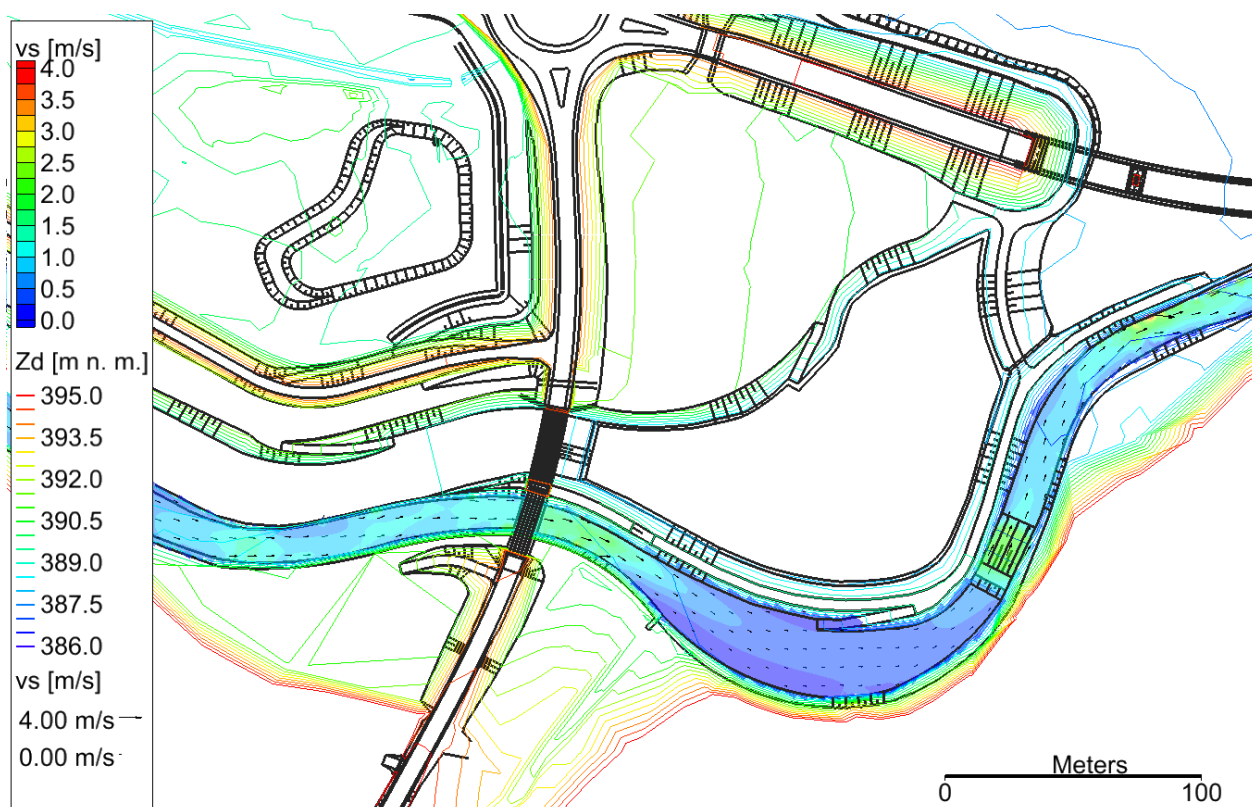
Z map vyplývá, že proudění ve finální variantě (zakomponovány jsou úpravy doporučené z fyzikálního modelu) se chová dle požadavků návrhu. Je třeba upozornit, že dno je bez zanesení usazeninami (při kulminaci ani při maximálním vzduť v nádrži nebylo měřeno), tedy proudění v UPDS neodpovídá u proudění na prototypu zcela.



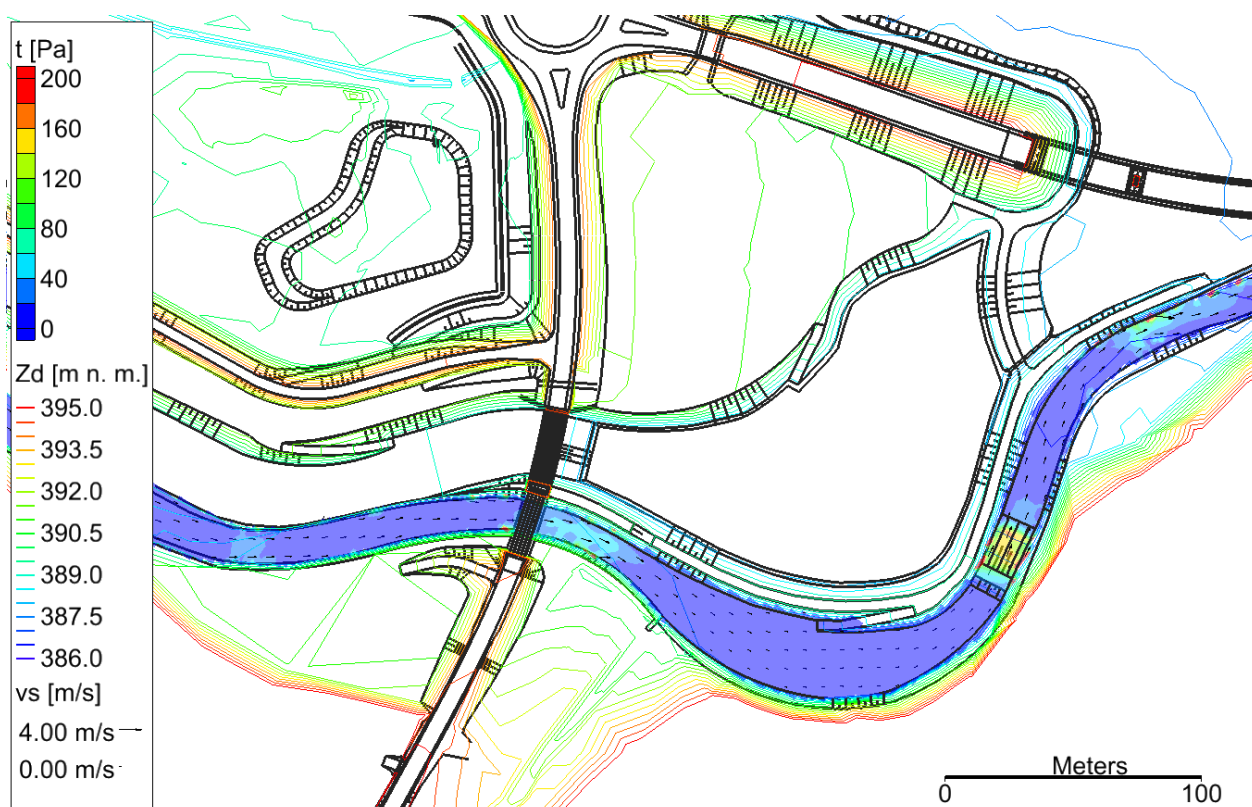
Obr. 8 Q_{30d} , úroveň hladiny Z_h



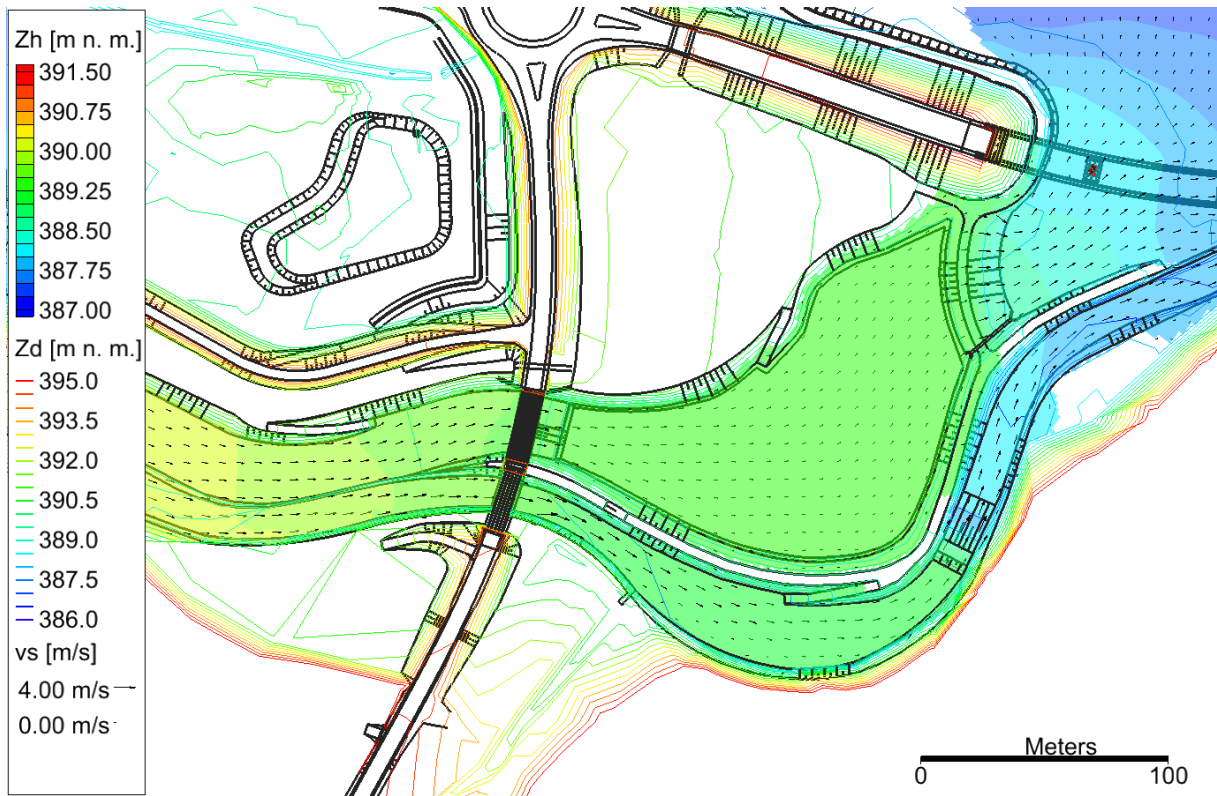
Obr. 9 Q_{30d} , hloubka h



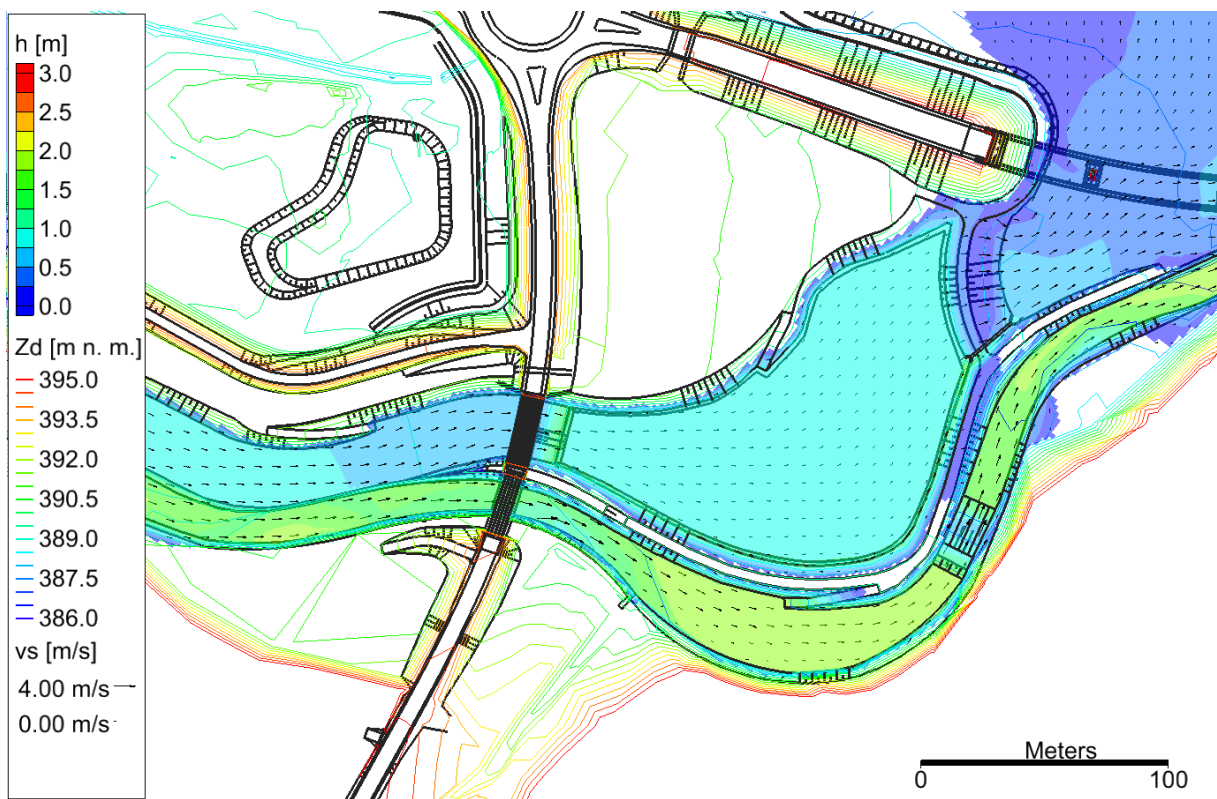
Obr. 10 Q_{30d} , svislicová rychlost v_s



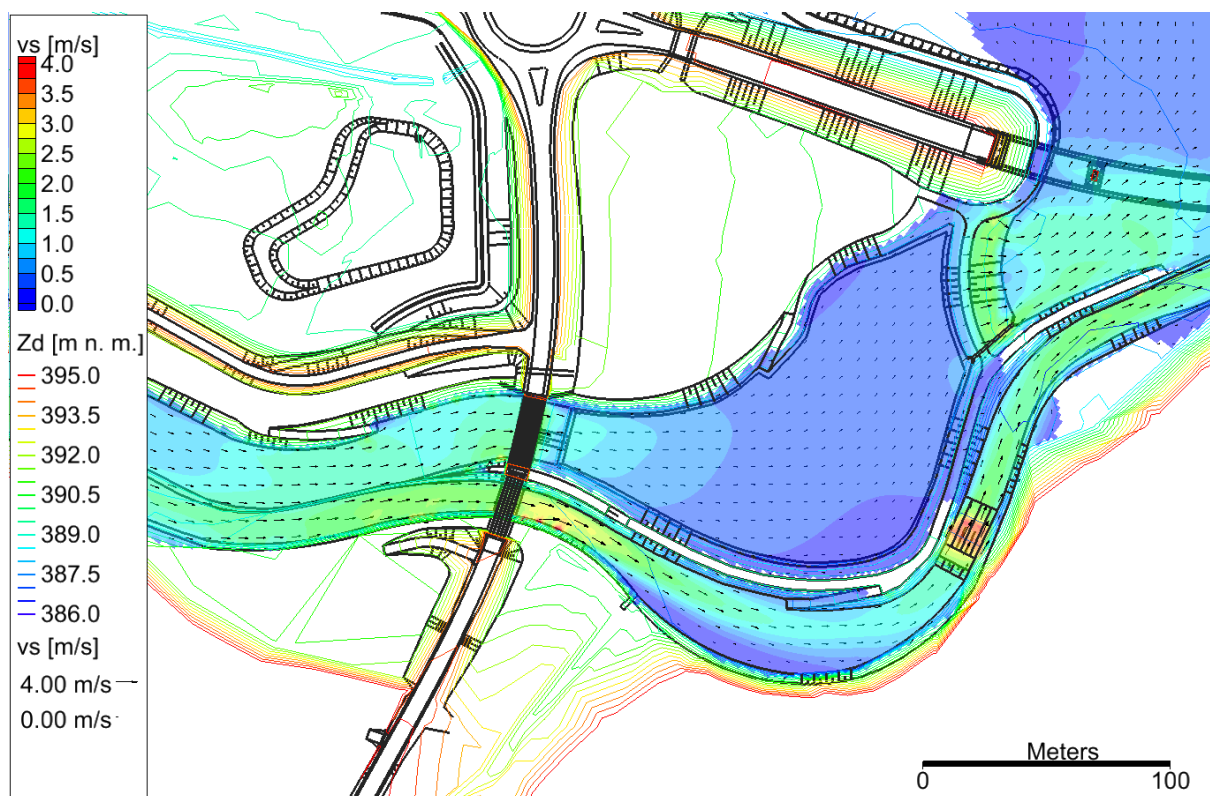
Obr. 11 Q_{30d} , tečné napětí τ



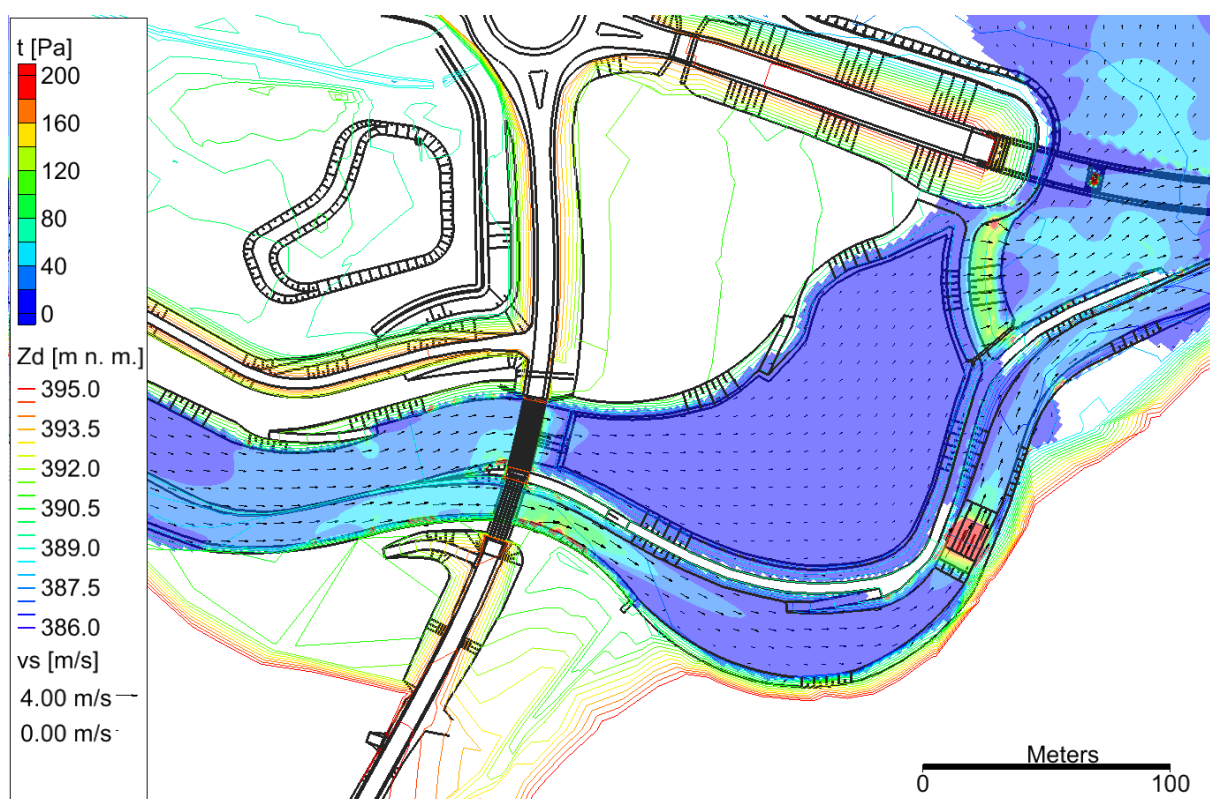
Obr. 12 PV₅, kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h



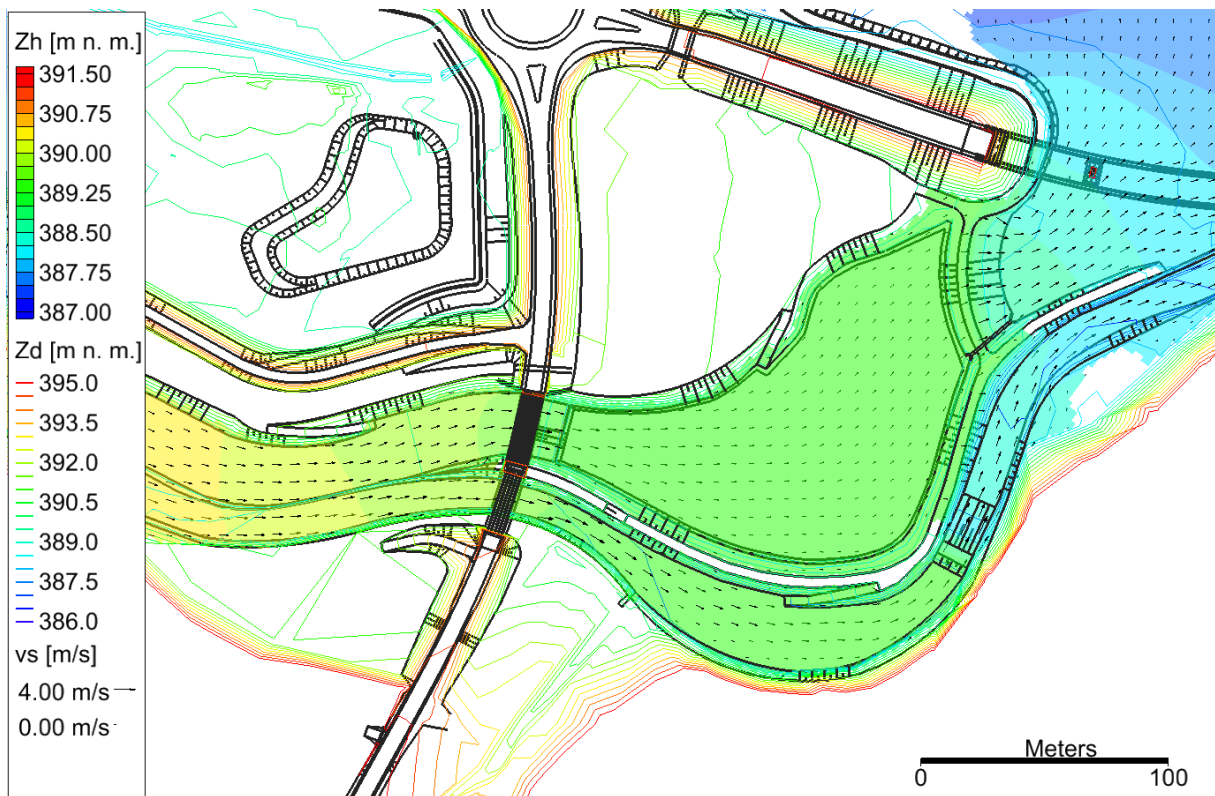
Obr. 13 PV₅, kulminační průtok, hloubka h



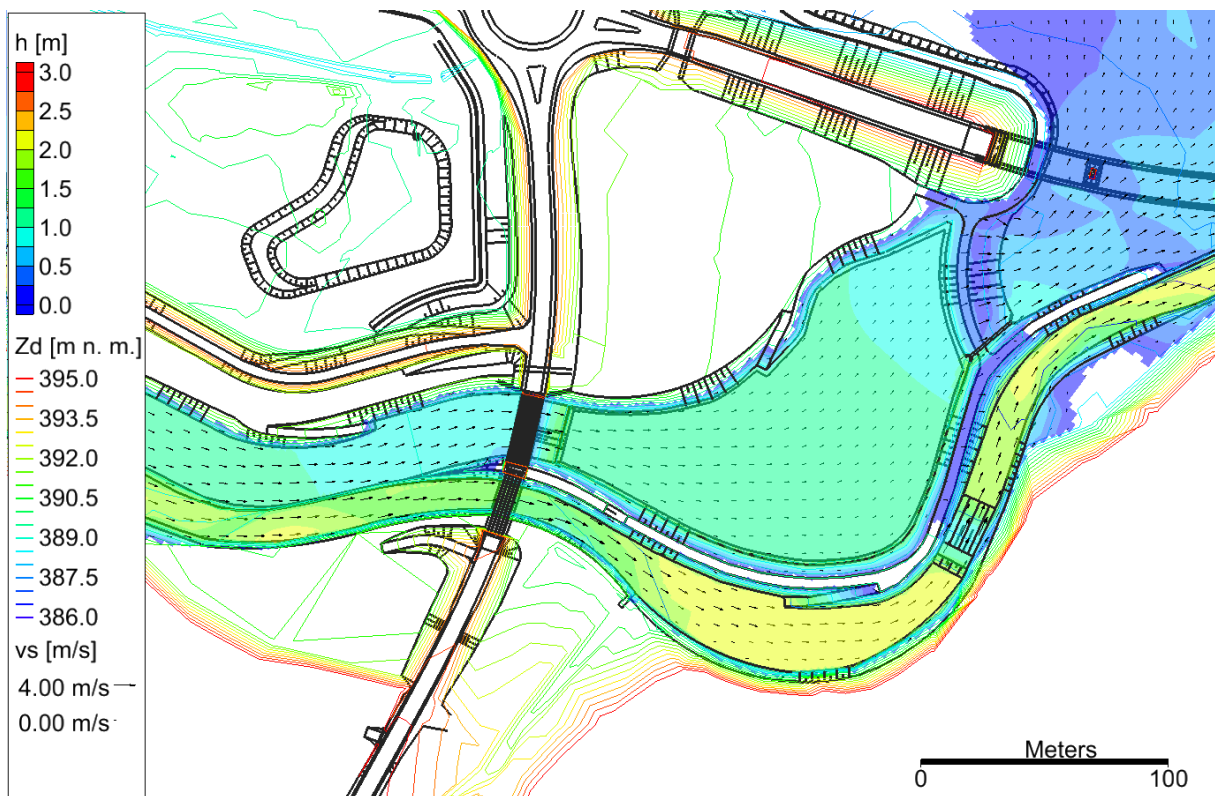
Obr. 14 PV₅, kulminační průtok, svislicová rychlost v_s



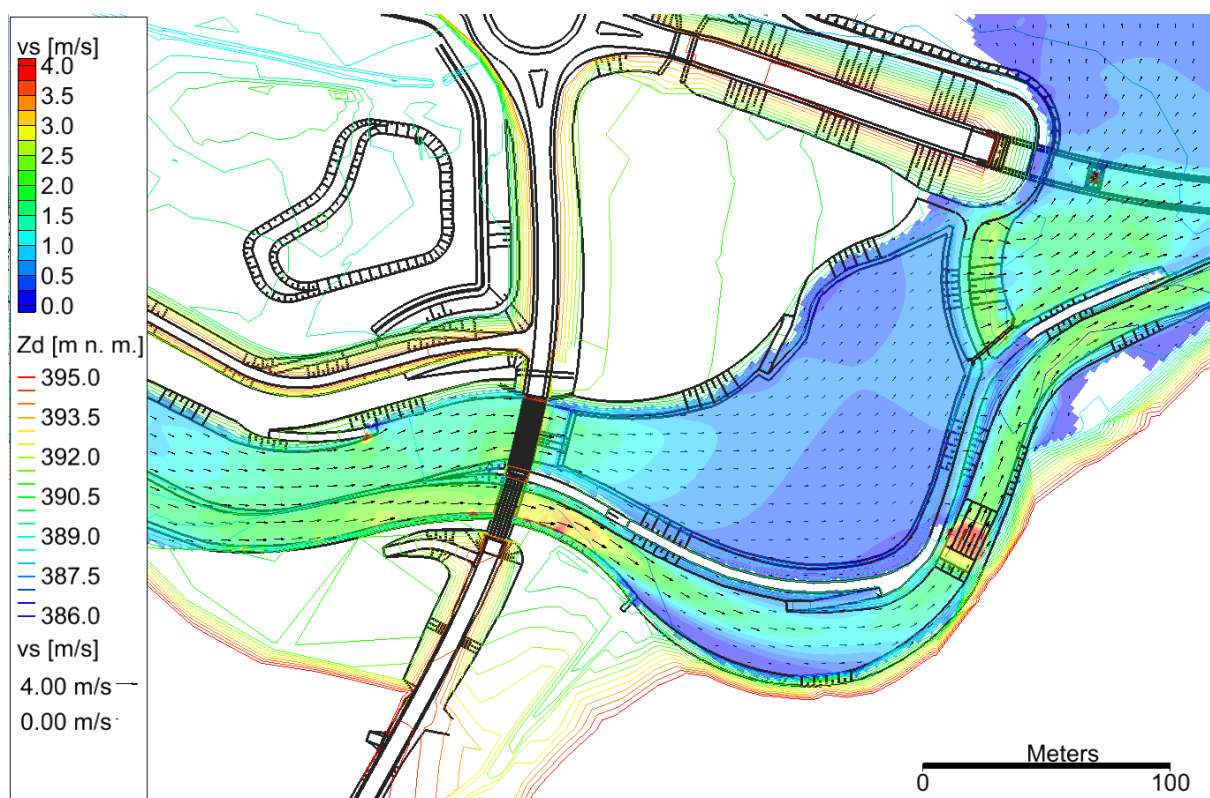
Obr. 15 PV₅, kulminační průtok, tečné napětí τ



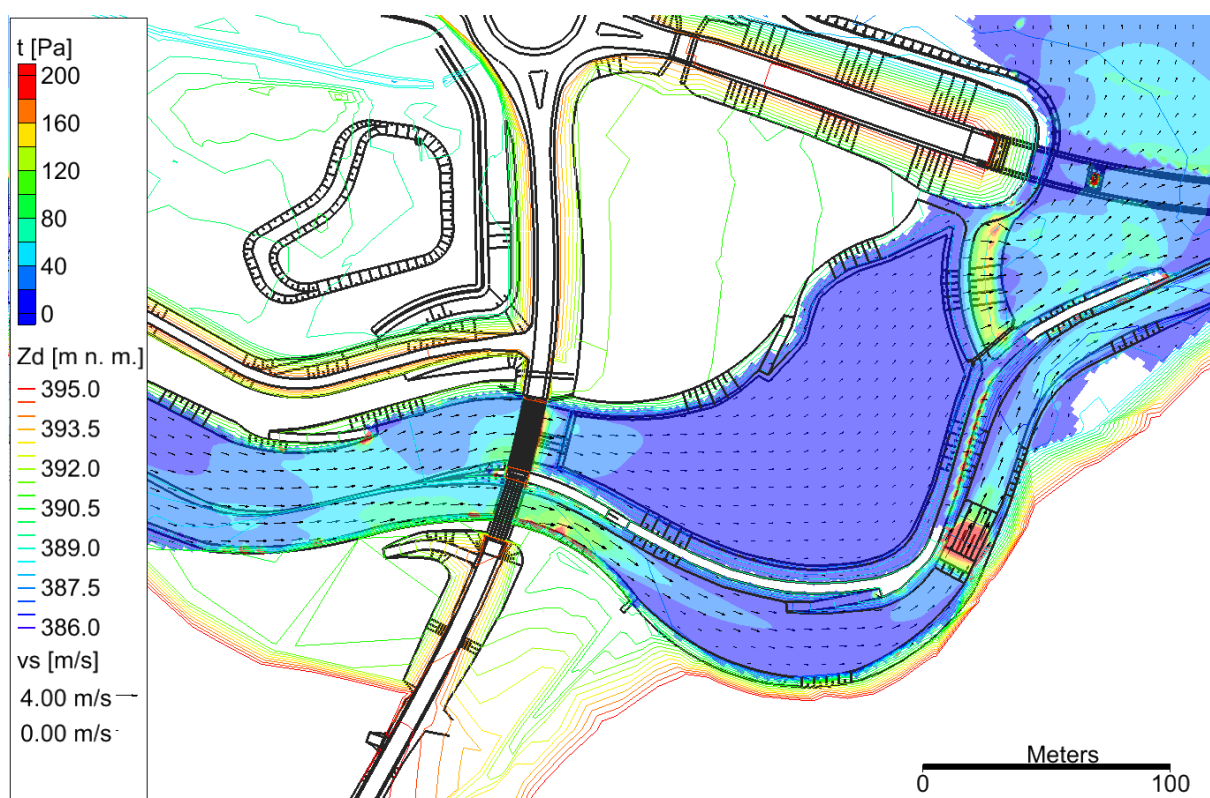
Obr. 16 PV₁₀, kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h



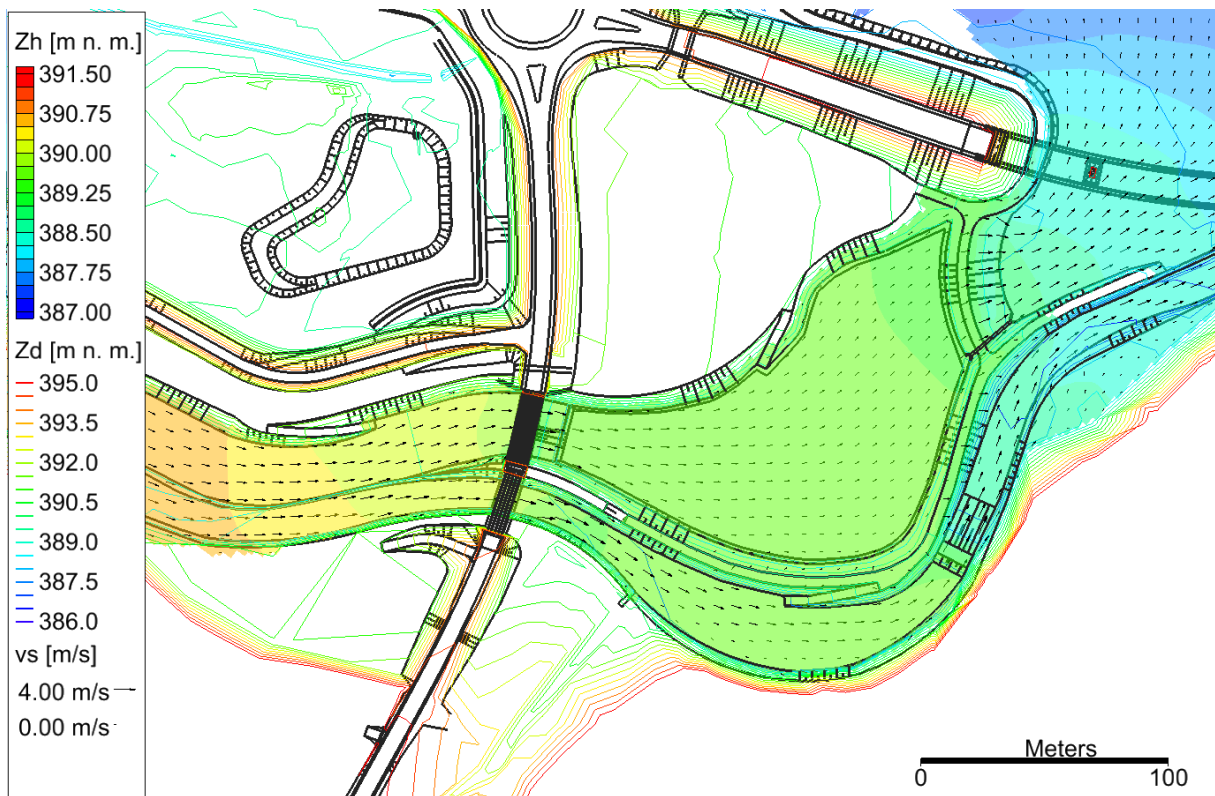
Obr. 17 PV₁₀, kulminační průtok, hloubka h



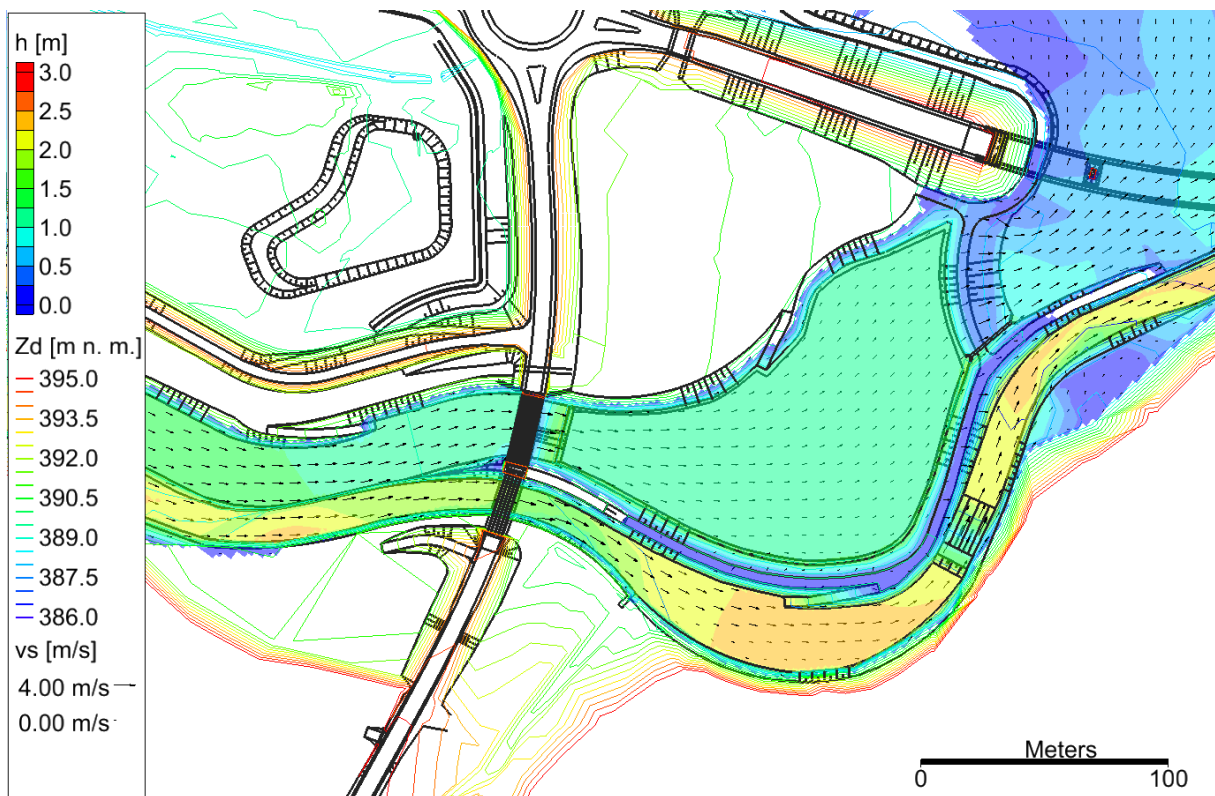
Obr. 18 PV₁₀, kulminační průtok, svislicová rychlost v_s



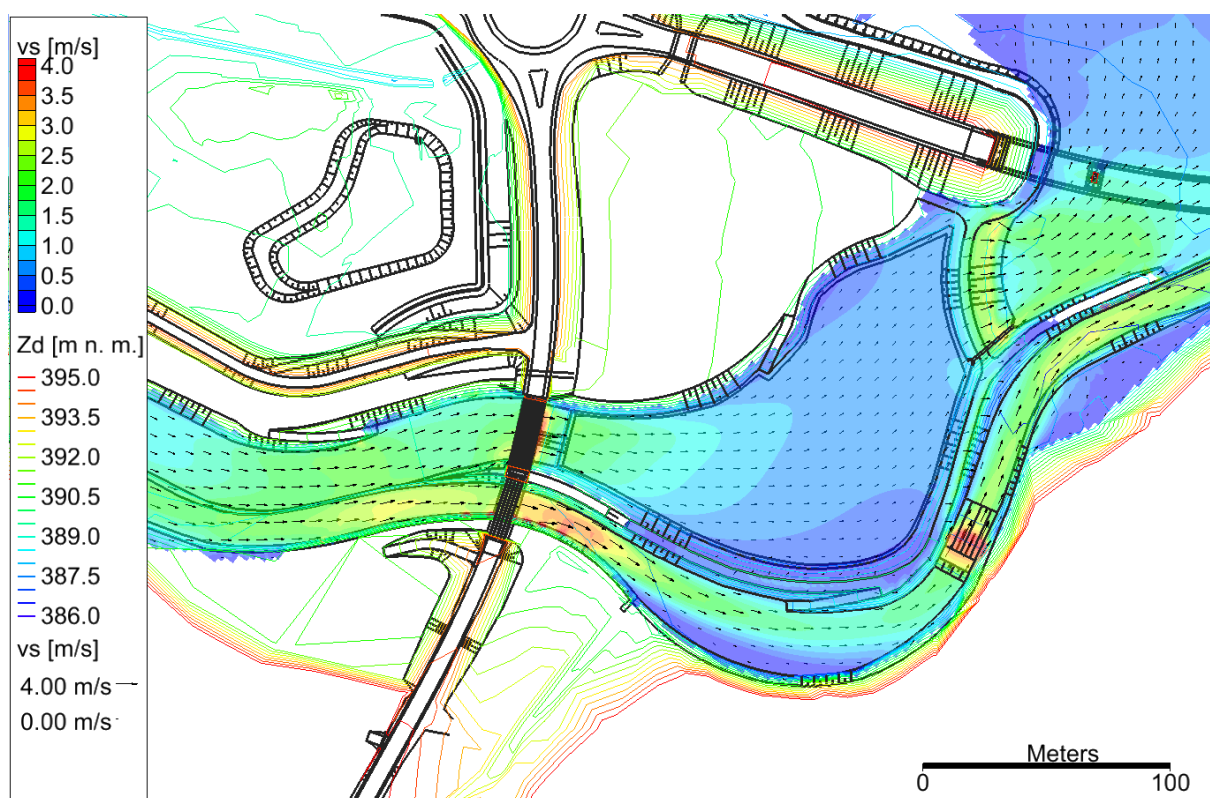
Obr. 19 PV₁₀, kulminační průtok, tečné napětí τ



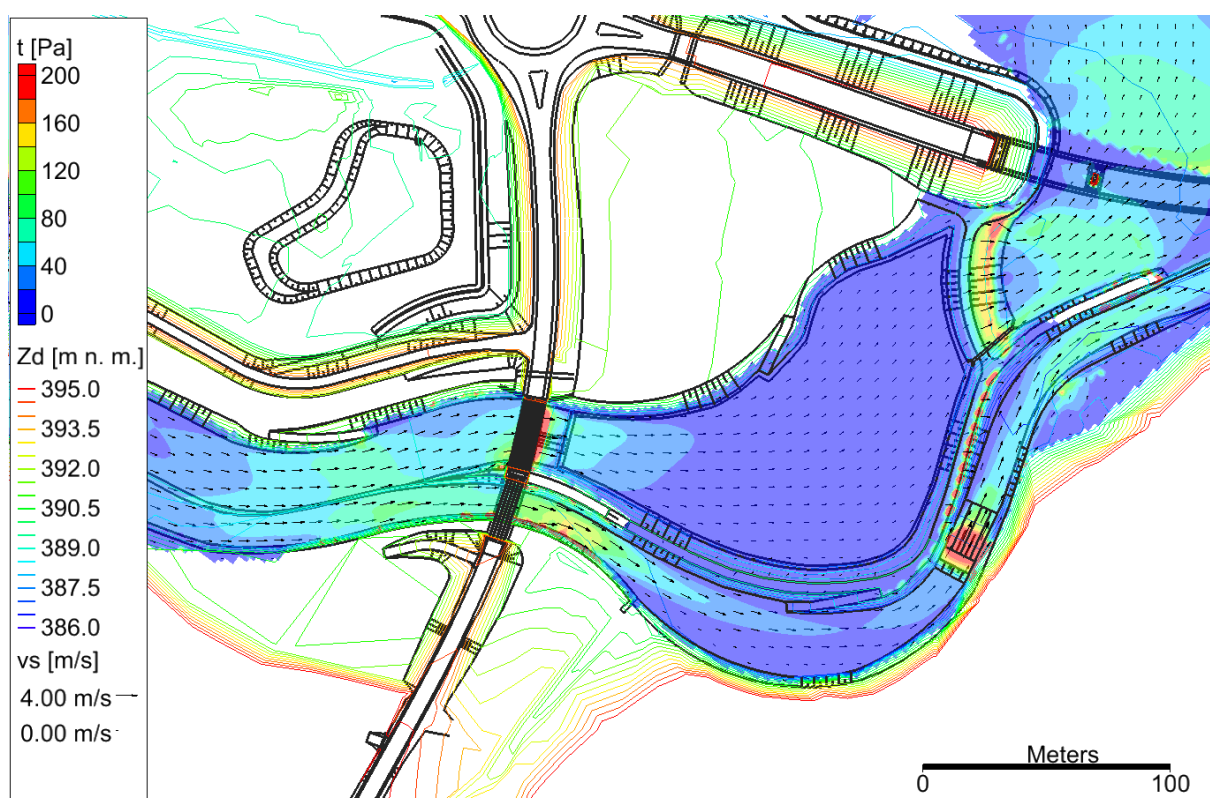
Obr. 20 PV₂₀, kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h



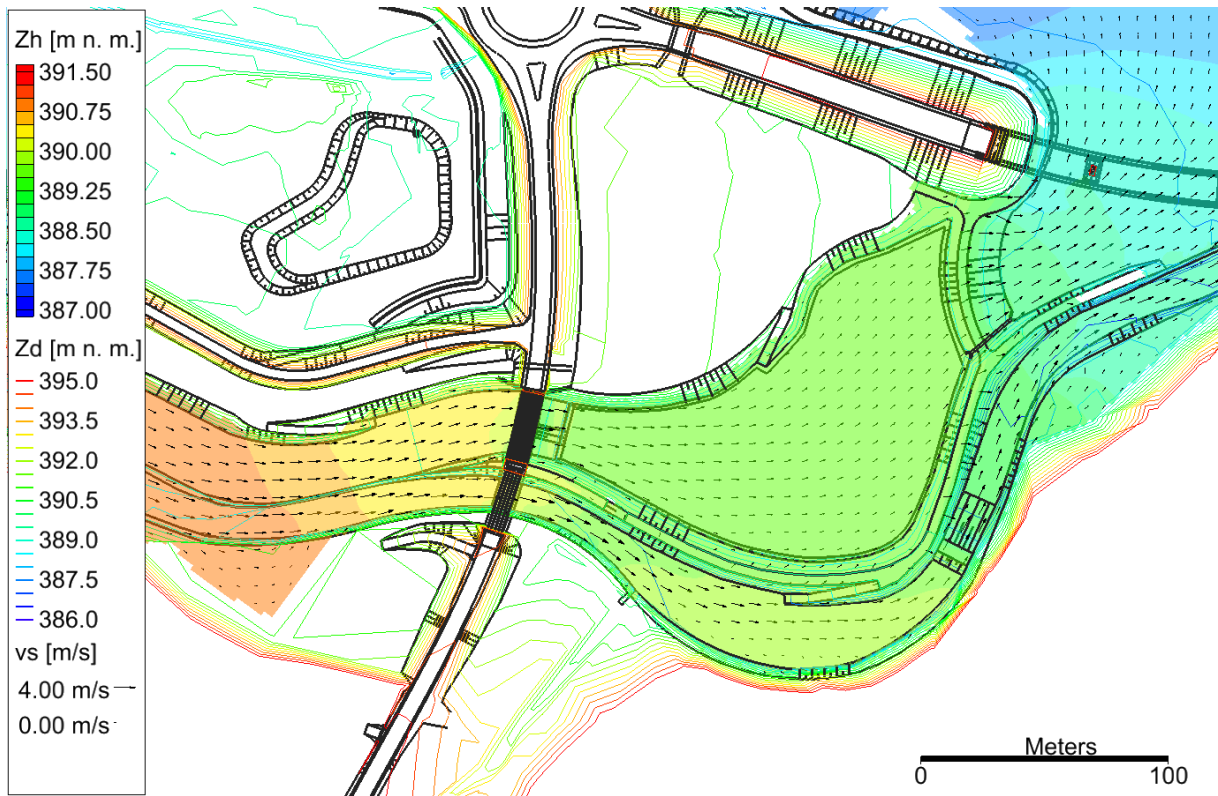
Obr. 21 PV₂₀, kulminační průtok, hloubka *h*



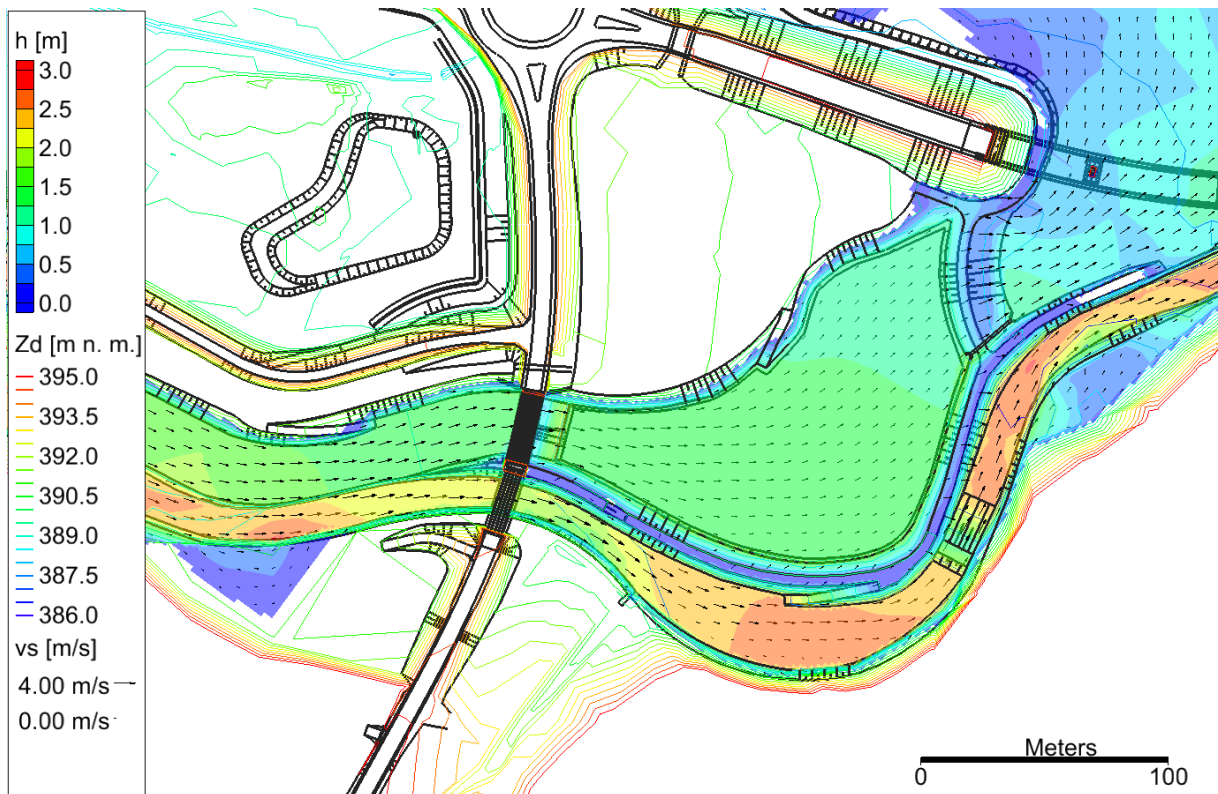
Obr. 22 PV₂₀, kulminační průtok, svislicová rychlost v_s



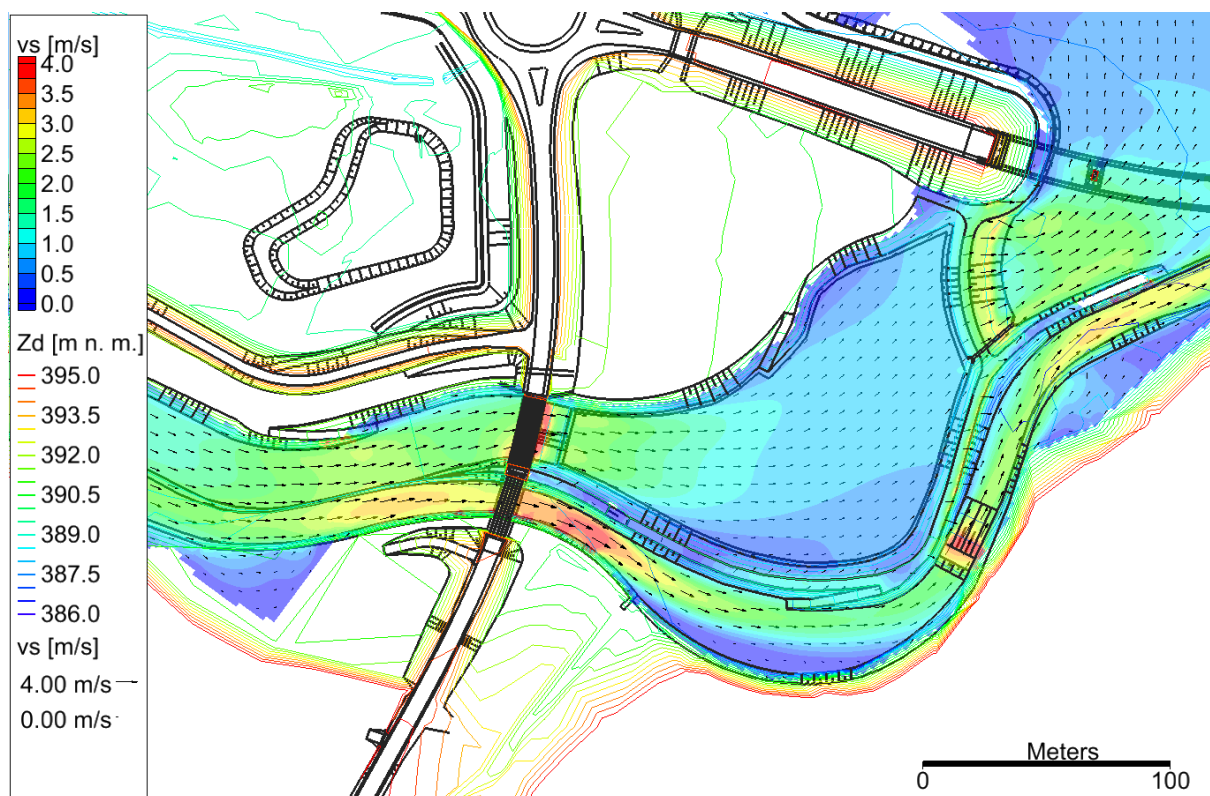
Obr. 23 PV₂₀, kulminační průtok, tečné napětí τ



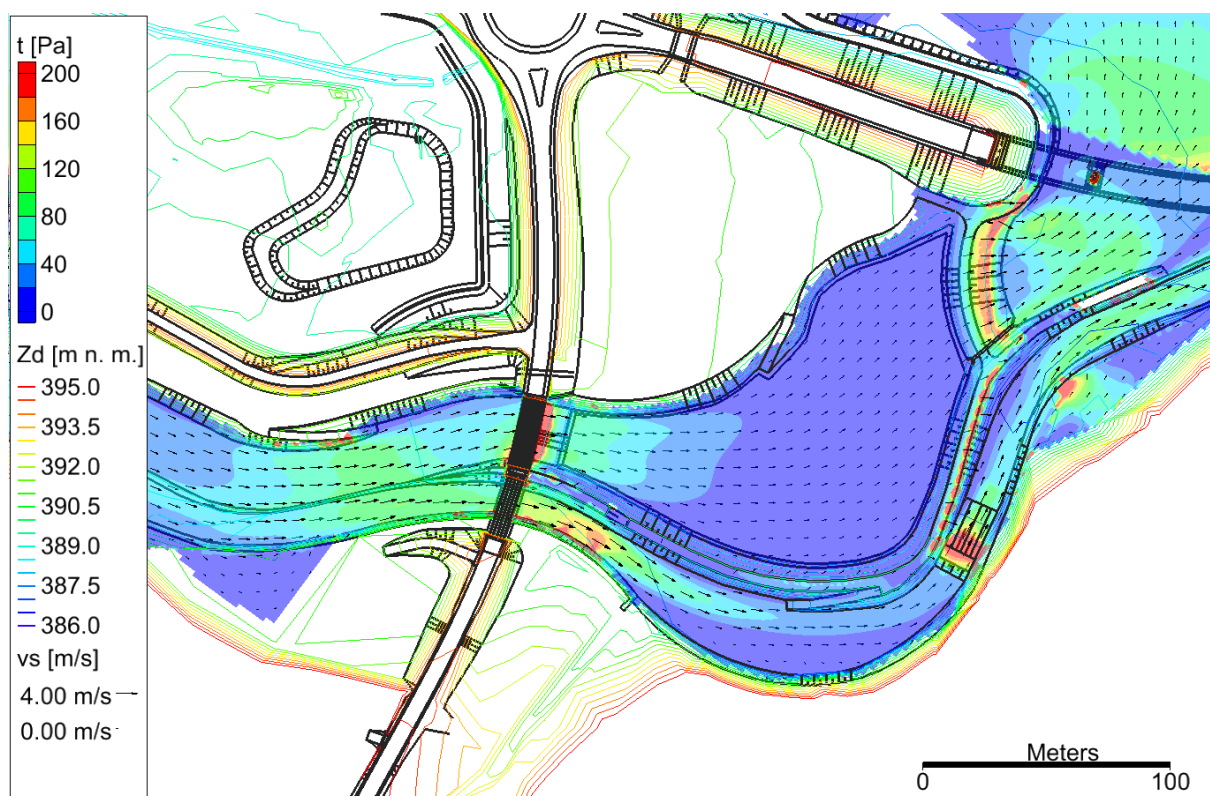
Obr. 24 PV₅₀, kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h



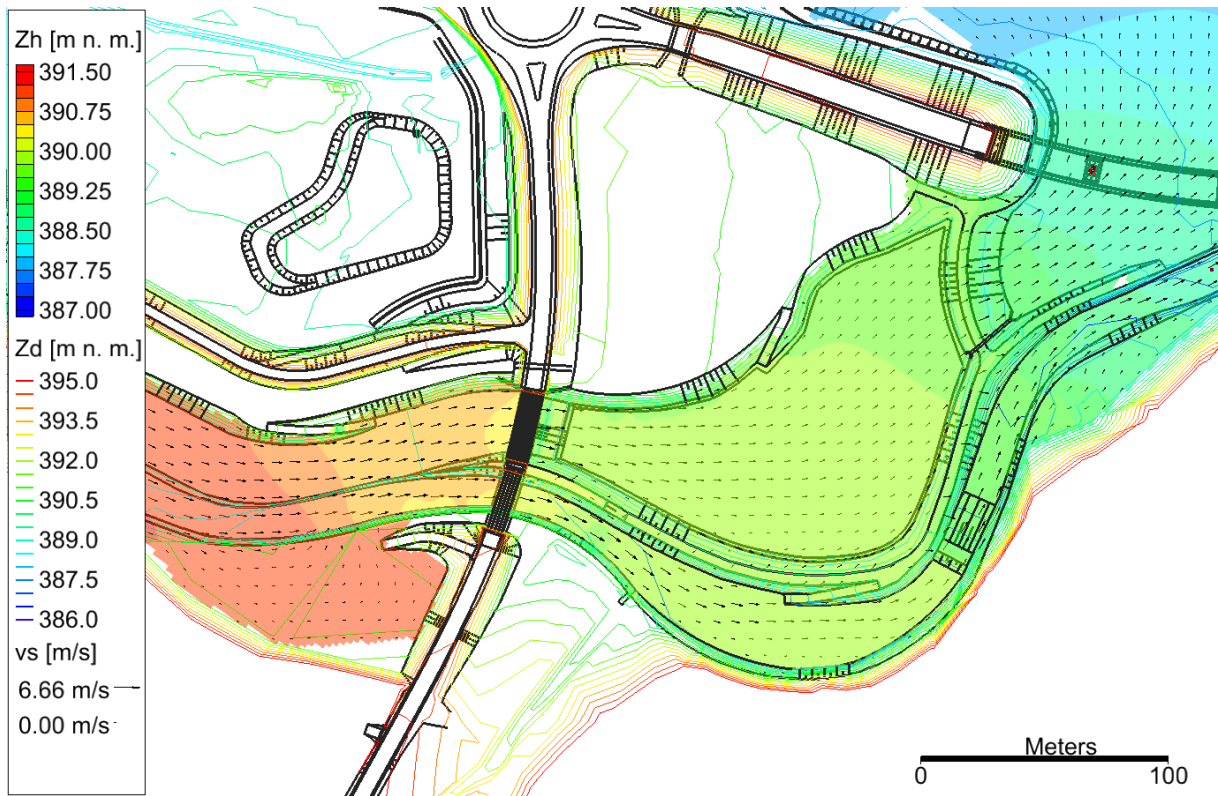
Obr. 25 PV₅₀, kulminační průtok, hloubka *h*



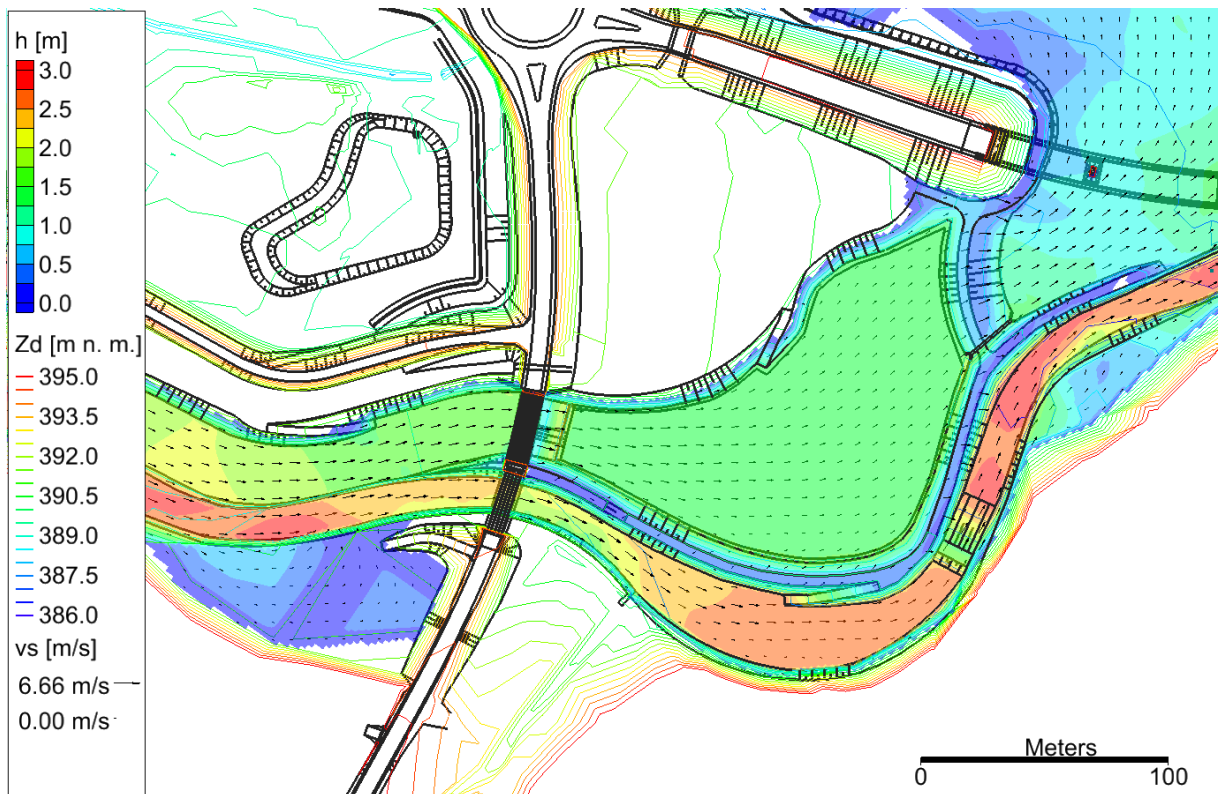
Obr. 26 PV₅₀, kulminační průtok, svislicová rychlost v_s



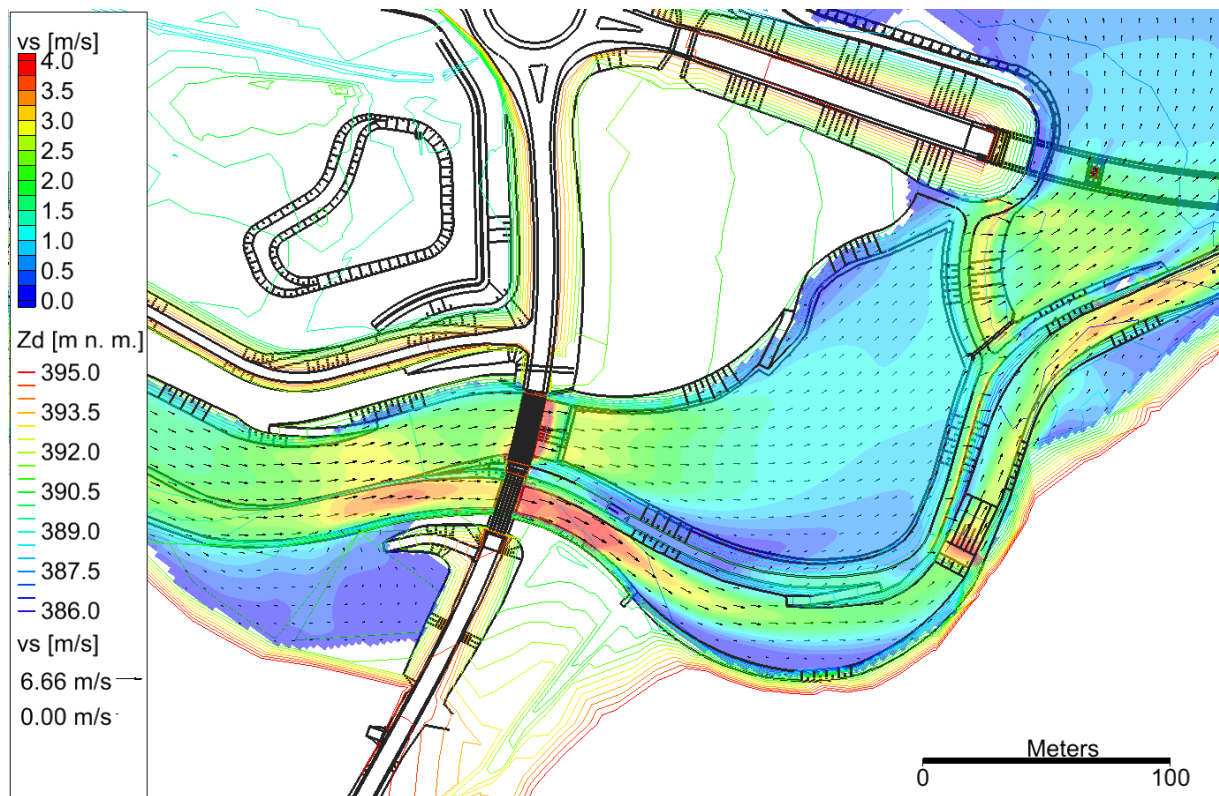
Obr. 27 PV₅₀, kulminační průtok, tečné napětí τ



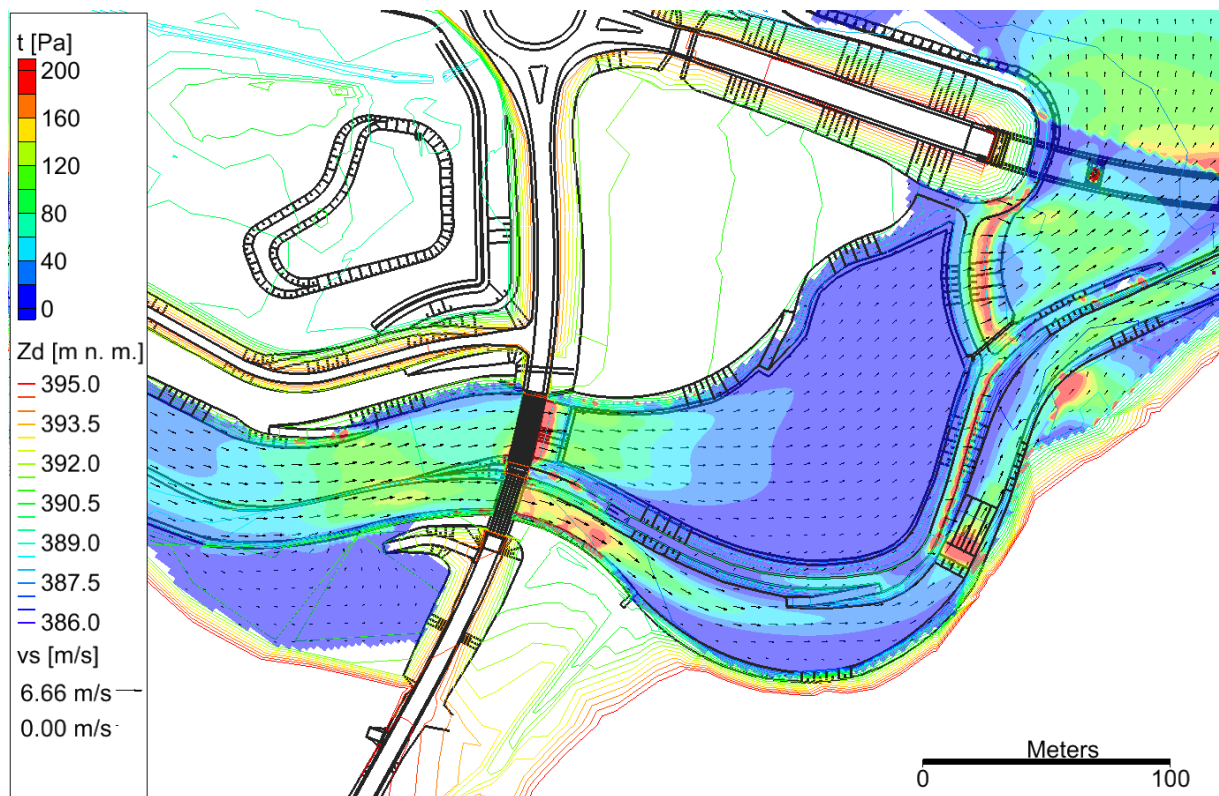
Obr. 28 PV₁₀₀, kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h



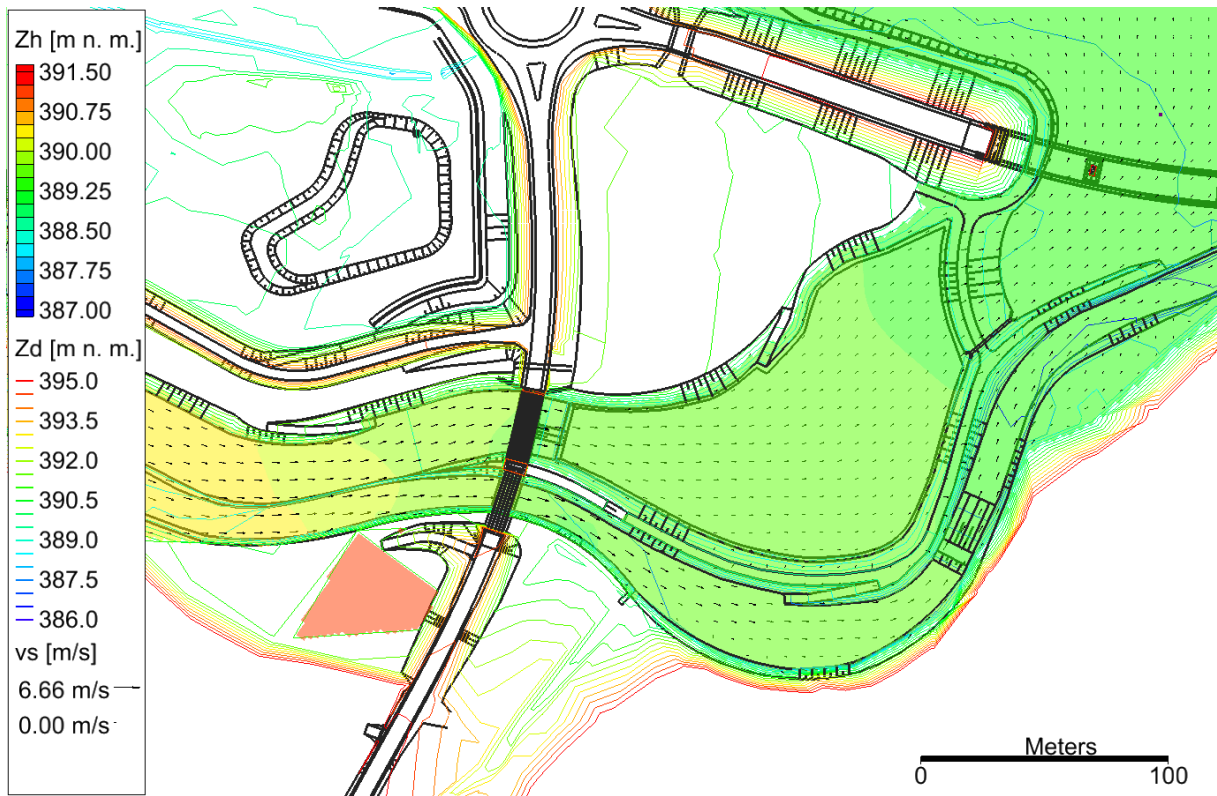
Obr. 29 PV₁₀₀, kulminační průtok, hloubka h



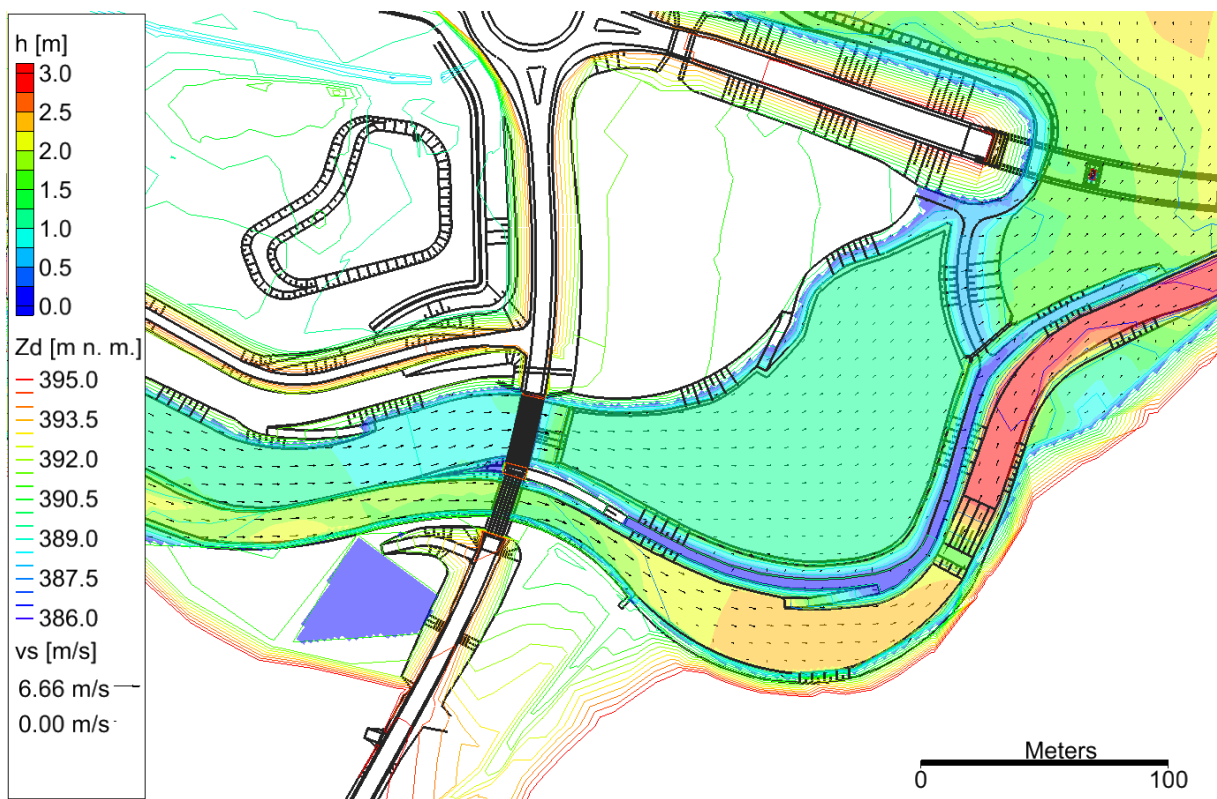
Obr. 30 PV₁₀₀, kulminační průtok, svislicová rychlost v_s



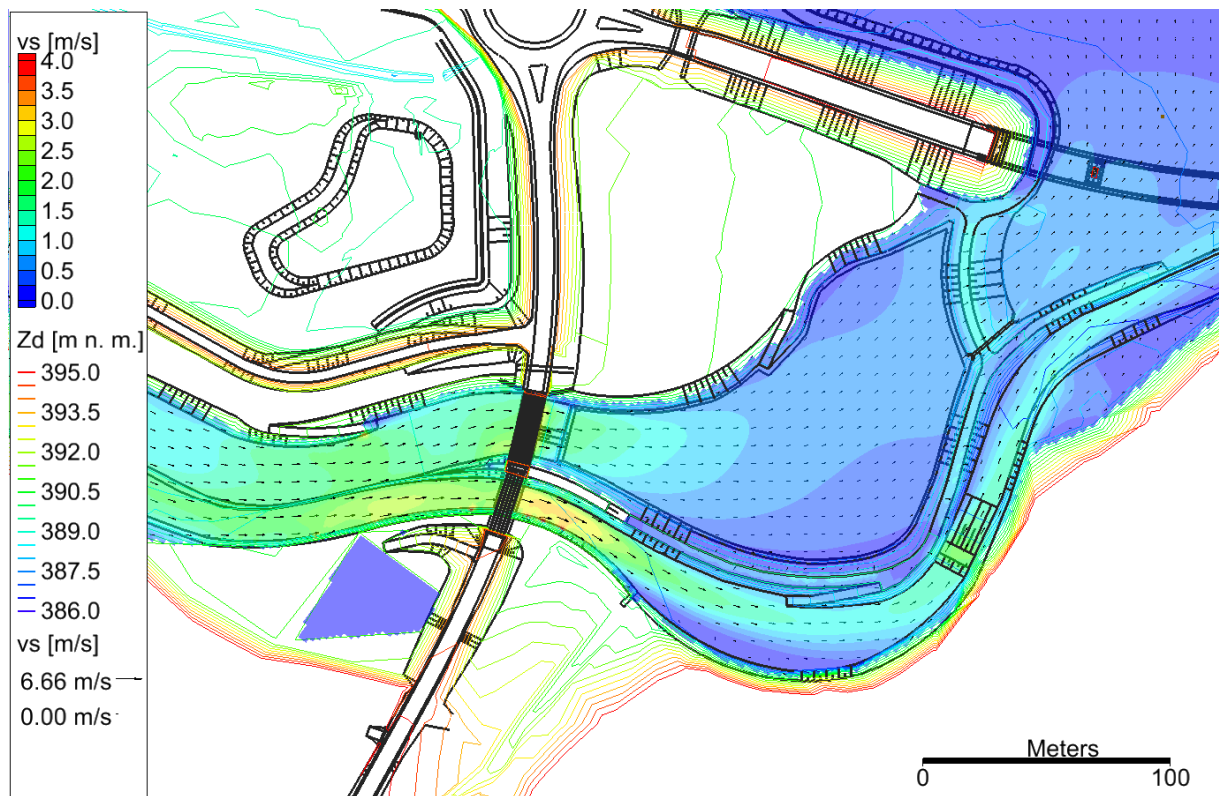
Obr. 31 PV₁₀₀, kulminační průtok, tečné napětí τ



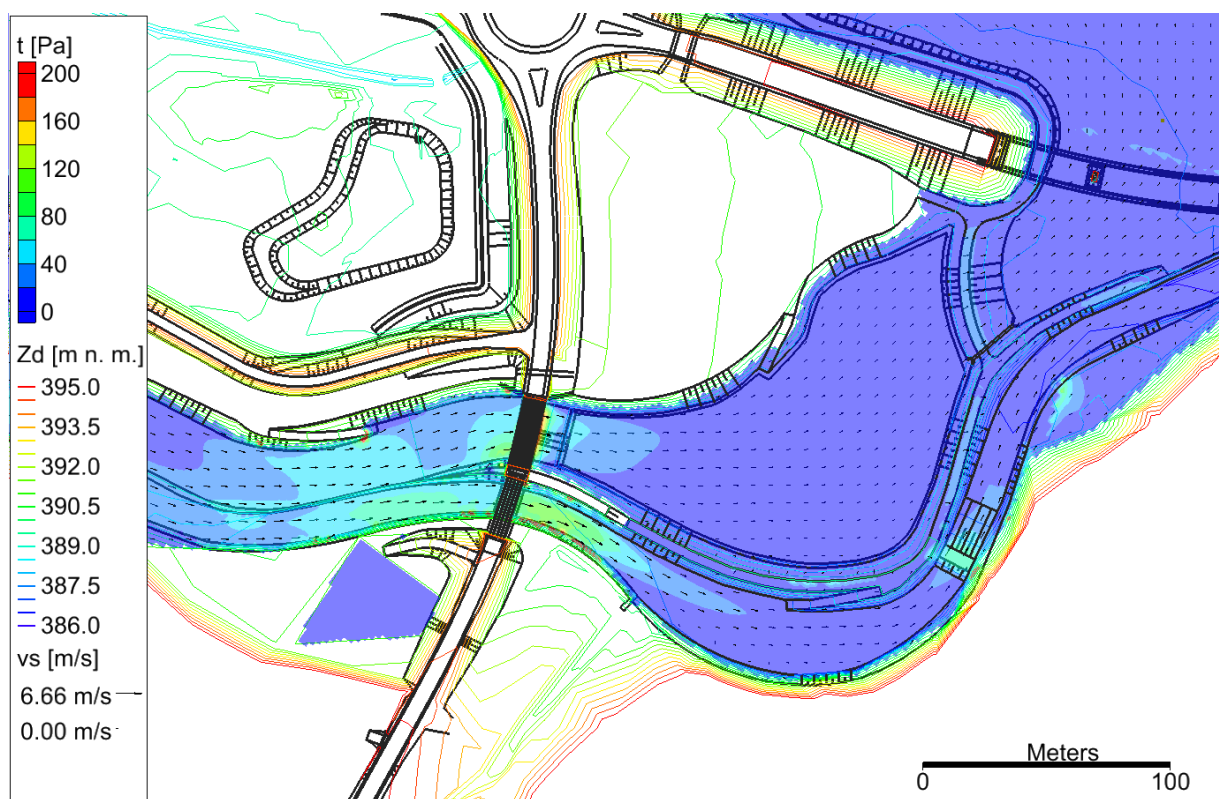
Obr. 32 PV₁₀₀, kulminace hladiny v nádrži, úroveň hladiny Z_h



Obr. 33 PV₁₀₀, kulminace hladiny v nádrži, hloubka h



Obr. 34 PV₁₀₀, kulminace hladiny v nádrži, svislicová rychlost v_s



Obr. 35 PV₁₀₀, kulminace hladiny v nádrži, tečné napětí τ

5.4.3. 1D simulace proudění vody a dnových splavenin

Pro stanovení transportu splavenin UPDS byl zhotoven 1D numerický model proudění vody a dnových splavenin.

Teorie a použitý software

K řešení byl použit software HEC-RAS 4.1.

Výpočet proudění vody

Pro výpočet ustáleného nerovnoměrného proudění mezi dvěma profily j a $j+1$ je použito Bernoulliho rovnice (Obr. 36)

$$Z_{d_j} + h_j + \frac{\alpha_j \cdot v_j^2}{2 \cdot g} = Z_{d_{j+1}} + h_{j+1} + \frac{\alpha_{j+1} \cdot v_{j+1}^2}{2 \cdot g} + h_{z,k}, \quad (5.7)$$

kde Z_d je úroveň dna nad srovnávací rovinou, h je hloubka, α je součinitel kinetické energie, v je průřezová rychlost a g je tíhové zrychlení. Ztrátová výška h_z na úseku k je součtem třetí ztrátové výšky a místní ztrátové výšky rozepsané do podoby

$$h_{z,k} = l_k \cdot \left(\frac{Q_k}{K_k} \right)^2 + \xi_k \left| \frac{\alpha_{j+1} \cdot v_{j+1}^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_j \cdot v_j^2}{2 \cdot g} \right|, \quad (5.8)$$

kde Q je průtok, K je modul průtoku a ξ je součinitel místních ztrát.

Průtočný průřez je rozdělen na tři základní části – levou bermu (LOB), kynetu (CH) a pravou bermu (ROB), v každé základní části se průtok počítá zvlášť. Vzdálenost profilů l_k je určena vzdáleností příslušejících si částí vážených dle průtoku

$$l_k = \frac{l_{LOB} \cdot Q_{LOB} + l_{CH} \cdot Q_{CH} + l_{ROB} \cdot Q_{ROB}}{Q_{LOB} + Q_{CH} + Q_{ROB}}. \quad (5.9)$$

Průměrný modul průtoku v úseku k se určí jako průměr

$$K_k = \frac{K_j + K_{j+1}}{2}. \quad (5.10)$$

Průměrný modul průtoku v profilu j se určí

$$K_j = K_{LOB} + K_{CH} + K_{ROB}. \quad (5.11)$$

Základní moduly průtoku pro bermy jsou vyjádřeny z dílčích modulů průtoku jejich součtem

$$K_{LOB} = \sum_{i=1}^{N_{LOB}} K_i; K_{ROB} = \sum_{i=1}^{N_{ROB}} K_i. \quad (5.12)$$

Dílčí modul průtoku je pak dán

$$K_i = \frac{1}{n_i} \cdot S_i \cdot R_i^{2/3}. \quad (5.13)$$

Hydraulický poloměr R je dán poměrem mezi průtočným průřezem dané části S a jeho omezeným obvodem O , tedy

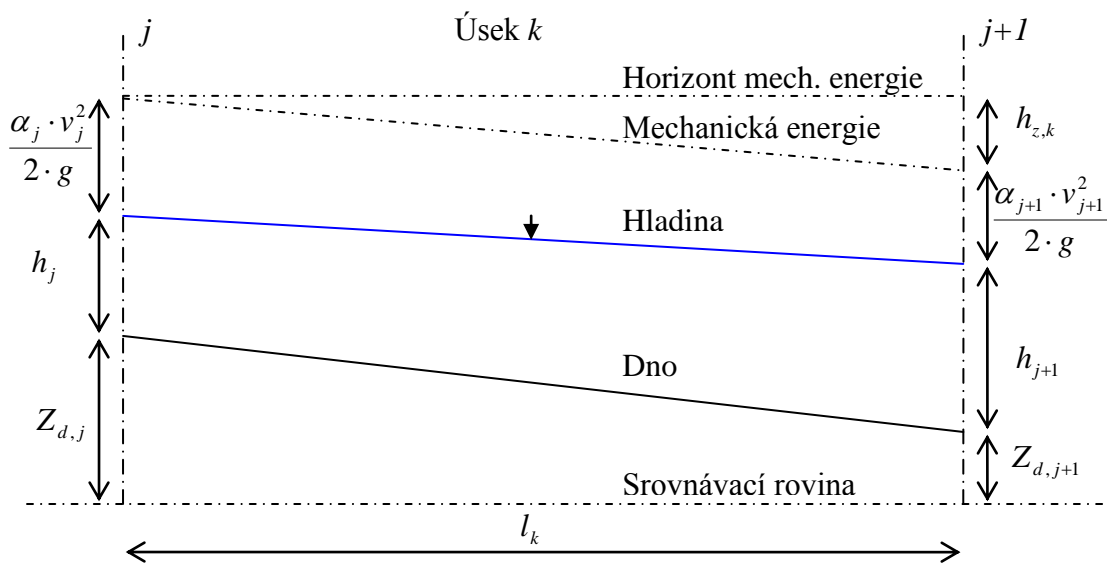
$$R_i = \frac{S_i}{O_i}. \quad (5.14)$$

Součinitel drsnosti pro kynetu je dán váženým průměrem přes omezený obvod

$$n_{CH} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (o_i \cdot n_i^{1/2})}{O} \right]^{2/3} . \quad (5.15)$$

Součinitel kinetické energie α je pro celý profil j vyjádřen ze základních průtočných částí dle vážení přes rychlosti následovně

$$\alpha_j = \frac{S_j^2 \cdot \left(\frac{K_{LOB}^3}{S_{LOB}^2} + \frac{K_{CH}^3}{S_{CH}^2} + \frac{K_{ROB}^3}{S_{ROB}^2} \right)}{K_j^3} . \quad (5.16)$$



Obr. 36 Schéma pro výpočet Bernoulliho rovnice

Výpočet proudění splavenin

Základem pro řešení transportu splavenin je rovnice spjitosti (Obr. 37) ve tvaru

$$\frac{Q_{V,d} - Q_{V,h}}{0,5(l_d + l_h)} + \frac{b_s (h_s^{t+\Delta t} - h_s^t)}{\Delta t} = 0 , \quad (5.17)$$

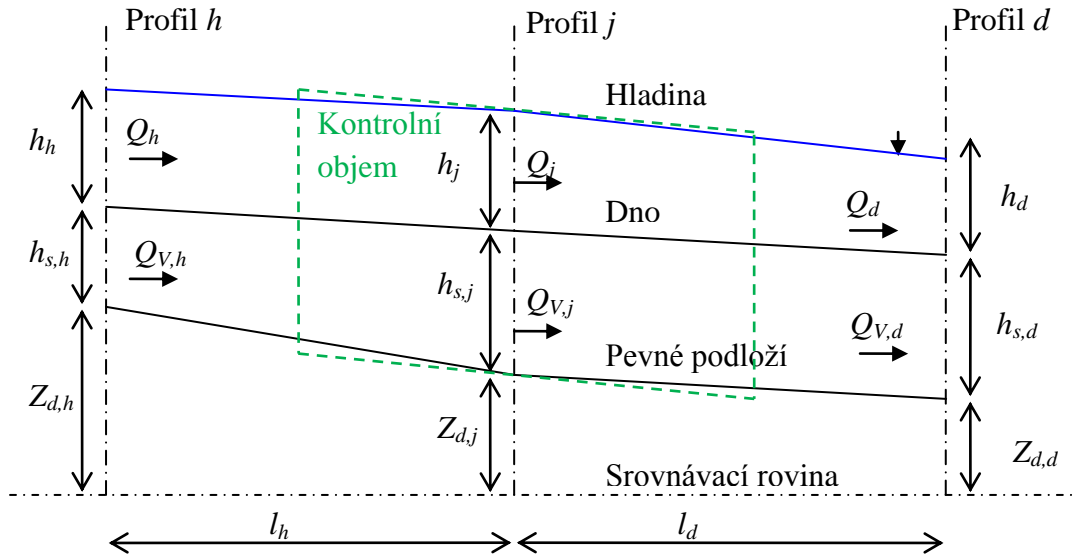
kde $Q_{V,d}$ je objemový průtok splavenin dolním profilem (objemový odtok splavenin), $Q_{V,h}$ je objemový průtok horním profilem (objemový přítok splavenin), l_d a l_h jsou vzdálenosti profilu od dolního a horního profilu, b_s je šířka aktivní části dna koryta, $h_s^{t+\Delta t}$ a h_s^t jsou hloubky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

Vyjádření hustoty zrna pod vodou je dáno rozdílem hustoty zrna ρ_z a hustoty vody ρ

$$\overline{\rho}_z = \rho_z - \rho . \quad (5.18)$$

Objemová hustota splavenin pod vodou je dána

$$\overline{\rho}_s = (1 - n_p) \cdot (\rho_s - \rho) . \quad (5.19)$$



Obr. 37 Schéma pro výpočet rovnice spojitosti splavenin

Pro výpočet transportu splavenin je třeba použít efektivní hloubku a efektivní šířku, která postihne tvar profilu tak, aby bylo možné použít vztahy odvozené pro kapacitu průtoku splavenin

$$h_e = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{p,i} \cdot S_i \cdot h_{p,i}^{2/3})}{\sum_{i=1}^N (S_i \cdot h_{p,i}^{2/3})}, \quad (5.20)$$

$$b_e = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i \cdot h_{p,i}^{2/3})}{h_e}. \quad (5.21)$$

V případě rovnoměrného ustáleného proudění bez zanášení a vymílání (vyrovnaný stav) je kapacita průtoku dána rovnicemi, které vznikly na základě určitých podmínek vymežujících oblast jejich použití. Pro štěrky se doporučuje rovnice Meyera-Petra a Müllera (MPM)

$$\left(\frac{k_c}{k_s}\right)^{3/2} \cdot \gamma \cdot R_d \cdot i = c_A \cdot (\gamma_z - \gamma) \cdot d_m + c_B \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\gamma_z - \gamma}{\gamma_z}\right)^{2/3} \cdot \bar{q}_{ms}^{-2/3}, \quad (5.22)$$

kde k_c je makrodrsnost dna a k_s je mikrodrsnost dna, γ je měrná tíha vody, γ_s je měrná tíha zrna, R_d je hydraulický poloměr aktivní části dna, i je sklon čáry energie, $c_A = 0,047$ je empiricky určený součinitel vyjadřující počátek pohybu zrn, d_m je medián rozměru zrn, $c_B = 0,25$ je empiricky určený součinitel vyjadřující průtok splavenin, g je tíhové zrychlení a \bar{q}_{ms} je specifický hmotnostní průtok vážený pod vodou. Specifický hmotnostní průtok se vypočítá z

$$q_s = \bar{q}_{ms} \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_z - \gamma}\right). \quad (5.23)$$

Vymílání a zanášení závisí na přítoku splavenin do kontrolního objemu a na schopnosti daného průtoku transportovat splaveniny profilem kontrolního objemu. Pokud je přítok splavenin větší, než transportní schopnost daného průtoku v profilu kontrolního objemu, dochází k zanášení v kontrolním objemu, pokud je menší, dochází k vymílání. Transport se řeší pro každou frakci zvlášť.

Vymílání a zanášení závisí i na třídění zrn v krycí vrstvě. Třídění zrn je řešeno na základě třívrstvého modelu – Exner 5, kde od shora první vrstvou je vrstva krycí, druhou vrstvou je vrstva podpovrchová a třetí vrstvou je vrstva neaktivní. Aktivní vrstvou v procesu je vrstva krycí a podpovrchová.

Vymílání a zanášení se realizuje fyzikálně jiným způsobem. Zanášení závisí především na usazovací rychlosti zrn, kdežto vymílání závisí na vzájemné interakci usazených zrn s proudem ve dně.

Pro bližší informace o funkcích programu je z důvodu rozsahu práce třeba nahlédnout do literatury, na jejímž základě modul vznikl (Gee a kol., 1991).

Model

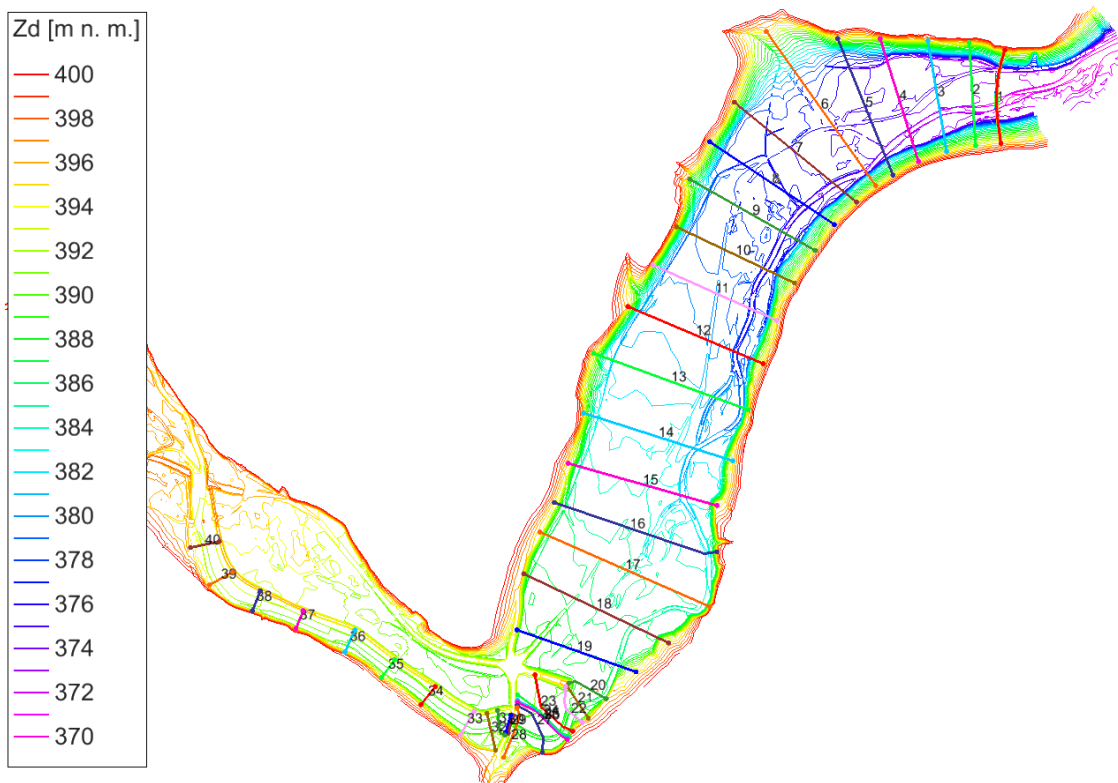
Rozsah modelu byl takový, aby postihnul dostatečně dlouhý úsek koryta nad UPDS, aby se neprojevil vliv horní okrajové podmínky. Horní okrajová podmínka byla aplikována v profilu pod obloukovým mostem pod rozdělovacím objektem obtokového koryta nádrže. Dosah modelu byl až do místa hráze VD Nové Heřminovy, aby bylo možné vyhodnotit dopad existence UPDS na zanášení nádrže a chování koryta pod UPDS (Obr. 38).

V profilu s horní okrajovou podmínkou byl zadán hydrogram průtoku a průtok splavenin odpovídající rovnoměrnému transportu daným profilem.

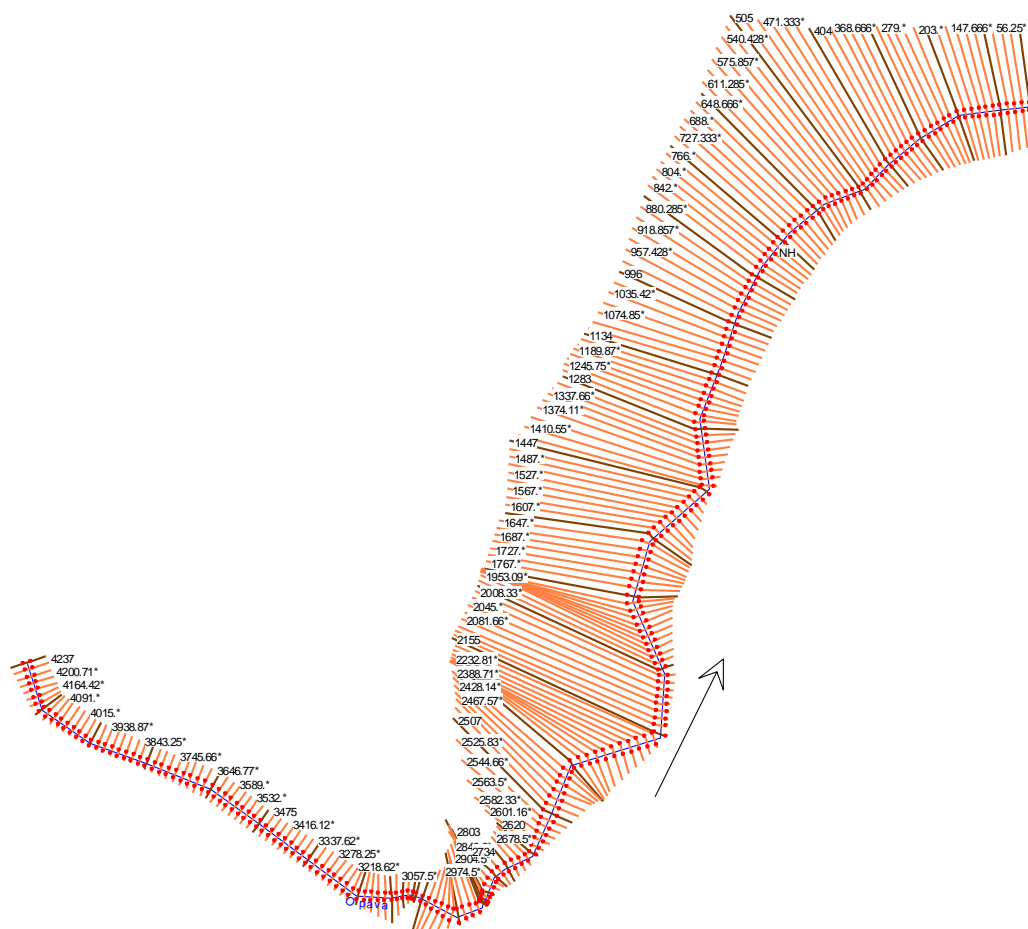
V profilu s dolní okrajovou podmínkou byla zadána časová změna úrovně hladiny a volný odtok splavenin z modelu.

Objekty byly nahrazeny příčnými profily, protože program neumožňuje provést výpočet s objekty. V místě spádového objektu bylo zabráněno vymílání. Zrnitost odpovídala náhradní zrnitostní křivce. Mezi volenými profily byly vloženy interpolované profily tak, aby jejich vzájemná vzdálenost byla do 20 m.

Simulace byla provedena pro povodňové vlny PV_5 , PV_{10} , PV_{20} , PV_{50} , PV_{100} (Obr. 7) a náhradní průměrnou roční povodňovou vlnu, kdy dnovou dlažbu poruší průtok Q_1 , označenou $NPRPV_{Q_1}$. $NPRPV_{Q_1}$ charakterizuje dlouhodobý průměrný roční hmotnostní průtok splavenin. Pro vytvoření požadovaného zastoupení zrn v krycí vrstvě (dnové dlažby) ze zrnitosti dané spodní vrstvou dna byla před každou povodňovou vlnu předřazena simulace PV_{20} .



Obr. 38 Volba příčných profilů modelu



Obr. 39 Interpolace příčných profilů modelu

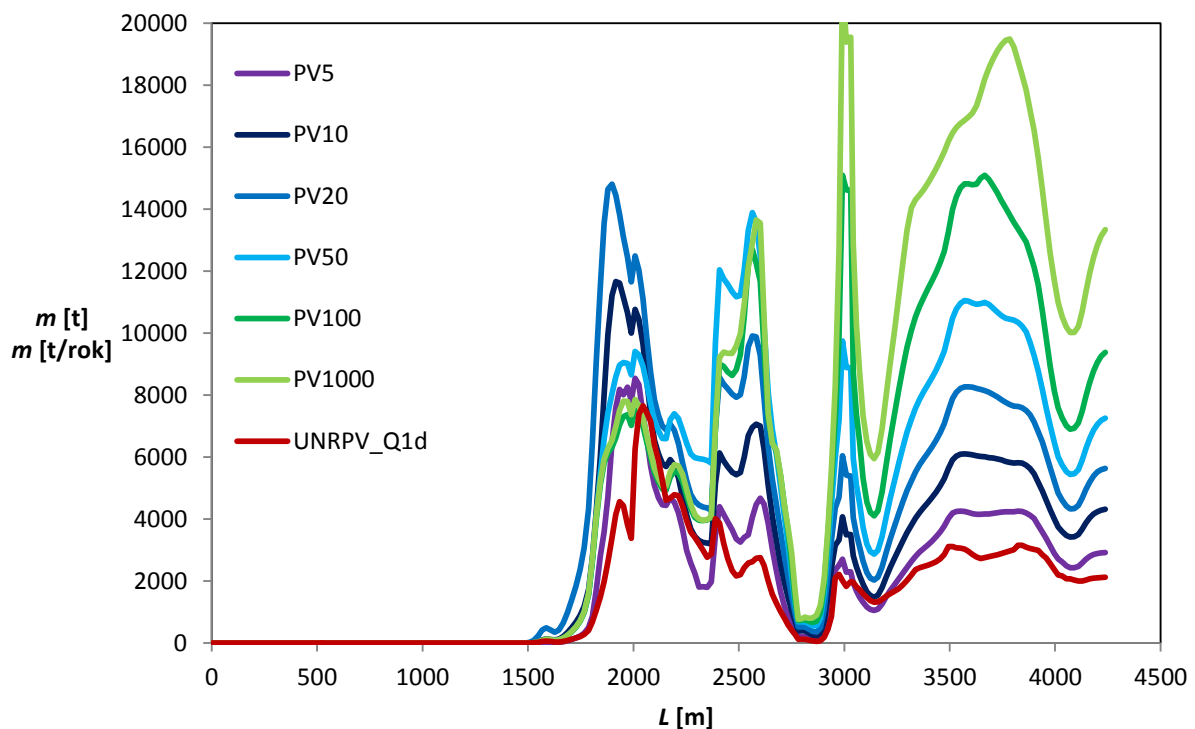
Výsledky

Výsledky simulace shrnuje Obr. 40, kde je zobrazena hmotnost proteklých splavenin po délce úseku za příslušný čas. U PV je to za dobu trvání PV, u upravené náhradní roční průtokové vlny (UNRPV) je to za rok. Rozkolísanost hodnot především v přírodním úseku toku je typická pro modely s transportem splavenin, na výsledky je třeba se dívat aproximačně.

Z výsledků vyplývá, že UPDS je navržený dobře, bude zachycovat veškeré dnové splaveniny použité na fyzikálním modelu při všech zkoušených PV.

Z porovnání hmotností na Obr. 40 a hmotností uvedených v Tab. 1 vyplývá, že hmotnost zachycených splavenin UPDS bude přibližně stejná, jako hmotnost splavenin potřebná do VP. Výsledky z profilu ve staničení $L = 3159$ m, který je horním profilem fyzikálního modelu, byly použity jako podklad pro dávkování na fyzikálním modelu.

Důležitým poznatkem je i významné vymílání dna pod spádovým objektem, kde je voda hladová a na relativně krátkém úseku se opět dosytí splaveninami na požadovanou koncentraci.



Obr. 40 Proteklá hmotnost splavenin po délce úseku toku za dobu trvání PV, u UNRPV za rok

5.5. Zhodnocení návrhu

Návrh byl vytvořen s ohledem na možnost efektivní těžby materiálu z co nejmenšího prostoru, kde jsou zrna do jisté míry roztríděna dle velikosti. Proto se předpokládá, že bude prováděna řízená těžba, kde bude stanovena zóna, ze které bude možné těžít materiál vhodný pro VP bez dalších dodatečných úprav.

Předběžný návrh však vychází z výpočtů, které jsou do jisté míry zjednodušením skutečnosti. Pro proudění vody byly použity 2D modely, které sice dokáží relativně spolehlivě určit úroveň hladiny, avšak neposkytnou žádné informace o příčném proudění v profilu. Pro proudění splavenin byl použit 1D numerický model zohledňující třídění zrn v krycí vrstvě, avšak třídění zrn po příčném profilu stanovit nedokáže.

Celou řadu dějů stále nejsme schopni numericky uspokojivě řešit. Mezi tyto děje se u 2D a 3D numerických modelů stále řadí transport splavenin s deformací dna zohledňující třídění zrn v krycí vrstvě při proudění o volné hladině a relativně malé hloubce. Tyto modely jsou velmi nestabilní a prakticky nejsme schopni poskytnout pro jejich řešení dostatečné množství dostatečně kvalitních vstupních dat. Z uvedeného důvodu byl doporučen a také byl zhotoven fyzikální model, který dává v dané oblasti významně věrohodnější výsledky, nežli numerické modely. Je třeba zdůraznit, že ani fyzikální model nedokáže simulovat proudění na prototypu úplně, jak bude uvedeno níže v textu.

6. Modelová podobnost

Podobnost dvou jevů se dělí dle podobnosti jednotlivých charakteristik jevů. V hydrotechnice se používá podobnost geometrická, kinematická, dynamická a mechanická (Čábelka a Gabriel, 1987). Požadavkem je splnit takovou podobnost, která umožňuje splnit zadané cíle, tedy v případě proudění vody a splavenin splnit podobnost mechanickou.

6.1. Mechanická podobnost úplná

Pro odvození podobnosti (kritérií podobnosti) se používají nejčastěji dvě metody. První je rozměrová analýza a druhá je odvození na základě matematického popisu jevu (nejčastěji systém diferenciálních rovnic s podmínkami jednoznačnosti) (Čábelka a Novák, 1964).

Pro odvození podobnosti vzájemného pohybu zrna a kapaliny byla použita Reyleighova metoda rozměrové analýzy.

Fyzikální veličiny, které ovlivňují vzájemný pohyb zrna a kapaliny, lze napsat v podobě rovnice vyjadřující sílu (Čábelka a Gabriel, 1987)

$$F = c_0 \mu^{c_1} \rho^{c_2} K^{c_3} \sigma^{c_4} v^{c_5} b^{c_6} l^{c_7} h^{c_8} d^{c_9} \rho_s^{c_{10}} g^{c_{11}}. \quad (6.1)$$

kde $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}$ jsou neznámé součinitele.

Rovnici lze napsat pomocí základních rozměrů L (délky), M (hmotnosti), T (času)

$$MLT^{-2} = L^{-c_1} M^{c_1} T^{-c_1} L^{-3c_2} M^{c_2} L^{-c_3} M^{c_3} T^{-2c_3} M^{c_4} T^{-2c_4} L^{c_5} T^{-c_5} L^{c_6} L^{c_7} L^{c_8} L^{c_9} L^{-3c_{10}} M^{c_{10}} L^{c_{11}} T^{-2c_{11}}. \quad (6.2)$$

Aby rovnice byla rozměrově homogenní, musí platit, že součty exponentů na obou stranách rovnice jsou totožné:

$$\text{pro rozměr L: } 1 = -c_1 - 3c_2 - c_3 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 - 3c_{10} + c_{11},$$

$$\text{pro rozměr M: } 1 = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_{10},$$

$$\text{pro rozměr T: } -2 = -c_1 - 2c_3 - 2c_4 - c_5 - 2c_{11}.$$

Tyto 3 rovnice obsahují 11 neznámých, proto jsou neřešitelné. Aby se systém rovnic dal vyřešit je třeba prostřednictvím zbylých 8 neznámých vyjádřit 3 známé. S výhodou se pro výpočet volí ty neznámé, které jsou v rovnici (6.2) exponenty veličin obsahující sílu F ,

$$F = ma = \rho l^3 \frac{l}{t^2} = \rho l^2 \frac{l^2}{t^2} = \rho l^2 v^2, \quad (6.3)$$

tedy ρ, l, v , které mají exponenty c_2, c_7, c_5 .

Potom rovnice přejdou do tvaru

$$\text{pro rozměr L: } c_7 = +1 + c_1 + 3c_2 + c_3 - c_5 - c_6 - c_8 - c_9 + 3c_{10} - c_{11},$$

$$\text{pro rozměr M: } c_2 = 1 - c_1 - c_3 - c_4 - c_{10},$$

$$\text{pro rozměr T: } c_5 = 2 - c_1 - 2c_3 - 2c_4 - 2c_{11}.$$

Soustava se řeší pro rozměr L dosazením druhé a třetí rovnice do první, tedy:

$$c_7 = +1 + c_1 + 3(1 - c_1 - c_3 - c_4 - c_{10}) + c_3 - (2 - c_1 - 2c_3 - 2c_4 - 2c_{11}) - c_6 - c_8 - c_9 + 3c_{10} - c_{11}. \quad (6.4)$$

Seřazením členů má tvar

$$c_7 = +1 + 3 - 2 + c_1 - 3c_1 + c_1 - 3c_3 + c_3 + 2c_3 - 3c_4 + 2c_4 - c_6 - c_8 - c_9 - 3c_{10} + 3c_{10} + 2c_{11} - c_{11} \quad (6.5)$$

a úpravou pro rozměr L a přepisem pro ostatní rozměry soustavy jsou

$$\text{pro rozměr L: } c_7 = +2 - c_1 - c_4 - c_6 - c_8 - c_9 + c_{11},$$

$$\text{pro rozměr M: } c_2 = 1 - c_1 - c_3 - c_4 - c_{10},$$

$$\text{pro rozměr T: } c_5 = 2 - c_1 - 2c_3 - 2c_4 - 2c_{11}.$$

Dosazením exponentů do rovnice (6.1) se získá

$$F = c_0 \mu^{c_1} \rho^1 \rho^{-c_1} \rho^{-c_3} \rho^{-c_4} \rho^{-c_{10}} K^{c_3} \sigma^{c_4} v^2 v^{-c_1} v^{-2c_3} v^{-2c_4} v^{-2c_{11}} b^{c_6} l^2 l^{-c_1} l^{-c_4} l^{-c_6} l^{-c_8} l^{-c_9} l^{c_{11}} h^{c_8} d^{c_9} \rho_s^{c_{10}} g^{c_{11}} \quad (6.6)$$

a sloučením členů se stejným exponentem

$$F = \hat{c}_0 \rho l^2 v^2 \left(\frac{\mu}{\rho l v} \right)^{c_1} \left(\frac{K}{\rho v^2} \right)^{c_3} \left(\frac{\sigma}{\rho l v^2} \right)^{c_4} \left(\frac{b}{l} \right)^{c_6} \left(\frac{h}{l} \right)^{c_8} \left(\frac{d}{l} \right)^{c_9} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^{c_{10}} \left(\frac{gl}{v^2} \right)^{c_{11}}, \quad (6.7)$$

nebo ve tvaru

$$\frac{F}{\rho l^2 v^2} = f \left(\frac{gl}{v^2}, \frac{\mu}{\rho l v}, \frac{K}{\rho v^2}, \frac{\sigma}{\rho l v^2}, \frac{b}{l}, \frac{h}{l}, \frac{d}{l}, \frac{\rho_s}{\rho} \right), \quad (6.8)$$

případně dle označení jednotlivých kritérií podobnosti

$$Ne = f \left(Fr, Re, Ca, We, \frac{b}{l}, \frac{h}{l}, \frac{d}{l}, \frac{\rho_s}{\rho} \right). \quad (6.9)$$

Pro splnění mechanické podobnosti je nutná platnost rovnice (6.8) nebo identicky rovnice (6.9), proto všechny členy poměrů veličin – měřítko podobnosti v rovnici (6.10) musí být rovny 1

$$M_{Fr} = M_{Re} = M_{Ca} = M_{We} = \frac{M_b}{M_l} = \frac{M_h}{M_l} = \frac{M_d}{M_l} = \frac{M_{\rho_s}}{M_{\rho}} = 1. \quad (6.10)$$

Z toho plyne závěr, že pro splnění mechanické podobnosti vzájemného působení zrna a kapaliny je třeba splnit podobnost dynamickou, podobnost geometrickou a podobnost hustot.

6.2. Mechanická podobnost přibližná

Pro splnění mechanické podobnosti dvou hydrodynamických jevů je nutné splnit všechny rovnice (6.10) – podmínky mechanické podobnosti.

Všechny tyto podmínky určující mechanickou podobnost se obvykle splnit nedají, protože prakticky nelze najít dvě tekutiny, které by uvedené splňovaly. Proto se místo úplné mechanické podobnosti používá přibližná mechanická podobnost, která využívá principu dominantní síly.

6.2.1. Princip dominantní síly

Princip dominantní síly je založen na předpokladu, že děj je určen dominantně jedinou silou (určující síla) a ostatní síly jsou vůči ní zanedbatelně malé. Tyto zanedbatelně malé síly mají zanedbatelně malý účinek na daný děj.

Tím, že jsou některé síly zanedbány, již nejsou naplněny podmínky úplné mechanické podobnosti, proto se jedná pouze o podobnost přibližnou, ale na praktickou použitelnost modelování děje, to nemá vliv.

Přibližná mechanická podobnost umožňuje použití stejné tekutiny na modelu i prototypu (dána je hustotou ρ a kinematickou viskozitou ν) a stejného silového pole objemových sil (daného tíhovým zrychlením g). Jinak řečeno proudění vody na prototypu lze modelovat pomocí proudění těžší vody na modelu a navíc v běžných laboratorních, či polních podmínkách.

Z principu dominance síly vyplývá, že přibližná mechanická podobnost děje je omezena oblastí její platnosti. Hranice platnosti určují mezní podmínky přibližné mechanické podobnosti, zkráceně mezní podmínky podobnosti.

Vzájemné působení vody a tuhého tělesa dominantně určují dvě síly, jedná se o sílu tíhovou a sílu třecí, která je v rovnici (6.10) dána Froudovým a Reynoldsovým kritériem. Ostatní síly, síla povrchového napětí a síla stlačitelnosti, lze zanedbat v případě, že se dodrží podmínky podobnosti, pak rovnice přibližné mechanické podobnosti nabude tvaru

$$M_{Fr} = M_{Re} = \frac{M_b}{M_l} = \frac{M_h}{M_l} = \frac{M_d}{M_l} = \frac{M_{\rho_s}}{M_{\rho}} = 1. \quad (6.11)$$

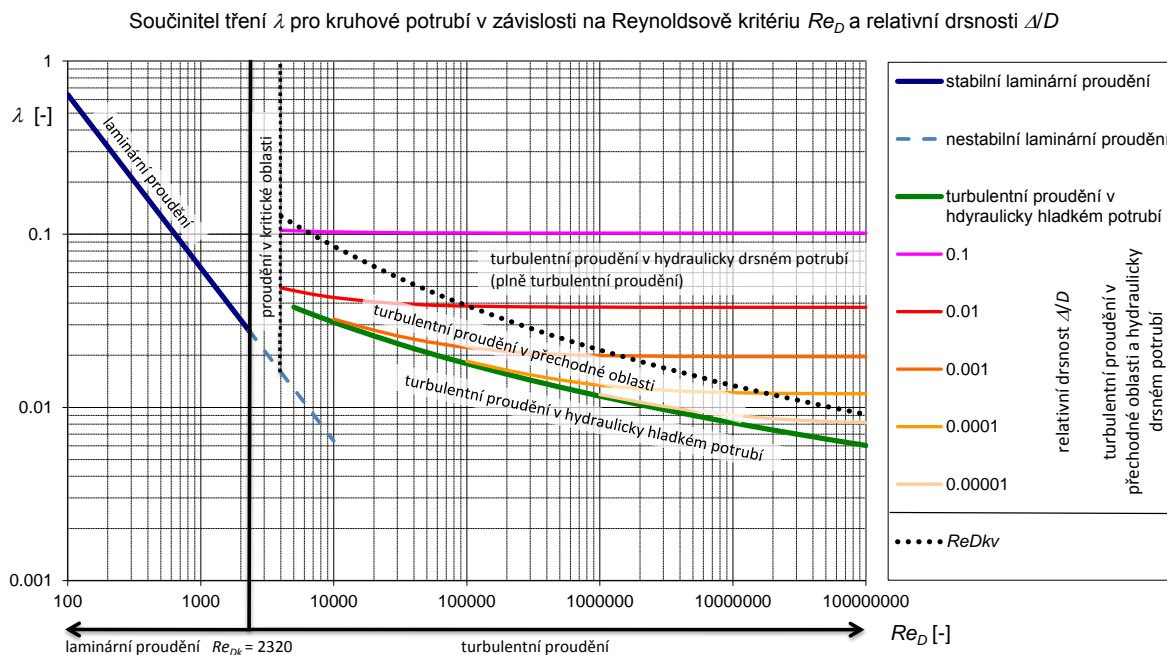
6.2.2. Automodelová oblast proudění

Při dodržení geometrické podobnosti nabývají některá kritéria mechanické podobnosti v určitých oblastech proudění stálou hodnotu, jsou konstantami. V těchto tzv. „automodelových“ oblastech proudění jimi podobnost určena není a tato kritéria lze zanedbat. Například při plně turbulentním proudění vody v kruhovém potrubí průměru D je součinitel tření λ nezávislý na hodnotě Reynoldsova kritéria Re_D

$$Re_D = \frac{vD}{\nu}, \quad (6.12)$$

což dokumentuje graf na Obr. 41.

Proudění vody v přirozeném korytě s volnou hladinou se chová obdobně, jako tlakové proudění vody v kruhovém potrubí. Taktéž existuje automodelová oblast, avšak vztažným rozměrem je zde hydraulický poloměr R namísto průměru potrubí D .



Obr. 41 Moodyho graf pro kruhové potrubí o průměru D

Pro proudění s volnou hladinou v obecném průtočném průřezu se graf mění dle vztahů

$$Re = \frac{Re_D}{4}, \quad (6.13)$$

$$R = \frac{D}{4}, \quad (6.14)$$

$$Re = \frac{vR}{\nu}. \quad (6.15)$$

Pro hranici mezi turbulentním prouděním v přechodné oblasti a v hydraulicky drsném korytě se použije vztah

$$Re_{kv} = 63 \left(4 \log \frac{R}{\Delta} + 4,25 \right) \frac{R}{\Delta}, \quad (6.16)$$

kde Δ je hydraulická drsnost.

6.2.3. Podobnost pohybu splavenin

V rovnici (6.11) je obecné konstatování podobnosti pro vzájemný pohyb kapaliny a zrna, zrn v kapalině však může být více a vzájemně se mohou ovlivňovat, proto je třeba provést hlubší rozbor podobnosti proudění splavenin.

Pohyb zrn kulového tvaru o průměru d , hustotě ρ_s , usazovací rychlosti w_s bez jejich vzájemné soudržnosti a při ustáleném rovnoměrném proudění kapaliny s kinematickou viskozitou ν , hustotou ρ , hloubkou h v širokém korytě $R \approx h$, při sklonu (dna, hladiny a čáry energie) i vyvolaného tíhovým zrychlením g lze vyjádřit funkcí (Ettema, 2000)

$$f\{\nu, d, h, i, g, \rho, \rho_s, w_s\} = 0. \quad (6.17)$$

Funkční vztah (6.17) je vhodné převést na tvar, kterým lze lépe postihnout měřené, respektive určované veličiny. Sklon i se vyjádří pomocí třecí rychlosti

$$u_* = (ghi)^{0,5}, \quad (6.18)$$

tíhové zrychlení g se vztáhne k rozdílu hustot $g(\rho_s - \rho)$, a tak se získá funkční vztah ve tvaru $f\{v, d, h, u_*, g(\rho_s - \rho), \rho, \rho_s, w_s\} = 0$. (6.19)

Ve funkci (6.19) je 8 nezávislých proměnných, které lze vyjádřit 3 rozměry, pak se rozměrovou analýzou odvodí 5 bezrozměrných kritérií

$$\Phi\left\{\frac{u_* d}{v}, \frac{h}{d}, \frac{u_*^2}{gd} \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{w_s}{u_*}\right\} = 0. \quad (6.20)$$

První člen ve funkci (6.20) je třetí Reynoldsovo kritérium zrna Re_{*d} (splaveninové Reynoldsovo kritérium)

$$\frac{u_* d}{v} = Re_{*d}, \quad (6.21)$$

vyjadřuje vztah mezi velikostí zrna d a tloušťkou laminární podvrstvy proudu.

Druhý člen je relativní hloubka, vyjadřuje bezrozměrnou hloubku určenou velikostí zrna (geometrické kritérium).

Třetí člen je Shieldsovo kritérium θ (kritérium mobility zrna, intenzita proudu, hustotně vyjádřené třetí Froudovo kritérium zrna, bezrozměrné třetí napětí atd.)

$$\frac{u_*^2}{gd} \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)} = \frac{Fr_{*d}}{s-1} = \theta, \quad (6.22)$$

určuje pohyb zrn na dně, a to jak jeho počátek, tak jeho intenzitu. Obvykle se třetí rychlost vyjadřuje pomocí třetího napětí

$$u_* = \left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{0,5}, \quad (6.23)$$

pak rovnice (6.22) nabude tvaru

$$\theta = \frac{\tau}{gd(\rho_s - \rho)} \quad (6.24)$$

a pro počátek pohybu

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{gd(\rho_s - \rho)}. \quad (6.25)$$

Čtvrtý člen vyjadřuje relativní hustotu

$$\frac{\rho_s}{\rho} = s. \quad (6.26)$$

Pátý člen je část Rousova kritéria Ro

$$\frac{w_s}{u_*} = \kappa Ro, \quad (6.27)$$

κ je Karmánova konstanta. Kritérium určuje chování zrn v proudu, jejich poměrné zastoupení (splaveniny a plaveniny) a jejich koncentraci po hloubce. Když hodnota Rousova kritéria

příslušného zrna je $Ro > 2,5$, pak se jedná o dnovou splaveninu, když je $Ro < 1,2$ jedná se o plaveninu. Chování zrna v oblasti ohraničenou oběma mezemi $1,2 < Ro < 2,5$ určuje významně i míra turbulence.

Výsledný funkční vztah je možné zapsat ve tvaru

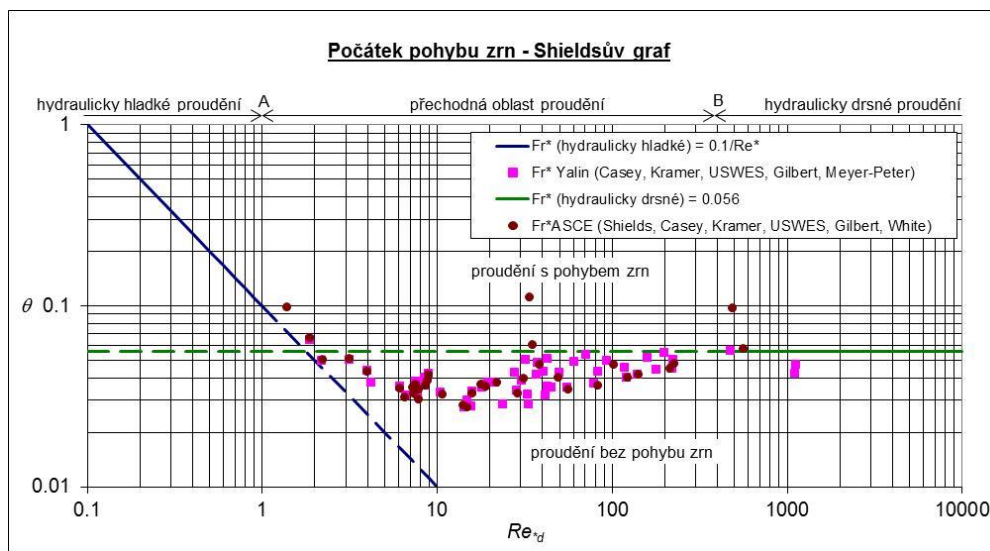
$$\Phi\left\{Re_{*d}, \frac{h}{d}, \theta, s, Ro\right\} = 0. \quad (6.28)$$

Uvedená funkce vyjadřuje podmínky podobnosti pohybu zrn kulového tvaru v rovnoměrném ustáleném širokém proudu $R \approx h$.

Podobnost počátku pohybu zrn

Počátek pohybu zrn usazených na dně bez soudržnosti je určen vzájemným poměrem mezi třecí silou F_t a tíhovou silou F_g . Tedy jej určuje pouze vzájemný vztah třecího Reynoldsova kritéria zrna Re_{*d} a třecího Froudova kritéria zrna Fr_{*d} při daném poměru hustot s (předpokládá se geometrická podobnost).

S využitím Shieldsova kritéria θ , obsahujícího obě výše uvedená kritéria, je lze vztáhnou přímo mezi sebou. Uvedené dokumentuje Shieldsův graf (Obr. 42).



Obr. 42 Shieldsův graf

V Shieldsově kritériu a třecím Reynoldsově kritériu zrna se opakují veličiny d , u_* a ρ , tyto veličiny je možné vyjádřit pomocí substituce jinými veličinami. Zvláštním případem je eliminace třecí rychlosti u_* (vyskytuje se v obou členech, což způsobuje mnohé komplikace ve vyjádření) (García, 2008). Za třecí rychlost v prvním členu (6.21) se dosadí substituční člen třecí rychlosti v třetím členu (6.22) a umocní se

$$\frac{gd^3}{v^2} \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} = \frac{gd^3}{v^2} (s - 1) = \frac{Re_{*d}^2}{\theta} = \mathcal{E}. \quad (6.29)$$

\mathcal{E} je pak poměr mezi umocněným třecím Reynoldsovým kritériem zrna Re_{*d} a Shieldsovým kritériem θ . V závislosti na třecím Reynoldsově kritériu zrna Re_{*d} udává počátek pohybu zrn

usazenin na dně, ze kterých se stanou splaveniny (Parkerův graf). Ξ charakterizuje podmínku podobnosti pohybu zrn vůči relativní hustotě a viskozitě proudu, výhodou je, že nezáleží na vlastnostech proudu.

Z grafu vyplývá, že v případě turbulentního proudění vody v hydraulicky drsném korytě je počátek pohybu zrn, vyjádřený Shieldsovým kritériem θ , nezávislý na hodnotě Reynoldsova kritéria zrna Re_{*d} .

Podobnost proudění splavenin

Při odvození podobnosti proudění splavenin se vychází ze stejných veličin, které byly uvedeny ve funkčním zápisu (6.17). Usazovací rychlost w_s lze z vyjádření odstranit, protože dnové splaveniny se pohybují pouze v blízkosti dna valením, sunutím či saltací a tudíž nemá bližší význam pro popis proudění (i když se někdy v podobě Rousova kritéria používá pro vyjádření počátku pohybu). Ke zbylým veličinám se přiřadí i veličina popisující množství transportovaných splavenin v podobě specifického hmotnostního průtoku splavenin q_{ms}

$$f\{v, d, h, i, g, \rho, \rho_s, q_{ms}\} = 0. \quad (6.30)$$

Opět s využitím substituce (6.18) se rozměrovou analýzou vyjádří 5 bezrozměrových kritérií, která ve formě funkčního zápisu jsou

$$\Phi\left\{\frac{u_* d}{v}, \frac{h}{d}, \frac{u_*^2}{gd}, \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{q_{ms}}{\rho u_* d}\right\} = 0 \quad (6.31)$$

nebo

$$\Phi\left\{Re_{*d}, \frac{h}{d}, \theta, s, \frac{q_{ms}}{\rho u_* d}\right\} = 0. \quad (6.32)$$

Novým kritériem, oproti vztahu (6.28), je poslední člen, který naplňuje podobnost proudění splavenin.

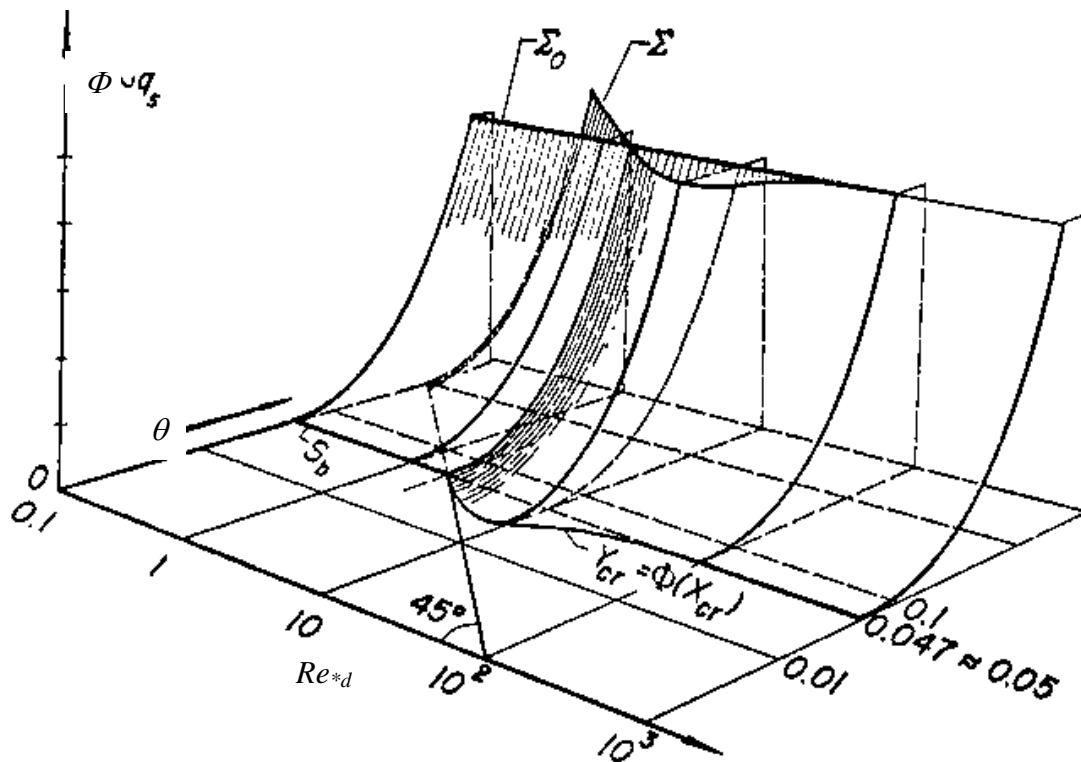
Předpokládá-li se geometrická podobnost, lze vztáhnout třetí až pátý člen do jednoho kritéria

$$\frac{q_{ms}}{\rho d u_*} s(\theta)^{0.5} = \frac{q_{ms}}{\rho d u_*} \frac{\rho}{\rho_s} \left(\frac{u_*^2}{gd} \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)}\right)^{0.5} = \frac{q_{ms}}{\rho_s [gd^3(s-1)]^{0.5}} = \frac{q_s}{[gd^3(s-1)]^{0.5}} = \frac{q_s}{v(\Xi)^{0.5}} = \Phi, \quad (6.33)$$

kde Φ je intenzita proudění splavenin (bezrozměrný tok splavenin). Tímto kritériem se obecně vyjadřuje podobnost množství pohybujících se splavenin.

Závislost Φ na Shieldsovu kritériu θ a třecím Reynoldsovu kritériu zrna Re_{*d} ukazuje Yalinův graf Obr. 43.

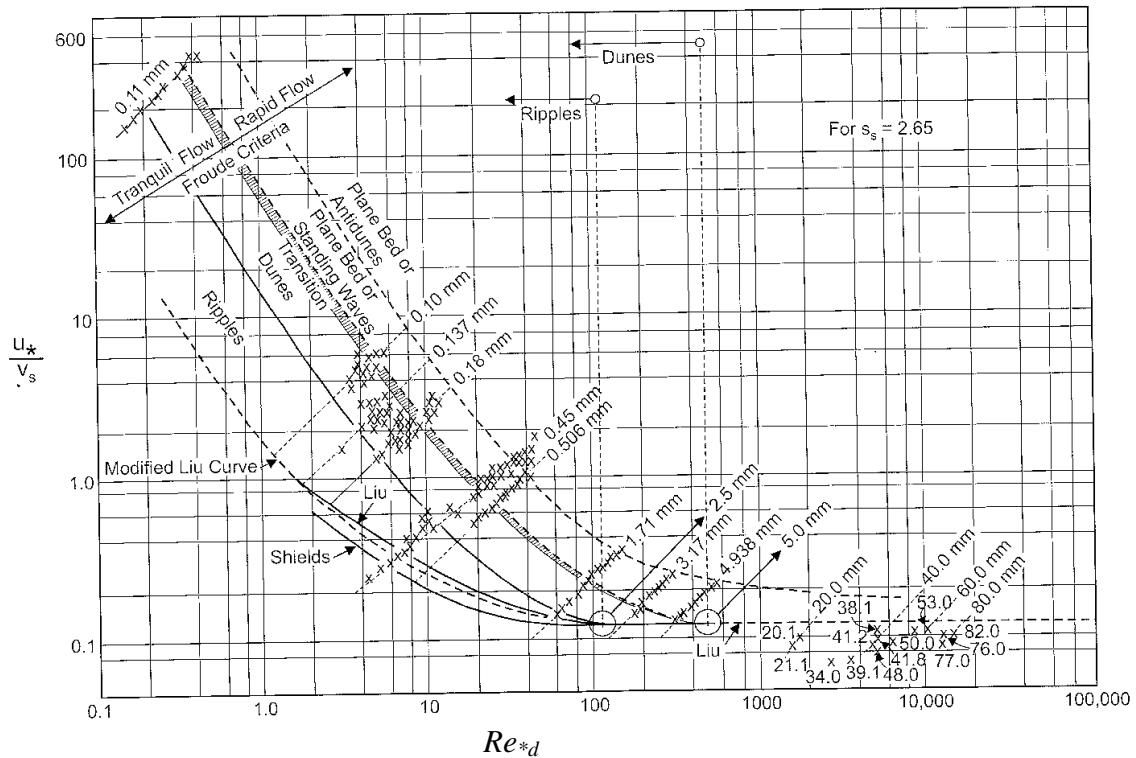
V případě turbulentního proudění v hydraulicky drsném korytě je hodnota Φ nezávislá na hodnotě třecího Reynoldsova kritéria zrna Re_{*d} .



Obr. 43 Yalinův graf (Yalin, 1972)

Podobnost dnových útvarů

Podobnost vzniku dnových útvarů je určena poměrem mezi třecí rychlostí u_* a usazovací rychlostí w_s . Jinak řečeno je určena hodnotou Rousova kritéria Ro ve vztahu k třecímu Reynoldsovu kritériu zrna Re_{*d} . Automodelové oblasti jsou dány nezávislostí na Reynoldsově kritériu dle Simonsova a Richardsova grafu na Obr. 44.



Obr. 44 Simonsův a Richardsonův graf (García, 2008)

6.2.4. Meze podobnosti a přijatá zjednodušení

Pro splnění principu dominantní síly a automodelovosti ve vztahu k Reynoldsovu kritériu je třeba dodržet určité podmínky, za kterých uvedené platí. Tyto podmínky se nazývají meze podobnosti (Čábelka a Gabriel, 1987).

Pro případ proudění vody je třeba splnit, aby:

- Byl dodržen stejný režim proudění (dodrženo automaticky).
- Proudění bylo plně turbulentní $Re > Re_{kv}$.
- Shodnost součinitele tření λ , vychází ze shodnosti relativní drsnosti Δ/R .
- Hloubka vody na modelu byla všude větší než minimální přípustná hloubka $h > h_{min} = 0,015$ m, aby se neprojevil vliv povrchového napětí daného Weberovým kritériem We .
- Rychlost proudu byla větší než 0,23 m/s, aby gravitační vlny vzniklé na hladině nebyly ovlivněny povrchovým napětím, opět dáno Weberovým kritériem.

Pro případ proudění dnových splavenin je dále třeba splnit, aby:

- Proudění bylo v hydraulicky drsném korytě $Re*d > Re*d_{min} = 400$ (70).
- Splaveniny nepřecházely do suspenze $Ro > Ro_{min} = 2,5$.
- Neprojevil se vliv soudržnosti $d > d_{min} = 0,5$ mm.
- Vznikaly stejné dnové útvary $Re*d > Re*d_{min}$.
- Zrna měla stejný tvar (poměr mezi rozměry a, b, c) a zaoblenost.

7. Fyzikální model

Základním požadavkem na fyzikální model bylo, aby co nejdříve simuloval proudění vody a dnových splavenin v UPDS.

7.1. Stanovení měřítka modelu a jeho parametrů

7.1.1. Měřítka modelu

Z požadavků na splnění mezních podmínek uvedených v předešlé kapitole bylo určeno délkové měřítka modelu $M_l = 30$. Model byl navržen prostorově nezkreslený, tedy geometricky podobný (vztaženo k souřadnému systému x, y, z)

$$M_x = M_y = M_z = M_l = 30. \quad (7.1)$$

Modelováno bylo dle Froudova kritéria

$$Fr = \frac{v}{(gl)^{1/2}}, \quad (7.2)$$

tedy na základě principu dominantní síly, kterou je síla tíhová F_g .

V případě použití stejné kapaliny (na modelu i na prototypu $\rho = \text{konst.}$, $\nu = \text{konst.}$), stejné hustoty zrn ρ_s a při působení stejného zrychlení g , byly pomocí délkového měřítka M_l určeny ostatní uvažované veličiny dle Tab. 2. Přepočítání z prototypu na model je pak možné provést dle vztahu

$$X_p = M_x X_m. \quad (7.3)$$

Tab. 2 Vyjádření měřítka vybraných veličin M_x měřítkem délky dle Froudova kritéria

Veličina	Symbol	Rozměr	Měřítka	Hodnota
Délka	l	L	M_l	30
Plocha	S	L^2	M_l^2	900
Objem	V	L^3	M_l^3	27000
Čas	t	T	$M_l^{1/2}$	5,48
Rychlost	v	LT^{-1}	$M_l^{1/2}$	5,48
Zrychlení	a	LT^{-2}	1	1
Průtok	Q	L^3T^{-1}	$M_l^{5/2}$	4930
Specifický průtok	q	L^2T^{-1}	$M_l^{3/2}$	164
Hmotnost	m	M	M_l^3	27000
Síla	F	MLT^{-2}	M_l^3	27000
Tlak	p	$ML^{-1}T^{-2}$	M_l	30
Energie	E	ML^2T^{-2}	M_l^4	810000

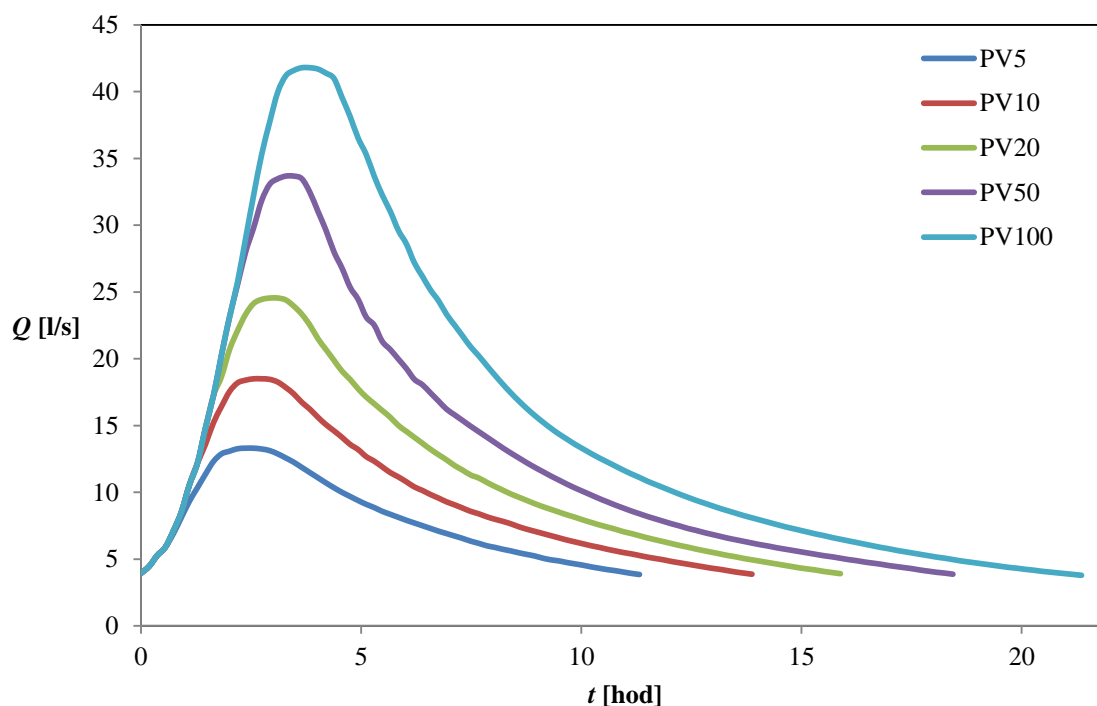
7.1.2. Průtoky

Modelově podobné průtoky jsou dány měřítkem modelu a mezními podmínkami podobnosti, pro kynetu koryta lze použít průtoky od Q_1 . Všechny významné průtoky použité při výzkumu jsou uvedeny v Tab. 3. Průtoky menší než Q_1 sloužily k určení počátku pohybu jemných frakcí zrn.

Tab. 3 Průtoky

N-letý průtok	Prototyp [m^3/s]	Model [l/s]
Q_1	15,0	3,04
Q_5	65,5	13,3
Q_{10}	91,2	18,5
Q_{20}	121	24,6
Q_{50}	166	33,7
Q_{100}	206	41,8

Dle modelové podobnosti byly upraveny i povodňové vlny PV_5 , PV_{10} , PV_{20} , PV_{50} , PV_{100} . PV použité na modelu zobrazuje Obr. 45.



Obr. 45 PV použité na modelu

7.1.3. Zrnitost materiálu v modelu

Zrnitost materiálu použitého v modelu se opírala o ucelený soupis odběrů a vyhodnocených zrnitostí dna provedený Laboratoří vodohospodářského výzkumu ÚVST, FAST, VUT v Brně (Veselý a kol., 2002), který zahrnuje všechny dokumentované odběry do roku 2002. Na základě těchto a novějších dat vznikla studie Posouzení splaveninového režimu a prognóza

(Zachoval a kol., 2009) zaměřená pouze na část Opavy, kde byla stanovena náhradní zrnitostní křivka krycí vrstvy dna, která podává statisticky střední informace o zrnitosti dna do roku 2008.

Jelikož však došlo nad obcí Nové Heřminovy k poměrně významné změně v trasování koryta s jeho dynamickým vývojem i při relativně nízkých průtocích, bylo třeba stanovit, jestli nedošlo ke změně zrnitostní skladby dna po roce 2008. Proto bylo třeba provést odběry dna za současného stavu a porovnat je s dřívějšími.

Odběry byly provedeny v listopadu v roce 2015. Jednalo se celkem o čtyři místa odběrů. Odběr byl proveden vždy z plochy 1 m² s hmotností nutnou k vyhodnocení reprezentativních zrnitostních křivek. Tři místa odběrů byla zvolena v lokalitě UPDS a jedno nad obcí Nové Heřminovy v místě soutoku původního a nově vytvořeného koryta. Odebírány byly jak vzorky krycí vrstvy dna (čtyři vzorky), tak spodní vrstva (1 vzorek). Lokality odběrů zobrazuje Obr. 46.

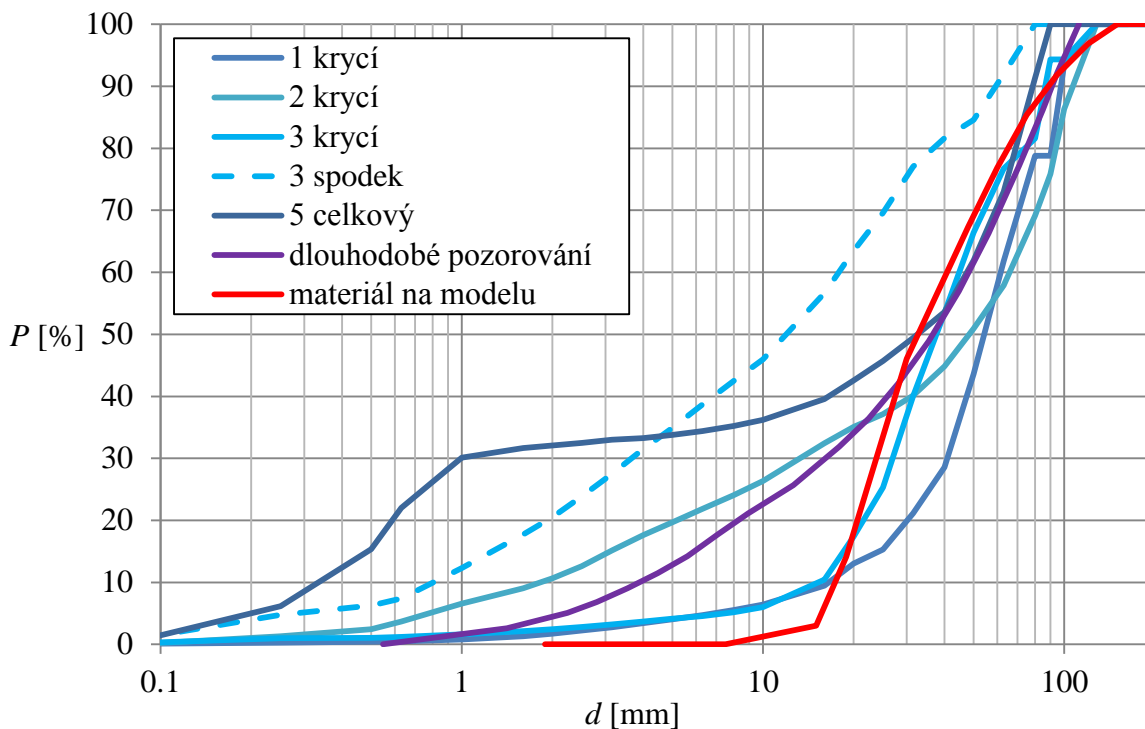
Vzorek 1, 2 a 5 byly odebrány z levostranné části dna, vzorek 3 byl odebrán z pravostranné části dna.



Obr. 46 Místa nově odebraných vzorků dna

Vyhodnocené zrnitostní křivky sítovým rozbořem na normové sadě sít zobrazuje Obr. 47. Rovněž je zde uvedena náhradní zrnitostní křivka krycí vrstvy dna reprezentující aproximaci zrnitosti z dlouhodobého pozorování po délce toku.

Zrnitost použitá na modelu musela být upravena tak, aby se při její transformaci na rozměr modelu neprojevil vliv soudržnosti (Čábelka a Novák, 1964). Soudržnost se projevuje u materiálů obsahujících zrna menší než cca 0,5 mm, proto musela být z modelu odstraněna. Důležitou roli při vymezení hranice v podobě rozměru minimálního zrna hraje i zastoupení jemnozrné frakce v celku (Ettema, 2000), avšak vlivem třídění zrn v UPDS nebylo možné použít minimální doporučené zastoupení menších zrn.



Obr. 47 Zrnitostní křivky nových odběrů, náhradní zrnitostní křivka krycí vrstvy dna (dlouhodobé pozorování)

7.2. Projekt

Na základě předběžného návrhu specifikovaného v kapitole Návrh usazovacího prostoru splavenin a po měřítkové úpravě dle kapitoly Stanovení měřítko modelu a jeho parametrů byl proveden projekt modelu.

Projekt byl dokumentován digitálním modelem terénu, situací, podélným řezem a příčnými řezy. Rozsahy řezů dokumentuje Obr. 48.

Pro projekt byl použit samostatný souřadný systém se srovnávací rovinou 384,00 m n. m. Model byl navržen tak, aby části, které nebudou atakovány vodou (při všech průtocích zkoušených na modelu), byly zhotoveny jako pevné a umožňovaly chůzi po modelu. Tyto části byly určeny profily vyhotovenými z pozinkovaných plechů a prostor mezi nimi byl vyplněn cihlami. Horní část byla navržena jako betonová skořepina umožňující pohyb člověka po modelu. Pro vizuální ztvárnění povrchu modelu byl navržen barevný nátěr. Části, u kterých se předpokládalo, že budou atakovány vodou a případně se budou měnit, byly navrženy ze sypkého materiálu (písek, štěrk), případně z cihel.

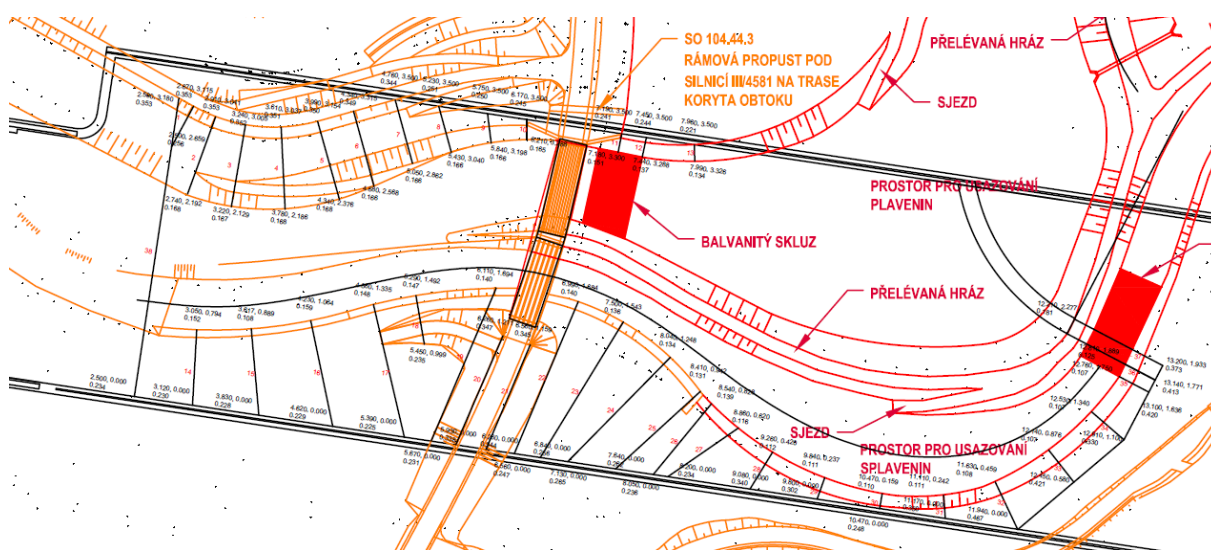
U pevné části modelu nebylo navrženo odvodnění, u pohyblivé části byl navržen odvodňovací systém v podobě dvou perforovaných potrubí obsypaných štěrkem.

Mostovka a podpěrné pilíře mostu na Milotice byly navrženy z PVC.

Opevňovací prvky byly navrženy ze štěrku modelově odpovídající zrnitosti, jednalo se o frakci 0,011 mm až 0,016 mm (prototyp 0,33 m až 0,48 m, hmotnost 80 kg) a 0,016 mm až 0,022 mm (prototyp 0,48 m až 0,66 m, hmotnost 200 kg). Zrna byla vzhledem k tvarovým vlastnostem navržena z lomu Dolní Kounice.

Travní povrch byl na modelu navržen v podobě štěrkových zrn s modelově si odpovídajícím součinitelem drsnosti.

Pro velký rozsah projektové dokumentace zde není blíže uvedena a rozvedena, je uložena u zhotovitele.



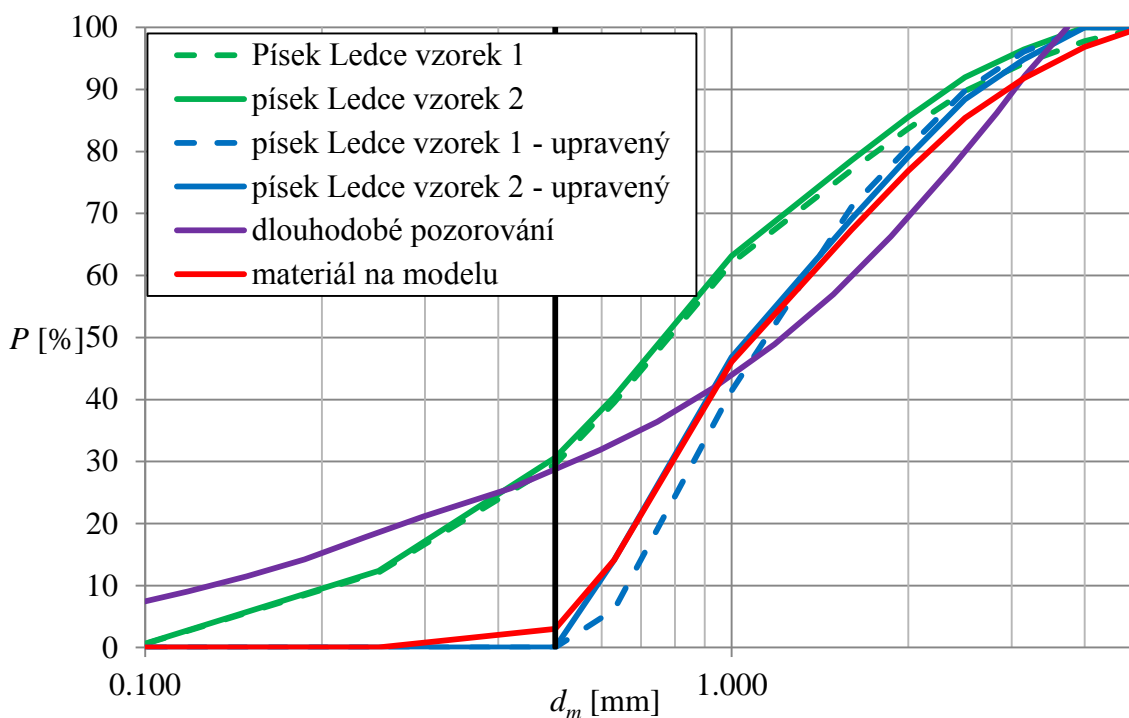
Obr. 48 Umístění volených řezů v půdorysu

7.3. Výstavba modelu

Model byl umístěn do žlabu délky 17,4 (aktivní délka), šířky 3,5 m a hloubky 0,62 m, který je součástí hydraulického okruhu v budově „B“ Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Přítok vody na model zabezpečoval cirkulační tlakový systém s čerpadly řízenými měničem frekvence. Průtok byl regulován pomocí PID regulátoru. Systém zabezpečoval průtoky konstantní v čase i průtoky proměnné v čase.

Pro vytvoření materiálu s požadovanou křivkou zrnitosti sloužil písek z pískovny v Ledcích, který se nejvíce podobal požadované zrnitosti po odstranění zrn menších než 0,5 mm. Materiál z pískovny o hmotnosti cca 8 t byl vysušen a byly z něho vysetím pomocí síta se čtvercovými oky připevněného na třepacím zařízení (Obr. 50) odstraněna zrna menší než 0,5 mm. Pro ověření zrnitosti upraveného písku cca 5 t byly provedeny dva náhodné odběry, u kterých byla stanovena zrnitostní křivka (Obr. 49). Po dodání frakce 4 mm až 5 mm bylo konstatováno, že zrnitostní křivka je vyhovující (Obr. 47) a proto upravený písek je pro simulaci proudění dnových splavenin na modelu vhodný. Upravený písek je na Obr. 50 vidět ve žlabu, nevhodný, určený pro likvidaci, je mimo žlab.



Obr. 49 Úprava zrnitosti písku použitého na modelu

Model se skládal ze dvou částí. První byla nedeformovatelná a druhá deformovatelná (pohyblivé dno).

Základem pro výstavbu nedeformovatelné části modelu byly příčné profily z plechu (Obr. 51). Prostor mezi nimi byl vyplněn plnými cihlami (Obr. 51). Na povrchu cihel byla vytvořena nosná betonová skořepina (Obr. 52), která umožňovala pohyb osob. Povrch betonové skořepiny byl vyhotoven z pohledového betonu (Obr. 53), který zabezpečil dodržení geometrického tvaru povrchu. Povrch pohledového betonu byl natřen pro zabezpečení věrohodnějšího vizuálního vjemu. V místech navrženého opevnění byly nalepeny kameny velikostí odpovídající velikosti opevnění na prototypu (Obr. 54), aby byla dodržena povrchová drsnost. Byly připevněny pilíře mostu (Obr. 54) a položeny mostovky.

Deformovatelná část modelu se skládala z odvodňovacího systému vyhotoveného v podobě drenážního potrubí (Obr. 53), které odvodňovalo model. Části modelu, kde se nepředpokládalo, že dojde k velkým výmolům, byly vyplněny cihlami. Drenážní potrubí bylo obsypáno štěrkem (Obr. 54) zvyšujícím jeho spolehlivost a funkčnost. Dělicí hráz UPDS a UPP byla vyhotovena z cihel, které umožňovaly snadný pohyb z důvodu případné změny její trasy (Obr. 56). Prostor modelu byl vymodelován z písku odpovídající zrnitosti (Obr. 56). Nátoková část modelu byla opevněna (Obr. 54). Opevnění v nátokové části vytvářelo rychleji požadovaný rychlostní profil a zabraňovalo vzniku výmolů vlivem změny průtočného průřezu.

K zachycení splavenin odnesených z modelu sloužil lapač splavenin umístěný o patro níže v laboratoři. K odvodnění splavenin sloužila odvodňovací nádoba (Obr. 57), která měla dno perforováno otvory, do kterých byla vložena filtrační textilie. Obdobná nádoba sloužila jako zásobník materiálu pro dávkování splavenin do modelu.



Obr. 50 Příprava žlabu pro umístění modelu, příprava písku



Obr. 51 Umístění příčných profilů a vyplnění jejich prostoru cihlami



Obr. 52 Vyhotovení betonové skořepiny modelu



Obr. 53 Úprava pohledovým betonem, zhotovení opevnění svahů a umístění drenážního potrubí s obsypem



Obr. 54 Připevnění pilířů mostu a vyplnění prostoru levé části modelu cihlami



Obr. 55 Zасыпání modelu písekem



Obr. 56 Doplnění dělicí hráze UPDS a UPP, opevnění kynety, barevné ztvárnění povrchů, urovnání písku a položení mostovek



Obr. 57 Odvodňovací nádoby

8. Měřicí zařízení a měření

8.1. Měřidla

Souřadný systém

Pro výstavbu i měření byl použit jednotný souřadný systém. Srovnávací rovina byla volena odpovídající úrovni 384,00 m n. m. Podélný směr žlabu reprezentoval osu x , příčný směr žlabu reprezentoval osu y , na ně kolmá osa z byla kladná proti směru tíhového zrychlení.

Průtok

Průtok byl stanoven na základě měření úrovně hladiny ultrazvukovou sondou v nádrži s Thomsonovým přelivem (Obr. 58). Přeliv byl kalibrován pro malé průtoky objemovou metodou. Pro velké průtoky byla použita konzumní křivka daná normou.

Úroveň

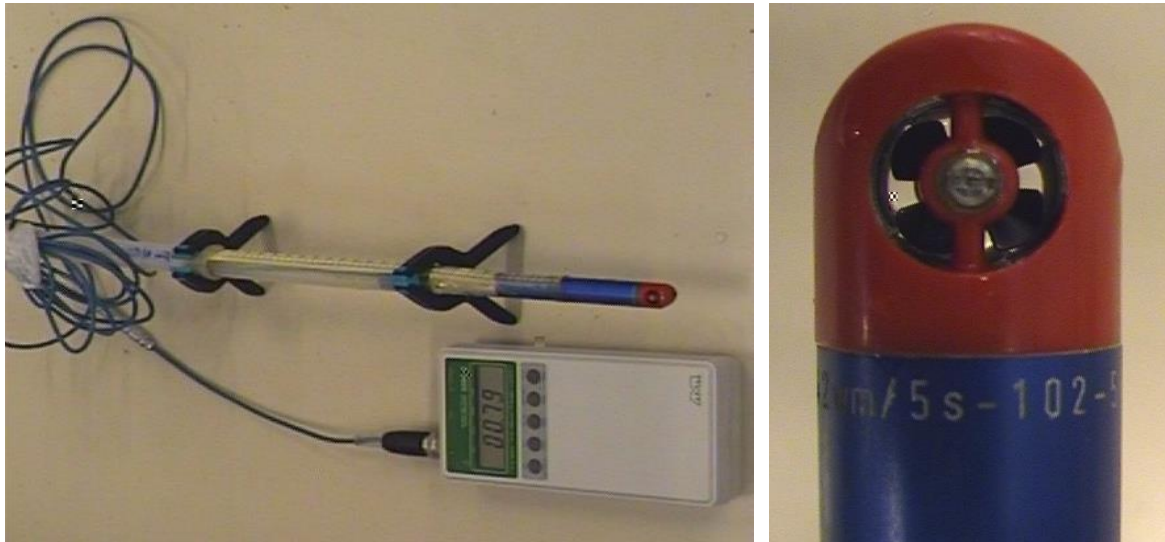
Měření úrovně hladiny, pevného i sypkého povrchu bylo provedeno pomocí digitálního hrotového měřidla Mitutoyo. Měřidlo bylo umístěno na pojezdu Obr. 58.



Obr. 58 Pojezd s digitálním hrotovým měřidlem, v pozadí Thomsonův přeliv a ultrazvuková sonda

Rychlost

Měření bodových rychlostí bylo provedeno mikrovrtulí typu Therm 2285-2 (Obr. 59) s kalibrovaným rozsahem od $u = 0,02$ m/s do $u = 5,00$ m/s, s přesností $\pm 0,01$ m/s při citlivosti přístroje 0,1 mV/Digit.



Obr. 59 Měřicí přístroj Therm 2285-2 s mikrovtulí

Délka

K měření délek bylo použito skládacích a svinovacích metrů. Pro velké vzdálenosti bylo použito pásmo.

Hmotnost

Pro měření hmotností do 5 kg byla použita digitální váha, pro měření větších hmotností byla použita váha decimální.

Čas

Čas byl určován pomocí notebooku s jeho aktualizací pomocí internetové sítě.

Rozměr zrn

Reprezentativní rozměr zrn byl určován síťovým rozborem pomocí normové řady sít.

Fotografie

Fotografie byly pořízeny digitálním fotoaparátem Nikon COOLPIX6400.

8.2. Měření

Měření polohy hrotu hrotového měřidla

Měřidlo bylo umístěno kluzně na traverze pojezdu, pohyb po traverze určoval souřadnici osy y . Celý pojezd byl přemísťován po kolejnicích žlabu, což určovalo souřadnici osy x .

Měření úrovně hladiny

Měření úrovně hladiny bylo provedeno pro hladinu bez kmitání tak, že se suchý hrot měřidla přibližoval ke hladině tak dlouho, až došlo ke smočení hrotu vodou. V případě rozkmitané úrovně hladiny byla úroveň hladiny stanovena jako úroveň, při které je hrot z poloviny doby měření smáčen a z poloviny doby měření je suchý.

Měření úrovně povrchu sypkých materiálů

Měření úrovně povrchu sypkých materiálů se zrny menšími než tloušťka hrotu (jedná se o plochu) měřidla bylo provedeno tak, že se hrot přibližoval k povrchové vrstvě zrn tak dlouho, až došlo ke kontaktu většiny zrn s povrchem hrotu. V případě zrn větších než tloušťka hrotu a zrn s neurovnaným povrchem byla úroveň určena průměrnou úrovní povrchu zrn povrchové vrstvy.

Měření mikrovrtulí

Měření bodových rychlostí bylo provedeno ručně tak, že byla vložena sonda s mikrovrtulí do proudu a hledala se poloha mikrovrtule odpovídající maximální hodnotě časově střední bodové rychlosti (osa propeleru byla totožná s proudnicí).

Zrnitost

Zrnitost materiálů byla dokumentována pomocí zrnitostních křivek a jejich vlastností.

Vzorky materiálů byly vysušeny při teplotě 105 °C tak dlouho, až se neměnila jejich hmotnost.

U vysušených vzorků byly provedeny zrnitostní rozборы standardním postupem (Weiglová a kol., 2003) na normované sadě sít se čtvercovými oky od velikosti 0,063 mm až do velikosti oka 64 mm. Větší zrna byla měřena pomocí měřicího boxu a vážena zvlášť.

Ze zjištěných hmotnostních podílů jednotlivých frakcí zachycených na sítích, byly zpracovány zrnitostní křivky udávající velikost zrna d_i [mm] odpovídající jednotlivým procentům P_i [%] propadu zrn z celkové hmotnosti zrn.

Jako charakteristiky zrnitosti materiálu byly stanoveny tyto údaje:

- Procentuální zastoupení složek zeminy ve vzorku.
- Procentuální zastoupení frakcí zeminy menších než d_i .
- Efektivní (průměrné) zrno směsi d_e ze vztahu

$$d_e = \frac{\sum d_i p_i}{100}, \quad (8.1)$$

kde d_i je střední zrno jednotlivé frakce a p_i procentuální zastoupení frakce.

- Procento křivky zrnitosti odpovídající hodnotě průměru efektivního zrna P_{de} .
- Číslo stejnozrnnosti materiálu vzorku ze vztahu

$$C_N = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (8.2)$$

v němž d_{60} a d_{10} značí velikost zrna odpovídající 60-ti a 10-ti procentům zastoupení ve směsi.

- Číslo křivosti

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}}. \quad (8.3)$$

- Charakteristické hodnoty zrn vzorku d_{10} , d_{15} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{85} , d_{90} . Jejich hodnoty byly stanoveny lineární interpolací mezi změřenými hodnotami.

Protokoly o zrnitosti materiálů nejsou v práci vzhledem ke značnému rozsahu uvedeny, jsou uloženy u zpracovatele.

Objem splavenin

Splaveniny byly umístěny do odkapávací nádoby, kde se zbavily gravitační vody. Následně se z nich vytvořil kvádr, který byl zhutněn. Rozměry kvádrů l_a , l_b , l_c byly změřeny a z nich vypočítán objem

$$V = l_a l_b l_c . \quad (8.4)$$

Hmotnost splavenin

Pro určení hmotnosti splavenin byly použity dva postupy. První vycházel přímo z měření, kdy se měřila hmotnost suchého materiálu.

Pro mokré materiálu byla hmotnost stanovena na základě určení objemu a známé hustoty suchého materiálu při daném zhutnění

$$m = \rho V . \quad (8.5)$$

Hustota splavenin

Hustota splavenin byla určena u suchého materiálu tak, že se pro daný objem suchého materiálu příslušně zhutněného změřila jeho hmotnost. Poměrem změřené hmotnosti a známého objemu se získala hustota materiálu. Hustota suchého materiálu byla 1550 kg/m^3 .

Software pro zpracování

Mapy veličin byly provedeny pomocí softwaru SMS. Výpočty a grafy pomocí MS Excel a k textovým pracím byl použit MS Word. Výkresy byly provedeny pomocí AutoCAD.

8.3. Testovací zátěžové stavy

Před kalibrací bylo třeba provést testovací měření, které mělo ukázat, jak se model chová při různých zátěžových stavech a odstranit tak nedostatky při stavbě modelu, ověřit a případně upravit řízení průtoků, ověřit funkci opevňovacích a odvodňovacích prvků a stanovit vliv dosahu okrajových podmínek na proudění v modelu a minimalizovat ho.

V rámci testů byl model zatěžován různými průtoky i různě velkými časovými změnami průtoků.

Na základě testů byl částečně upraven odvodňovací systém modelu, byly opraveny filtry a model byl dosypán a dotvarován. Vzhledem k neočekávaně dobré funkci odvodňovacího systému modelu bylo třeba provést částečné uzavření výtokových částí drenážního potrubí (Obr. 61).

Testy se zaměřily i na tlumení kinetické energie přepadového paprsku Thomsonova přelivu v nátokové části modelu. Za tímto účelem byl upraven nátok na model, byly do něj vloženy betonové kostky.

Rovněž se ukázalo, že je třeba minimalizovat dosah hodní okrajové podmínky, což bylo vyřešeno přidáním usměrňovacích prvků proudu v nátokové části (cihly).

Přidán byl i odvodňovací systém UPP v podobě dvou odvodňovacích příkopů ústících v místě přelivu UPP (Obr. 60).

Vzhledem k požadavku údržby UPP investorem bylo po konzultaci s objednatelem zvýšeno dno UPP.

Další testy prověřily funkčnost opevnění stupně na začátku UPP (bráno po proudně) a přelévané cesty na jeho konci. Bylo stanoveno, že je nutné přesněji určovat polohu hladiny v UPP tím, že se provede hladký povrch přelivu UPP (Obr. 61).



Obr. 60 Příkopy UPP



Obr. 61 Úprava přelivu UPP

9. Kalibrace modelu

Kalibrace modelu měla za účel vytvořit na modelu takové podmínky, aby proudění vody s volnou hladinou a proudění dnových splavenin co nejlépe odpovídalo skutečnosti, případně požadavkům. Kalibrace se skládala ze dvou částí. Nejdříve bylo třeba kalibrovat model na proudění vody a následně na proudění dnových splavenin. V rámci kalibrace došlo ke změnám geometrie navrženého řešení tak, aby byla zabezpečena funkčnost UPDS.

9.1. Podobnost proudění vody

Vzhledem k poměrně zásadním změnám v geometrii koryta UPS a přilehlého území by bylo možné provést kalibraci na stávající stav pouze pro malé průtoky proudící v kynetě nad mostem na Milotice, protože se vedení kynety a její příčný profil za malých průtoků uvažuje z kapacitního hlediska beze změny. Avšak v daném úseku nebyla k dispozici změřená úroveň hladiny, proto ani tuto část kalibrace nebylo možné provést.

Pro stanovení podobnosti proudění vody s požadavky návrhu bylo využito těchto stavů:

- Dělení průtoku mezi kynetou a bermu nad mostem na Milotice.
- Proudění na spádový stupeň UPP.
- Počátek přepadu vody při hydrostatickém vzduť z UPDS do UPP.
- Proudění v UPP.

9.1.1. Dělení průtoku mezi kynetou a bermu nad mostem na Milotice

Dle podkladu objednatel byl pro dělení průtoku mezi kynetou a bermu koryta nad mostem na Milotice požadován průtok Q_{30d} . Podle kontrolního výpočtu rovnoměrného proudění se však ukázalo, že kyneta za navržené geometrie převede samostatně průtok větší, odpovídající cca Q_1 . Uvedená neshoda se ukázala jako výhodná v tom, že pokud by byl návrhový průtok kynety Q_{30d} , došlo by k porušení dnové dlažby v kynetě až při větších průtocích než výše po toku, což by mohlo způsobovat při malých průtocích zanášení koryta a rovněž by velmi pravděpodobně došlo k proudění dnových splavenin po bermě, což by bylo nežádoucí. Pro správnou funkci obou usazovacích prostorů bylo třeba navrhnout dělení průtoků tak, aby se dnové splaveniny v kynetě nedostávaly na bermu a následně do UPP, ale aby všechny proudily v kynetě a tedy do UPDS. Pro splnění výše uvedených požadavků bylo třeba, aby průtok na počátku porušení dnové dlažby byl realizován především kynetou. Z toho vyplynulo, že kapacita kynety by měla být navržena na cca Q_1 .

Kalibrace modelu tedy spočívala v zatížení modelu průtokem Q_1 a případně provedení takových úprav, aby kapacita kynety odpovídala tomuto průtoku. Ukázalo se, že kapacita navržené kynety je na fyzikálním modelu Q_1 .

Ve druhé části byl model zatížen většími průtoky a bylo třeba provést takové úpravy, aby se dnové splaveniny v kynetě v úseku s prouděním, které není ovlivněno mostním pilířem, nedostávaly na bermu. Ukázalo se, že v případě ponechání bermy s povrchem odpovídajícím materiálu usazenin v korytě se vytvoří nedostatečná drsnost a berma je tak kapacitnější, než ve skutečnosti. Proto bylo třeba vytvořit drsnost povrchu odpovídající drsnosti požadované na

prototypu. Požadovaný součinitel drsnosti dna bermy byl $n = 0,038$ (celkový součinitel drsnosti bermy 0,040). Drsnost svahů bermy odpovídala opevnění kamenným záhozem hmotnosti zrna 80 kg. Dno bermy tedy bylo vytvořeno ze zrn frakce 8 mm až 10 mm, které vytvářejí stejnou drsnost (Strickler, 1923) jako je požadovaná po přepočtu na prototypu. Po provedených úpravách drsnosti dna bermy bylo dělení průtoku mezi jednotlivé části koryta odpovídající požadavkům.

9.1.2. Proudění na spádový stupeň UPP

Část bermy v blízkosti spádového stupně UPP byla navržena poproudě se rozšiřující. Navržený sklon dna bermy v tomto úseku byl přibližně vodorovný. Právě velmi malý sklon dna bermy způsoboval, že se voda v bermě nedostávala do UPP a vracela se zpět do kynety. Pro odstranění výše uvedeného nedostatku bylo třeba zvětšit sklon dna bermy. Pro přesnější definování koruny spádového stupně UPP byla po domluvě s objednatelem určena pevným prahem s nižší úrovní koruny 388,75 m n. m.

9.1.3. Počátek přepadu při hydrostatickém vzduť z UPDS do UPP

Při návrhu UPDS se uvažovalo s přelivem u spádového objektu bez bližší specifikace typu dle přání investora. Z toho důvodu byl při výpočtech přepadu uvažován nejjednodušší tvar odpovídající obdélníkovému profilu. Při výstavbě modelu však bylo třeba tvar blíže specifikovat. Byl zvolen přeliv se širokou drsnou korunou s lichoběžníkovým příčným i podélným profilem, což vyvolalo změnu šířky přelivu k dosažení stejné kapacity přelivu při hladině odpovídající počátku přepadu z UPDS do UPP. Šířka přelivu byla změněna na 12 m a sklon bočních stěn 1:2. Přeliv je však možné vyhotovit i v jiném tvaru.

9.1.4. Proudění v UPP

Pro dosažení podobného proudění v UPP bylo jeho dno opatřeno frakcí zrn velikosti 8 mm až 10 mm, která vytváří stejný součinitel drsnosti, jako je požadovaný po přepočtu na prototypu.

9.2. Podobnost proudění dnových splavenin

Kalibraci modelu na podobnost proudění dnových splavenin nebylo možné provést v celém rozsahu modelu, protože značná jeho část byla zcela nově tvarovaná, proto byla provedena pouze pro část nad mostem a bezprostředně pod mostem, kde přibližně odpovídá současnému stavu.

Kalibrace spočívala ve dvou bodech. Prvním byl vývoj koryta za období 2009 do roku 2015 a druhým byl průtok na počátku porušení dnové dlažby.

9.2.1. Podobnost na základě vývoje koryta za období 2009 až 2015

Podobnost na základě simulace vývoje koryta za období 2009 až 2015 byla využita pro porovnání tvaru příčných profilů a zrnitosti krycí vrstvy materiálu dna.

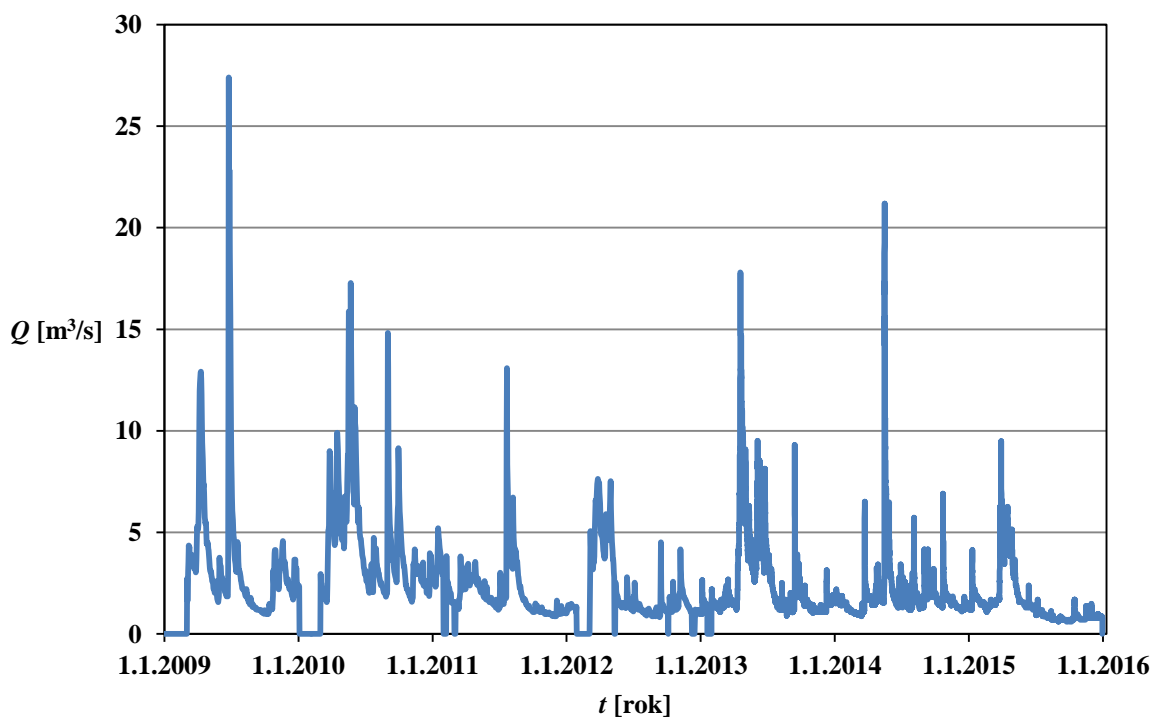
V roce 2008 bylo provedeno geodetické zaměření koryta toku, proto bylo možné provést model ve tvaru koryta v daném roce. Z roku 2010 je známá zrnitost krycí vrstvy usazenin na dně koryta, proto bylo možné provést dno koryta v požadované zrnitosti. Stanovená zrnitost z roku 2015 pak sloužila, jako kontrolní zrnitost pro splnění podobnosti vytváření dnové dlažby. Vzhledem k tomu, že průtoky ze stanice Karlovice (Obr. 62) za sledované období

2009 až 2015 (ČHMÚ, 2016) nevytvářely zásadní změnu v tvarování koryta, protože byly blízko průtoku na mezi porušení dnové dlažby, bylo možné porovnat i tvar dlouhodobě neměnný. Pro porovnání byly zvoleny čtyři profily nad mostem na Milotice (Obr. 63). Na Obr. 63 jsou označeny pouze čísla a mají protiproudni orientaci. Porovnávalo bylo dno i s fotografickými záznamy pořízenými během odběru vzorků materiálu dna pro stanovení zrnitosti v roce 2015.

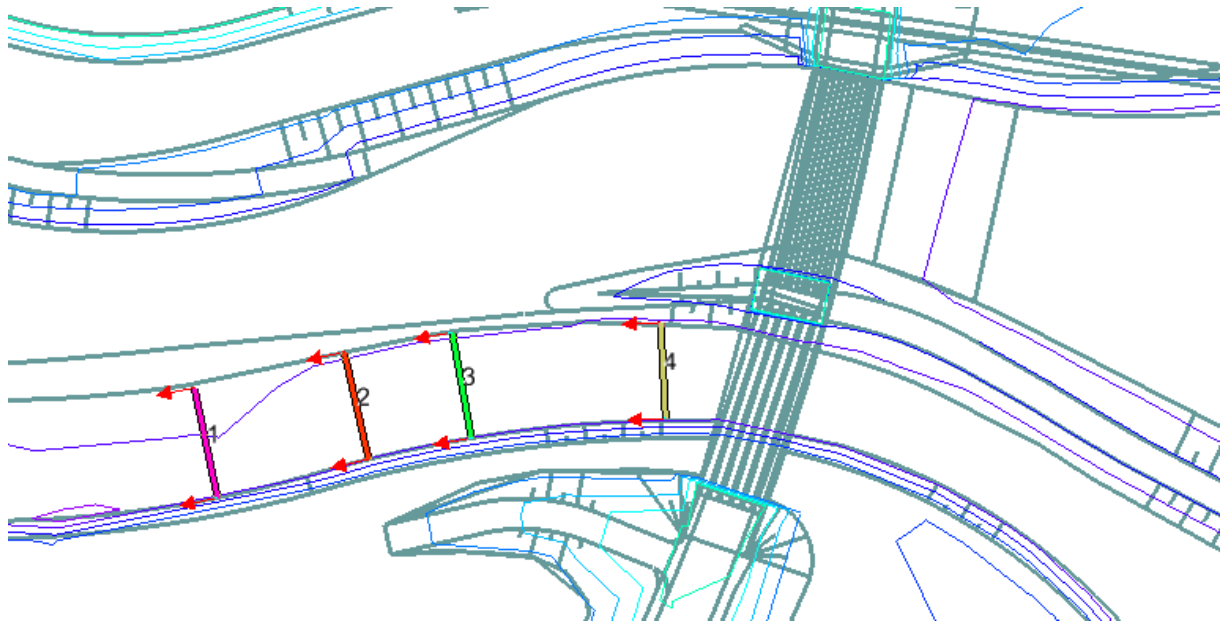
Porovnání tvaru příčných profilů koryta je vyobrazeno na Obr. 64. Z něj vyplývá, že změny jsou relativně malé, rozsahu největšího zrna, které proud transportuje. Tvar profilů je prakticky stejný.

Na základě uvedeného je možné konstatovat, že tvar koryta při průtoku vytvářejícím dnovou dlažbu prakticky odpovídá prototypu.

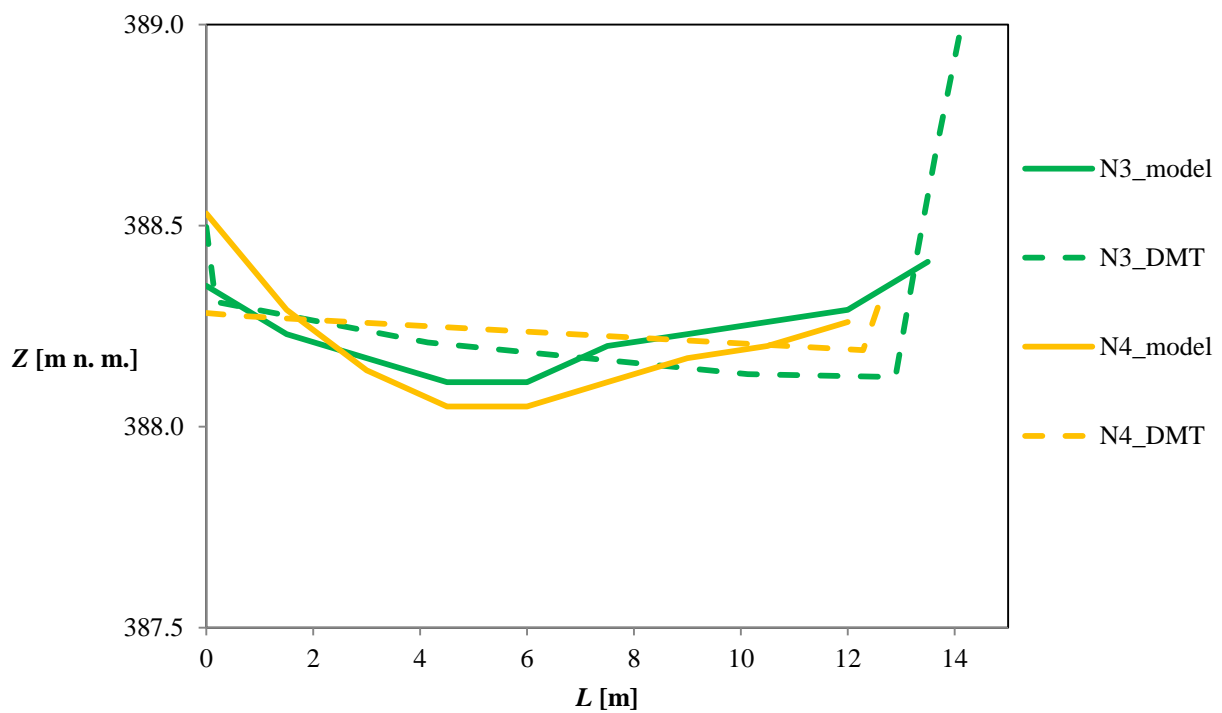
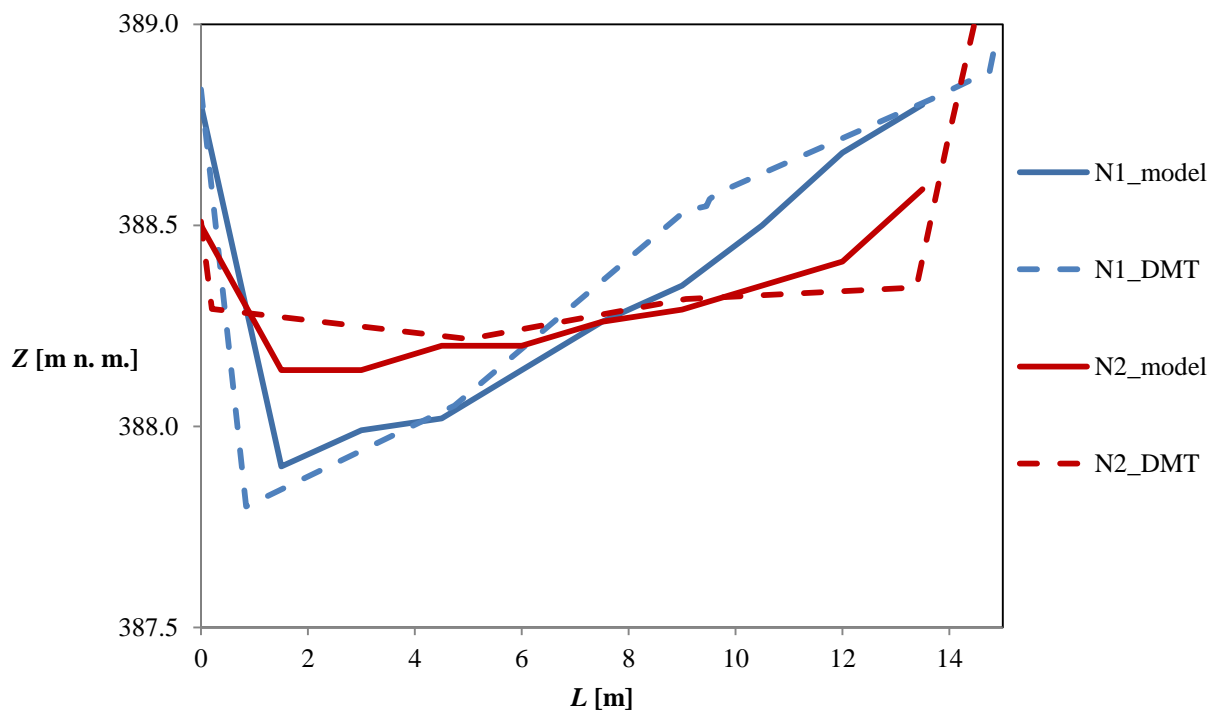
Porovnání zrnitostních křivek je provedeno na Obr. 65. Z něj vyplývá, že zrnitostní složení krycí vrstvy dna modelu prakticky odpovídá zrnitosti krycí vrstvy dna na prototypu. Rozdíly jsou pouze u malých zrn, která fyzikální model nedokáže simulovat (menší než 15 mm na prototypu) a u velkých zrn, kde je velký vliv zastoupení velkého zrna ve vzorku. Na základě výše uvedeného je možné konstatovat, že zrnitost dnové dlažby prakticky odpovídá zrnitosti dnové dlažby na prototypu.



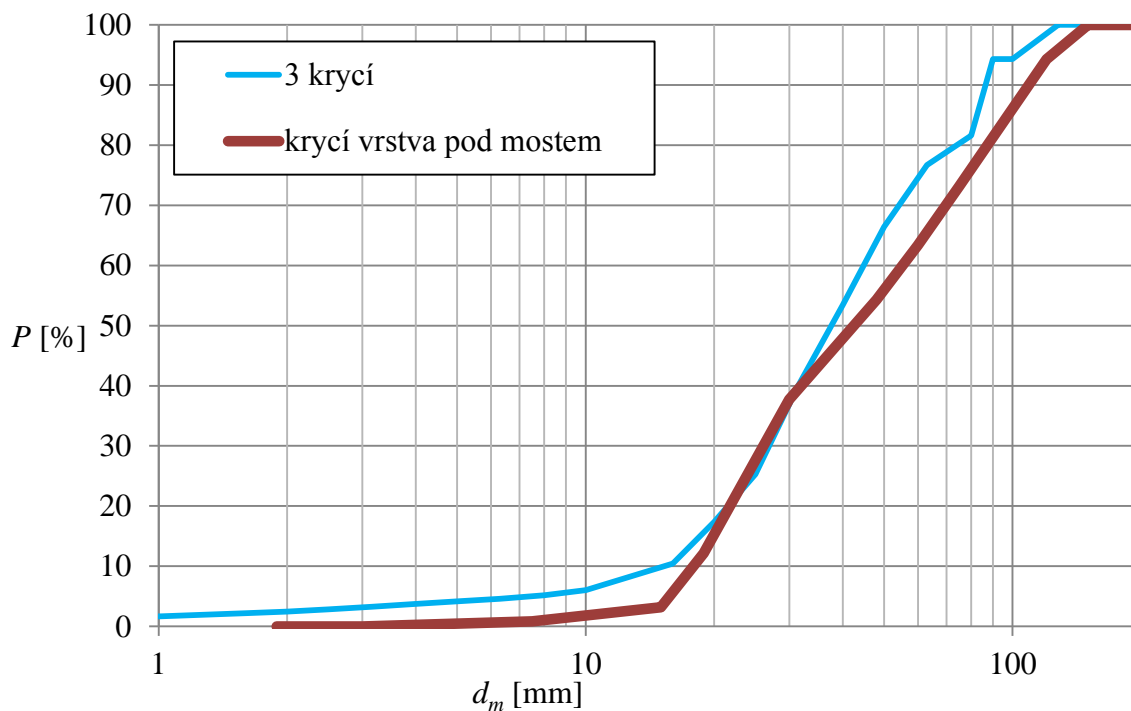
Obr. 62 Průtoky v období 2009 až 2015



Obr. 63 Zvolené profily N pro porovnání úrovně dna



Obr. 64 Podobnost tvaru volených příčných profilů v úseku nad mostem na Milotice (protiproudí profily)



Obr. 65 Podobnost zrnitosti krycí vrstvy dna

9.2.1. Průtok na počátku porušení dnové dlažby

Z dlouhodobého pozorování chování koryta Opavy při zvýšených stavech hladiny za povodní je investorem zjištěno, že k transportu dnových splavenin dochází až od průtoků větších než Q_1 .

Na modelu proto byly simulovány postupně se zvětšující průtoky a vizuálně se sledoval počátek pohybu výše uvedeným průtokem vytvořené dnové dlažby. Ukázalo se, že k porušení dnové dlažby dochází na modelu rovněž od průtoků Q_1 .

Na základě výše uvedeného je možné konstatovat, že počátek porušení dnové dlažby je na modelu prakticky stejný, jako je na prototypu.

10. Měření a vyhodnocení

Experimenty byly rozděleny do dvou skupin:

- Za ustáleného stavu.
- Za neustáleného stavu.

Při neustáleném stavu byly sledovány:

- úroveň hladiny v čase,
- poloha osy hlavního proudu v čase,
- průtok splavenin v koncovém profilu v čase,
- počátek pohybu splavenin,
- změna úrovně dna během pokusu,
- úroveň povrchu dna na konci pokusu,
- pohyb splavenin,
- obtékání pilíře mostu,
- stabilita všech prvků opevnění (patky, záhozy, svahy),
- dělení průtoku.

Veškerá níže uvedená data jsou vyhodnocena pro prototyp, nebude-li uvedeno jinak.

Jednotlivé varianty byly značeny dle průtokové vlny, uvádí je Tab. 4.

Tab. 4 Značení experimentů

Průtoková vlna	Kulminační průtok	Trvání průtokové vlny
	Q	t
	[m ³ /s]	[hod]
PV5	65,6	62
PV10	91,2	76
PV20	121	87
PV50	166	87
PV100	206	98

10.1. Měření a vyhodnocení za ustálených stavů

V rámci měření za ustálených stavů byl model zatěžován různými průtoky v rozsahu Q_{30d} až Q_{100} a různě velikými časovými změnami průtoků. Účelem zatěžování bylo:

- Stanovení průtoku a doby jeho trvání pro vytvoření dnové dlažby. Zkoušeny byly průtoky při dávkování (dynamické armování) i při nedávkování (statické armování) dnových splavenin do modelu, aby bylo možné stanovit rozdílnost vytváření dnové dlažby při dynamickém i při statickém armování. Ukázalo se, že dnová dlažba se nejrychleji vytváří při statickém armování při průtocích v rozsahu Q_1 až Q_5 . Každý z průtoků vytváří dnovou dlažbu mírně jiné zrnitosti. Při větších průtocích než Q_5 již k vytváření dnové dlažby nedochází, celá vrstva se poruší a pohyb splavenin je

v kategorii celkový pohyb dle kategorizace intenzity pohybu splavenin. Vytváření oblastí se separací zrn dle trajektorie pohybu zrn je stejné jako při dynamickém armování. Při dynamickém armování je vytváření dnové dlažby pomalejší, avšak v určitých oblastech dochází k rychlejší separaci zrn po příčném profilu. Dnová dlažba vytvořená průtokem Q_2 při statickém armování po dobu cca 5,5 hodiny je svojí zrnitostí nejpodobnější dnové dlažbě na prototypu v současné době.

- Stanovení průtoku na mezi porušení stávající dnové dlažby. Pro stanovení průtoku na mezi porušení stávající dnové dlažby byl model zatěžován postupně se zvětšujícími průtoky a vizuálně bylo sledováno, kdy dojde k jejímu porušení. Prakticky bylo stanoveno, že průtok o málo větší, než Q_2 stávající dnovou dlažbu poruší.

10.1.1. Odolnost prvků opevnění

Pro stanovení odolnosti prvků opevnění a jejich případnou úpravu byl po dobu kulminace, což je přibližně 5 hodin, puštěn průtok Q_{100} .

Sledována byla stabilita prvků opevnění a velikost výmolů. V případě porušení opevnění bylo opevnění upraveno tak, aby k jeho porušení nedošlo.

Změna se týkala především opevnění dělicí hráze mezi UPDS a UPP (Obr. 66) a spádovým stupněm UPP v podobě balvanitého skluzu.



Obr. 66 Opevnění dělicí hráze UPDS a UPP

10.2. Měření a vyhodnocení za neustálených stavů

Měřeno bylo za těchto povodňových vln: PV₅, PV₁₀, PV₂₀, PV₅₀ a PV₁₀₀.

Povodňové vlny začínaly a končily průtokem 19 m³/s, který způsobuje porušení dnové dlažby a tedy i průtok splavenin.

Postup při experimentu byl vždy stejný a skládal se z následujících bodů:

- **Úprava modelu do tvaru pro vytvoření dnové dlažby**

Před každou simulací neustáleného stavu bylo nutné uvést model do stejného počátečního stavu. Počáteční stav musel mít vytvořenou dnovou dlažbu tak, jak to je na prototypu, viz. Kalibrace modelu. Za tímto účelem bylo nutné dno modelu vyvýšit tak, aby si průtok, který dnovou dlažbu vytvoří, ji sám vytvořil. Zvolen byl na základě testovacích zátěžových stavů průtok 27,6 m³/s za statického armování, tedy bez dávkování splavenin. Přesypání bylo nutné provést o velikost největšího zrna, tedy 0,15 m.

- **Vytvoření dnové dlažby**

Dnová dlažba byla vytvářena konstantním průtokem 27,6 m³/s s dobou trvání 5,5 hodiny. Během vytváření dnové dlažby nebyly dávkovány splaveniny.

- **Úprava modelu do počátečního stavu**

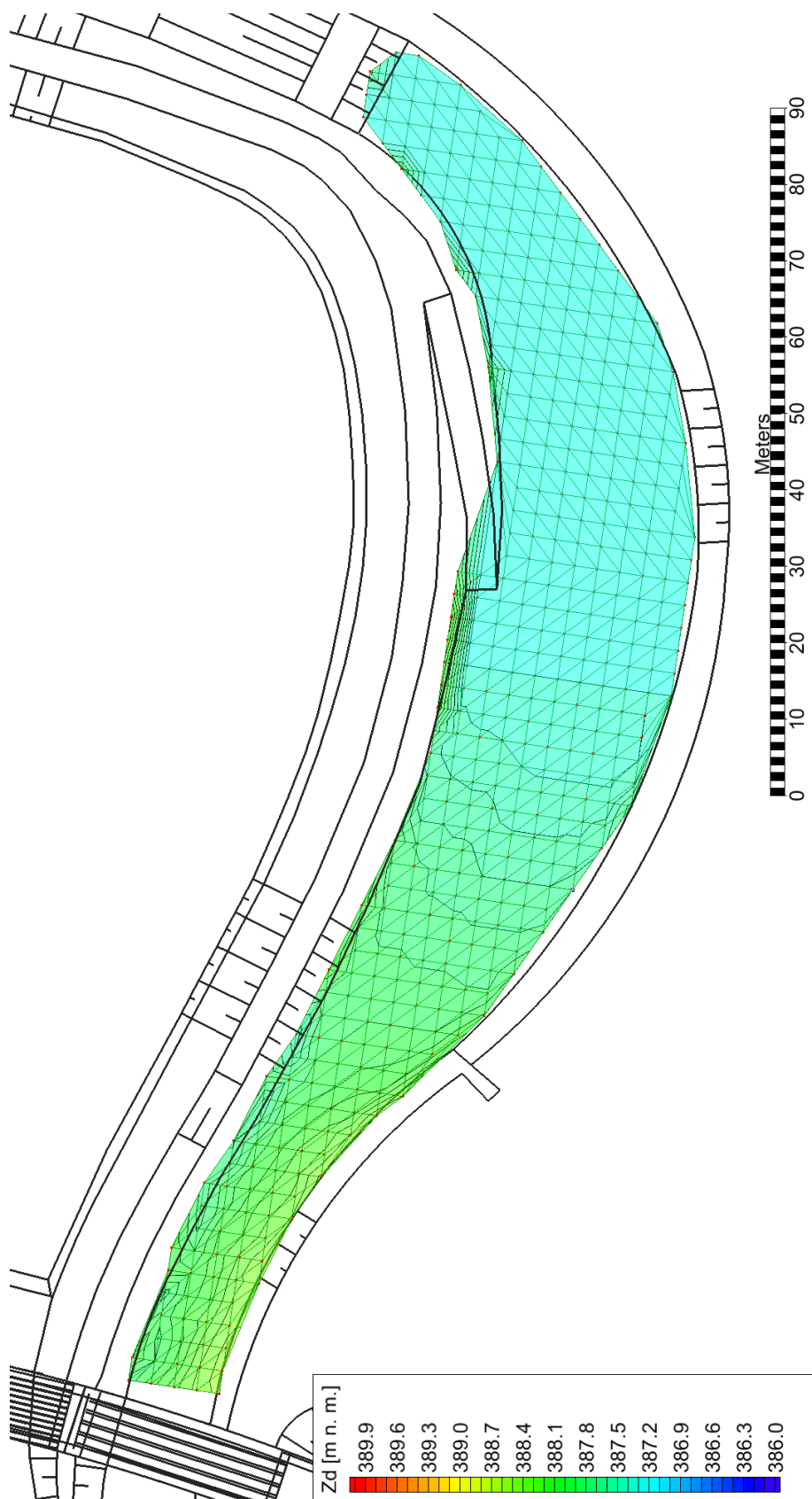
Usazeniny ve dně, které se během výše uvedeného průtoku dostaly do pohybu, sedimentovaly v UPDS. Tyto usazeniny bylo nutné odebrat tak, aby byl UPDS prázdný. Za výše uvedeného stavu bylo dno změřeno v rastru 3 m × 3 m (Obr. 67).

- **Zatížení PV**

Průtok byl regulován pomocí čerpacího systému dle předem definované křivky PV. Splaveniny byly manuálně dávkovány v nátokové části modelu dle výsledků numerické simulace, viz. 1D simulace proudění vody a dnových splavenin. Současně bylo sledováno dno v úseku nad mostem na Milotice a v případě, že docházelo k jeho celkovému vymílání, bylo dávkování zvětšeno a v případě, že docházelo k jeho celkovému zanášení, bylo dávkování zmenšeno. Obvykle platilo, že při velkých průtocích a při vzestupné větvi hydrogramu bylo nutné dávkovat více a při malých průtocích a sestupné větvi hydrogramu bylo nutné dávkovat méně. Největší rozdíly byly při malých průtocích, kdy proud vody nedokázal odnášet velká zrna, která byla dávkována ve směsi s konstantní zrnitostí. Rozdíly však byly vzhledem k celkové hmotnosti materiálu dávkovaného během PV zanedbatelné.

Při kulminačním průtoku PV byla změřena maximální úroveň hladiny vody. Měřeno bylo vždy ve stejných místech v ose koryta, aby bylo možné úrovně hladiny při jednotlivých PV porovnat mezi sebou. Změna úrovně hladiny v příčném profilu byla při všech PV zanedbatelně malá.

Ukončení pokusu bylo při stavu, kdy došlo k přerušení transportu splavenin v úseku nad mostem na Milotice. Při malých PV bylo ukončení provedeno při menších průtocích, oproti tomu při velkých PV bylo ukončení provedeno při větších průtocích. Důvodem bylo vytvoření dnové dlažby z větších zrn.



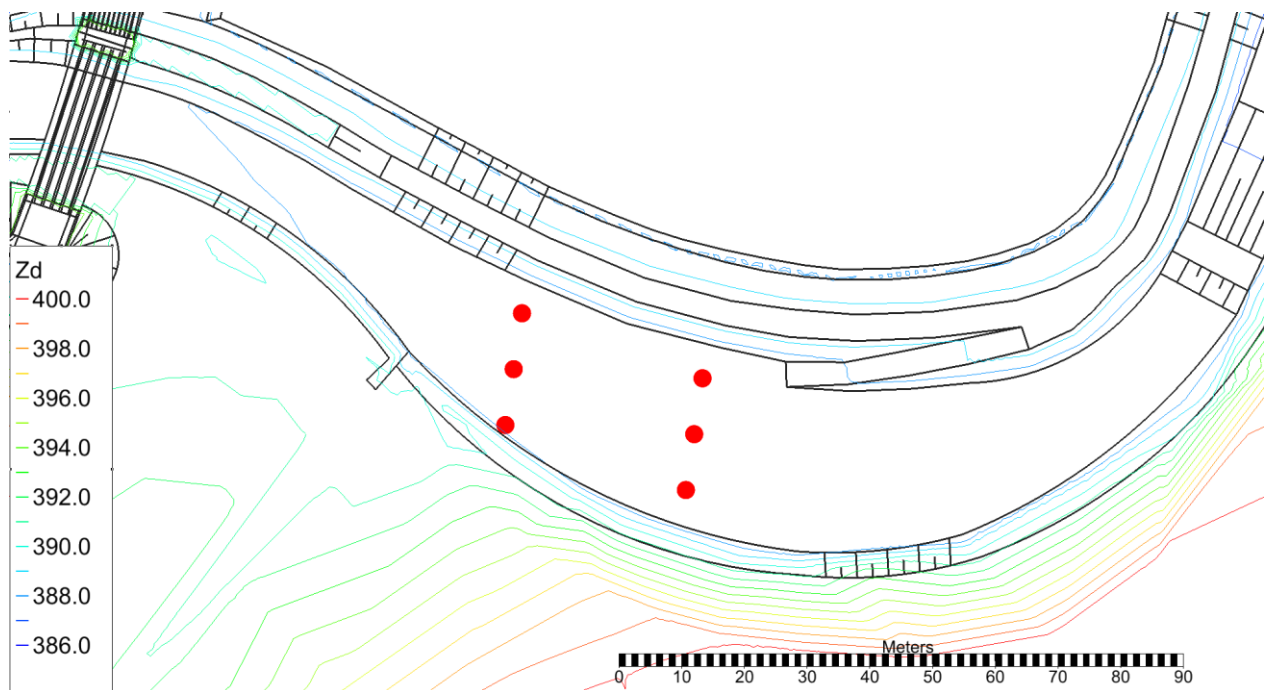
Obr. 67 Úroveň dna na počátku zatížení modelu PV, rastr bodů pro vyhodnocení, triangulace

- **Změření úrovně dna**

Po ukončení pokusu a odvodnění modelu bylo změřeno úroveň dna. Dno bylo měřeno pouze v rozsahu UPDS, tedy poproudě od mostu na Milotice až po přeliv UPDS. Měřeno bylo v rastru 3 m × 3 m.

- **Stanovení zrnitosti usazenin**

Vzorky pro stanovení zrnitosti byly odebrány ze dvou zvolených profilů v místech, kde se splaveniny usadily v podobě nánosů. Horní profil byl označen písmenem H a dolní profil byl označen písmenem D. V profilu bylo odbíráno ze tří míst. První bylo v blízkosti levého břehu (označeno písmenem L), druhé ve středu profilu (označeno písmenem S) a třetí v blízkosti pravého břehu (označeno písmenem P) (Obr. 68). Odběr usazenin byl proveden po celé tloušťce nánosů.



Obr. 68 Místa odběru usazenin pro stanovení zrnitosti

10.2.1. PV5

Postup při experimentu s PV₅ je popsán v úvodní pasáži podkapitoly. Jedinou změnou bylo neprovedení odběrů vzorků ze dna pro stanovení zrnitosti usazenin v tak širokém rozsahu. Odběr byl proveden pouze ze dvou míst v místě horního profilu (H), první bylo u levého břehu (označeno písmenem L) a druhé u pravého břehu (označeno písmenem P).

Hydrogram PV₅ zobrazuje Obr. 45.

Průběh dávkování splavenin zobrazuje Obr. 69.

Proudění při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 70.

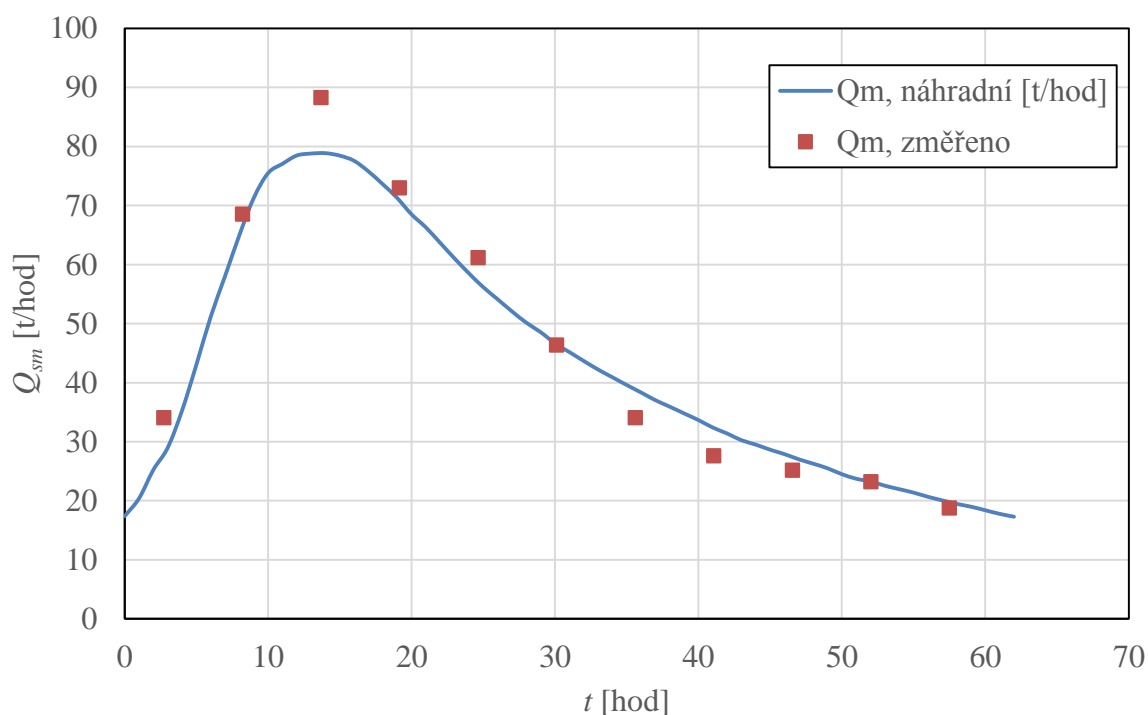
Průběh úrovně hladiny při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 73.

Úroveň dna po PV₅ zobrazuje Obr. 71.

Tloušťku usazenin v UPDS zobrazuje Obr. 72.

Zrnitost usazenin zobrazuje Obr. 74.

Veškeré dnové splaveniny se usadily v UPDS.



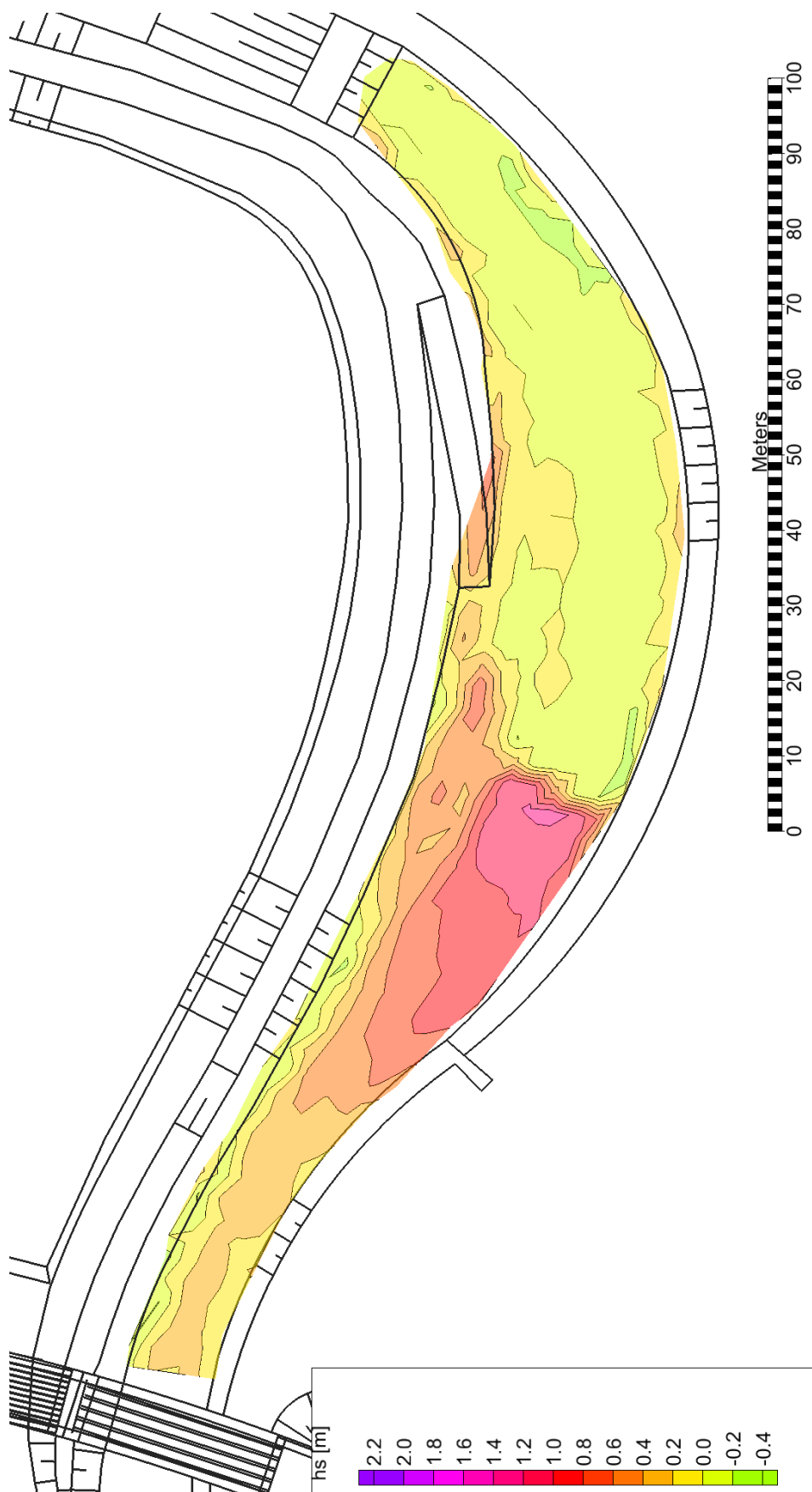
Obr. 69 PV₅, průběh dávkování splavenin



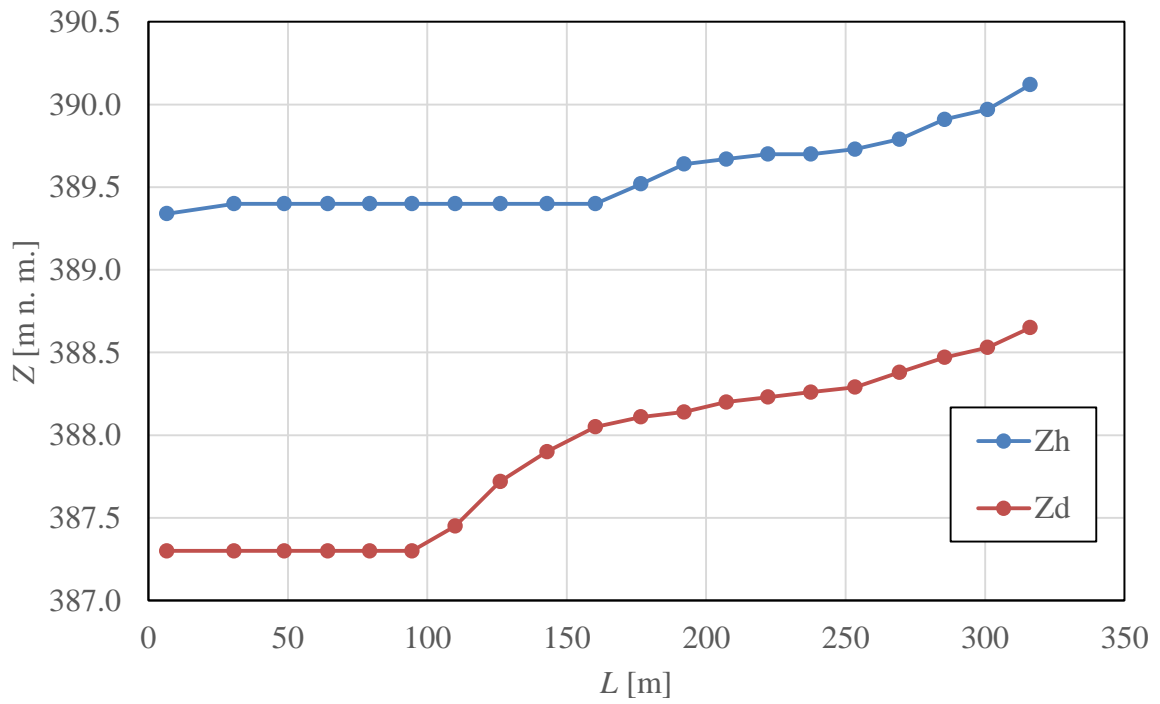
Obr. 70 PV₅, proudění při kulminačním průtoku



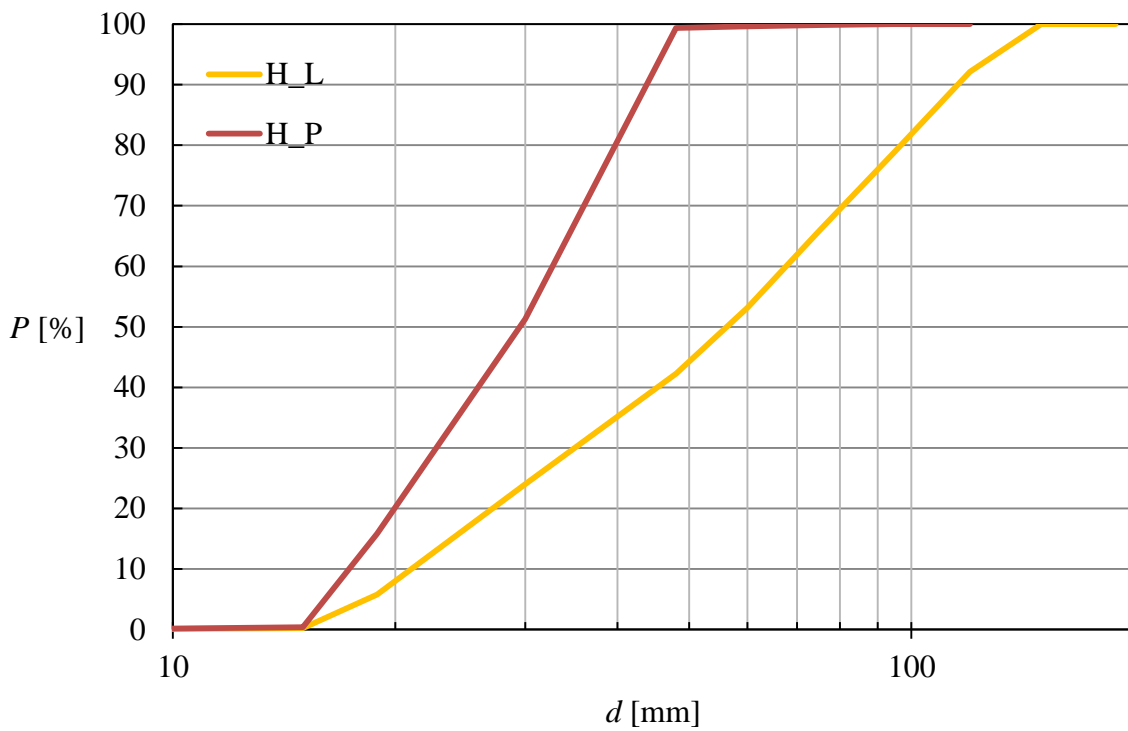
Obr. 71 PV₅, úroveň dna po PV



Obr. 72 PV₅, tloušťka usazenin



Obr. 73 PV₅, úroveň hladiny při kulminačním průtoku



Obr. 74 PV₅, zrnitost usazenin

10.2.2. PV₁₀

Postup při experimentu s PV₁₀ je popsán v úvodní pasáži podkapitoly.

Hydrogram PV₁₀ zobrazuje Obr. 45.

Průběh dávkování splavenin zobrazuje Obr. 75.

Proudění při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 76.

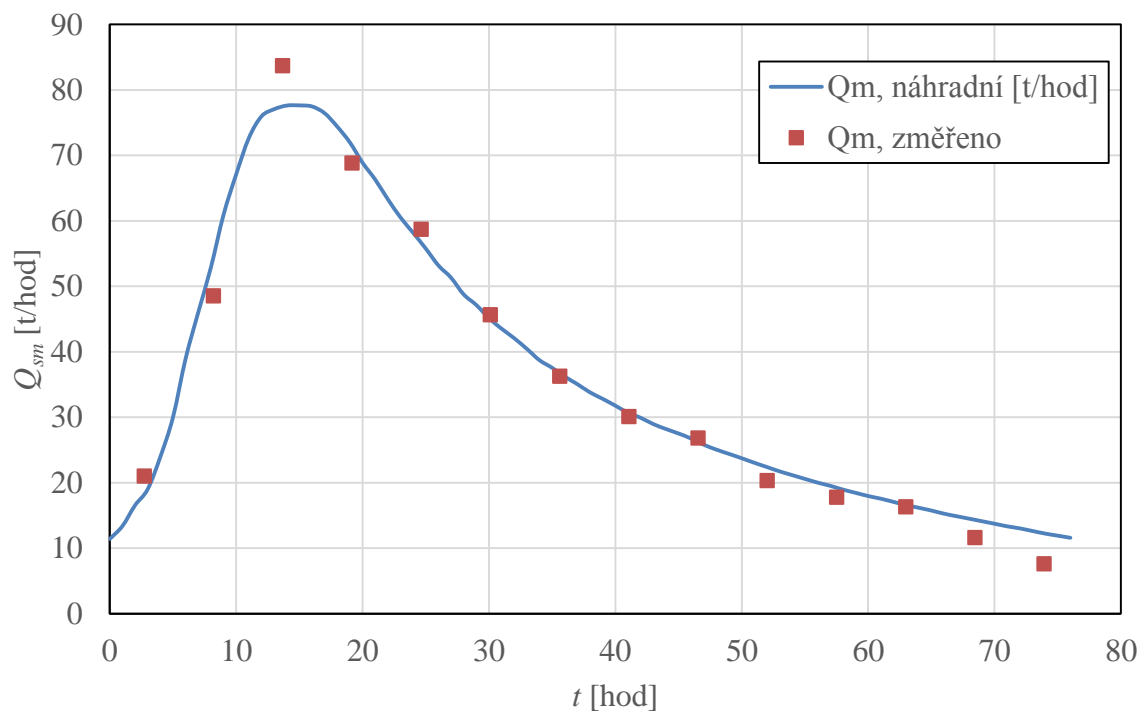
Průběh úrovně hladiny při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 79.

Úroveň dna po PV₁₀ zobrazuje Obr. 77.

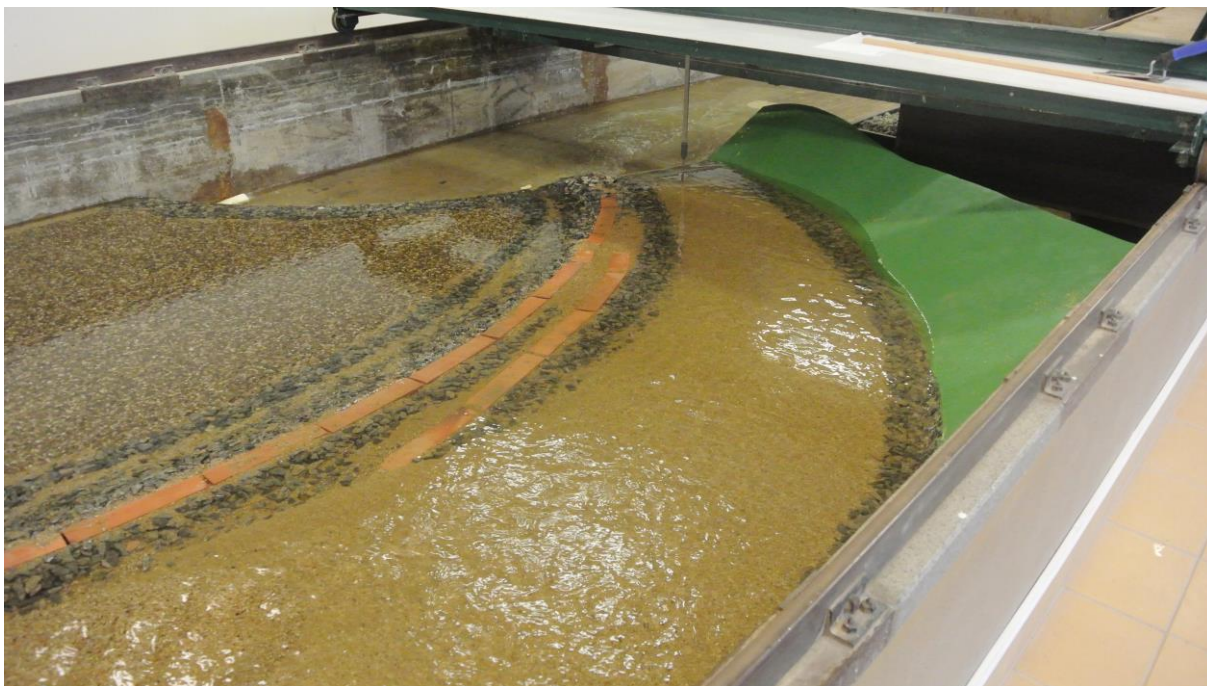
Tloušťku usazenin v UPDS zobrazuje Obr. 78.

Zrnitost usazenin zobrazuje Obr. 80

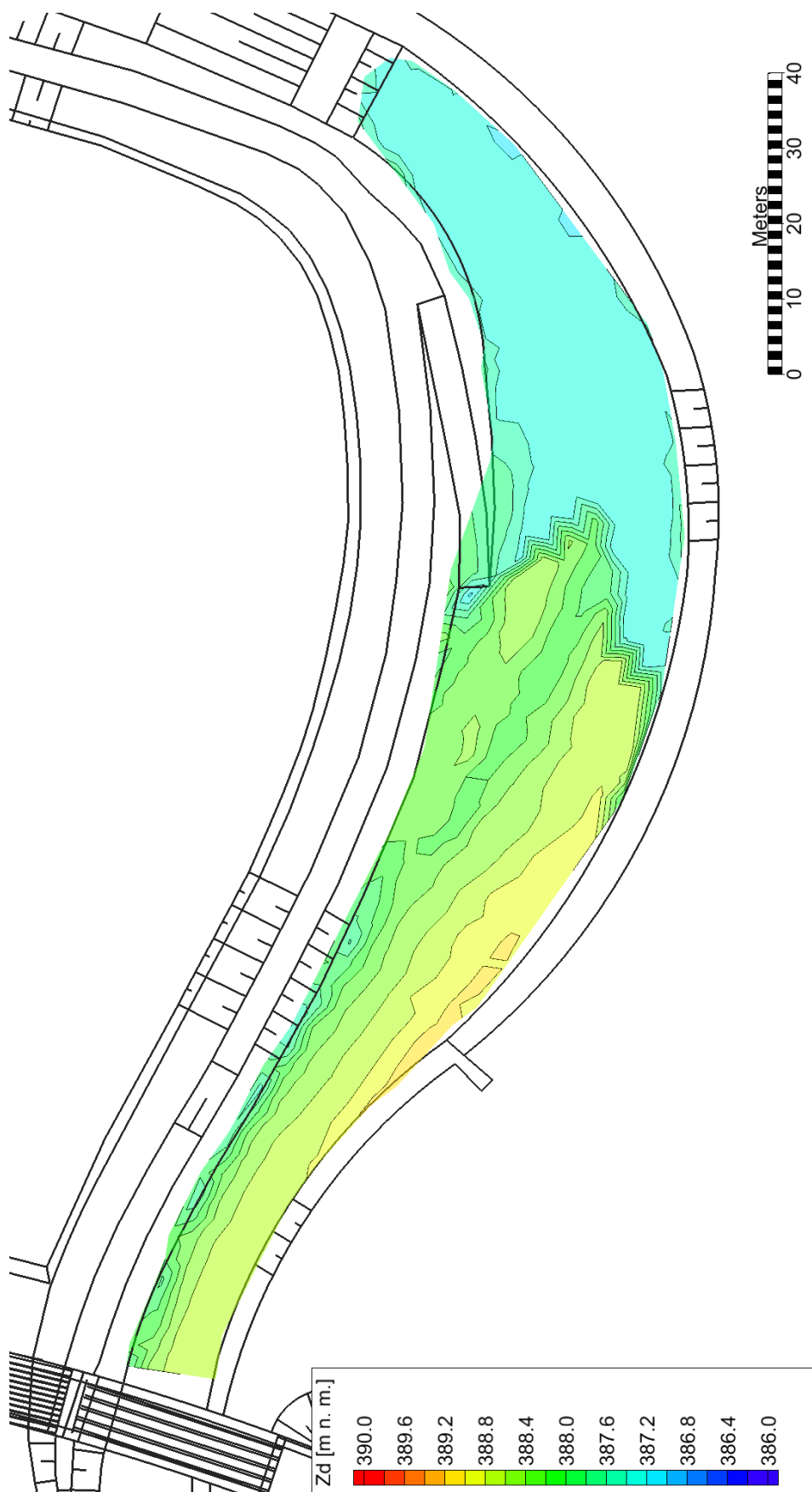
Veškeré dnové splaveniny se usadily v UPDS.



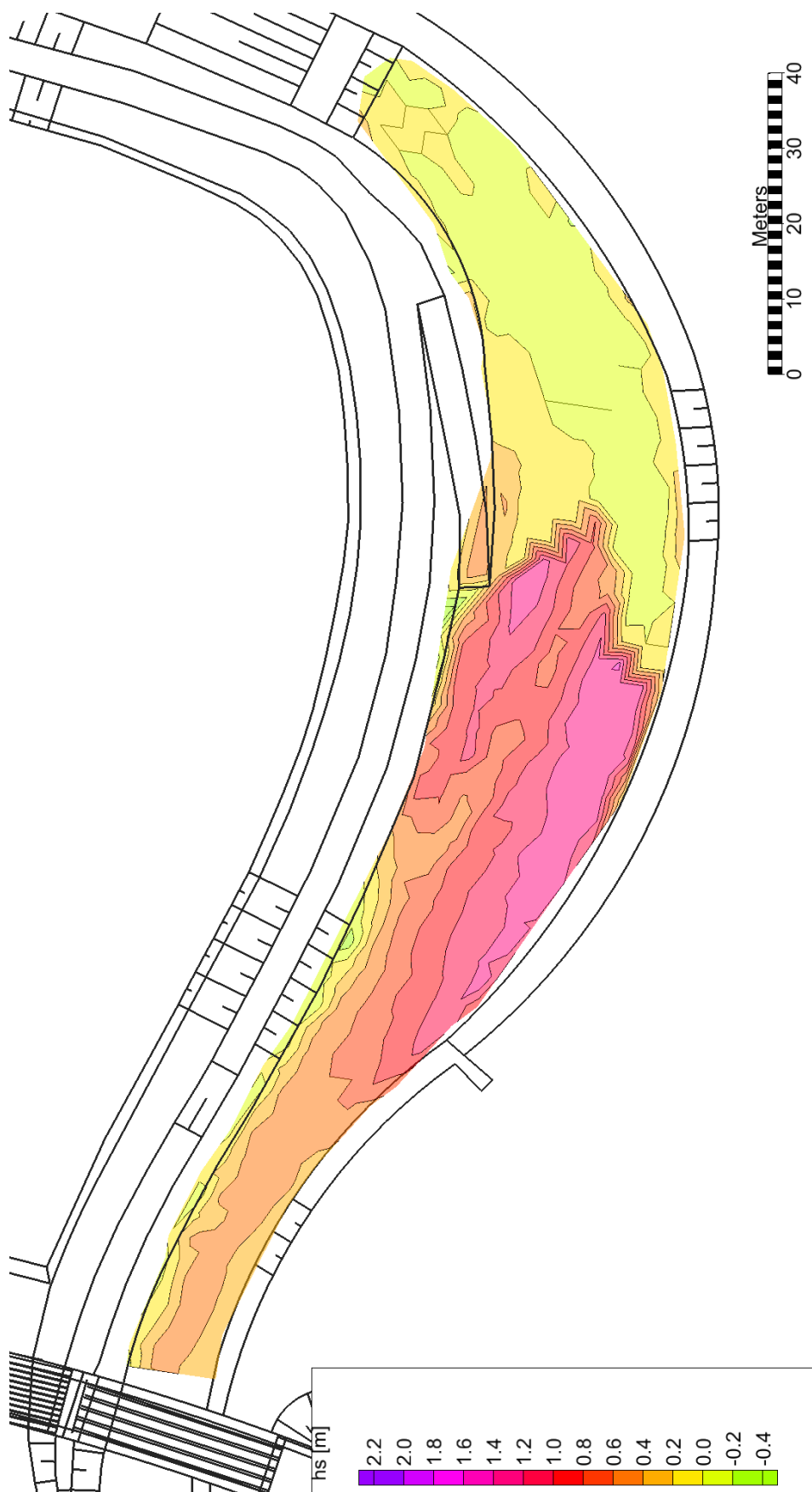
Obr. 75 PV₁₀, průběh dávkování splavenin



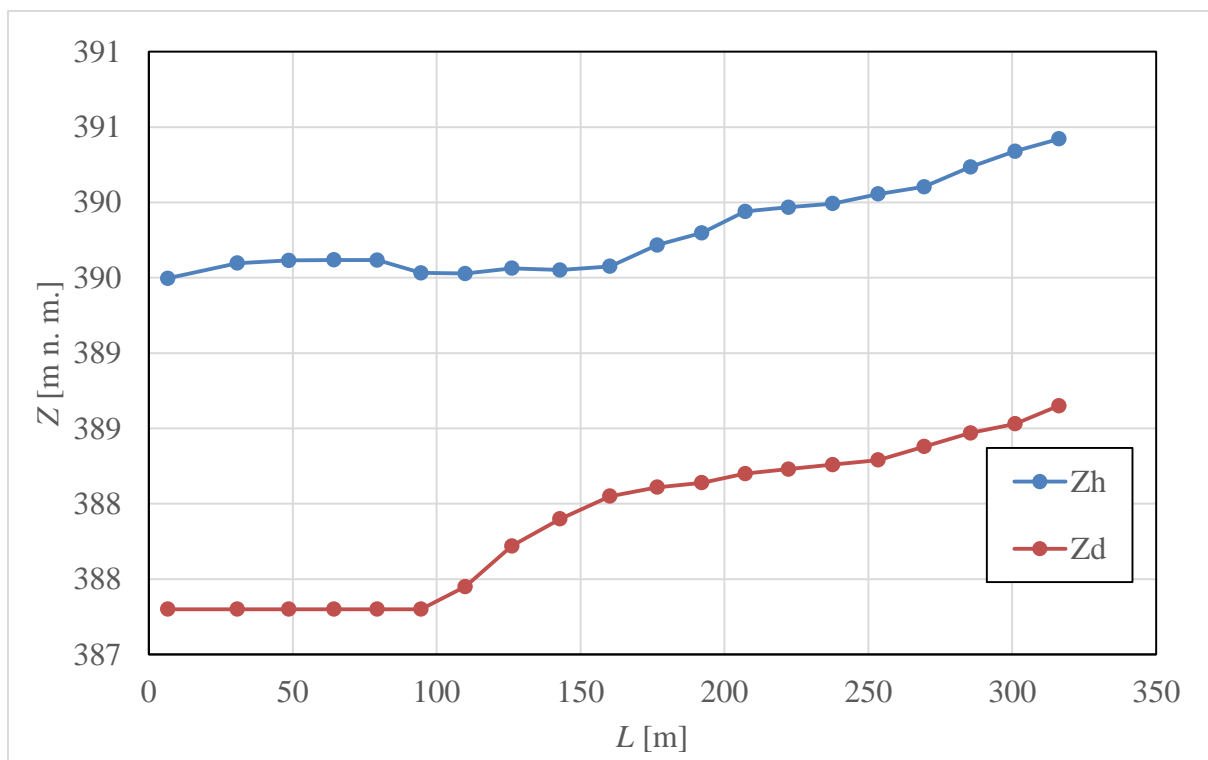
Obr. 76 PV₁₀, proudění při kulminačním průtoku



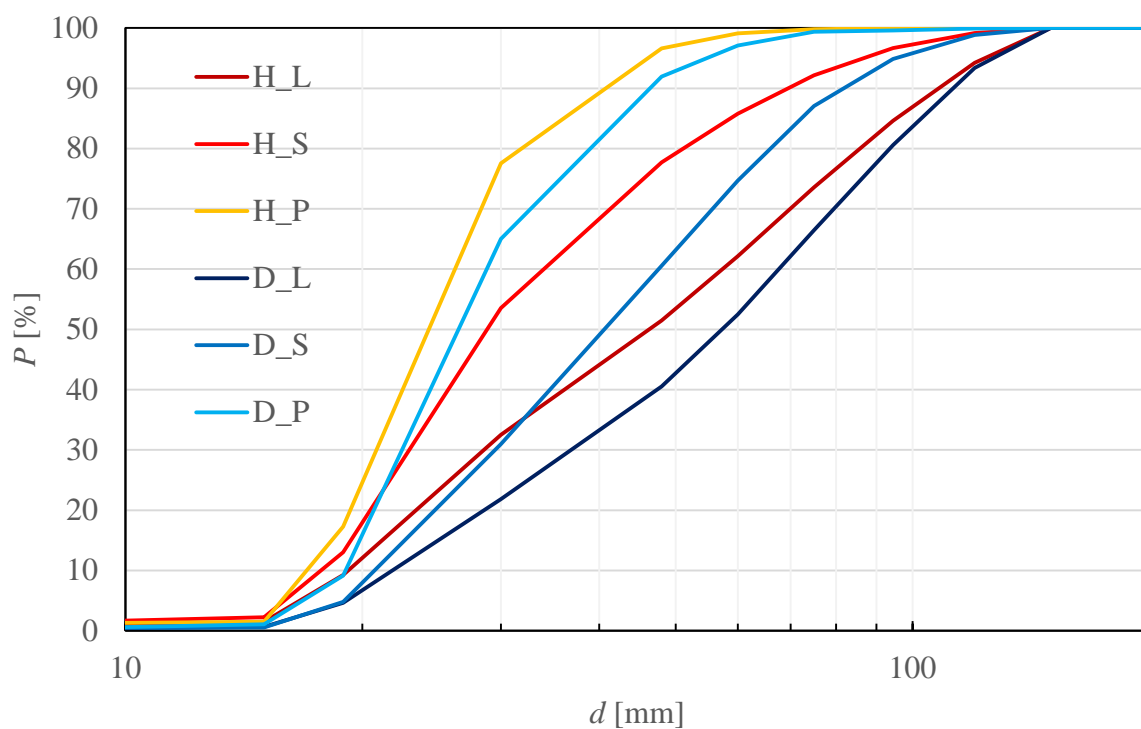
Obr. 77 PV₁₀, úroveň dna po PV



Obr. 78 PV₁₀, tloušťka usazenin



Obr. 79 PV₁₀, úroveň hladiny při kulminačním průtoku



Obr. 80 PV₁₀, zrnitost usazenin

10.2.3. PV₂₀

Postup při experimentu s PV₂₀ je popsán v úvodní pasáži podkapitoly.

Hydrogram PV₂₀ zobrazuje Obr. 45.

Průběh dávkování splavenin zobrazuje Obr. 81.

Proudění při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 82.

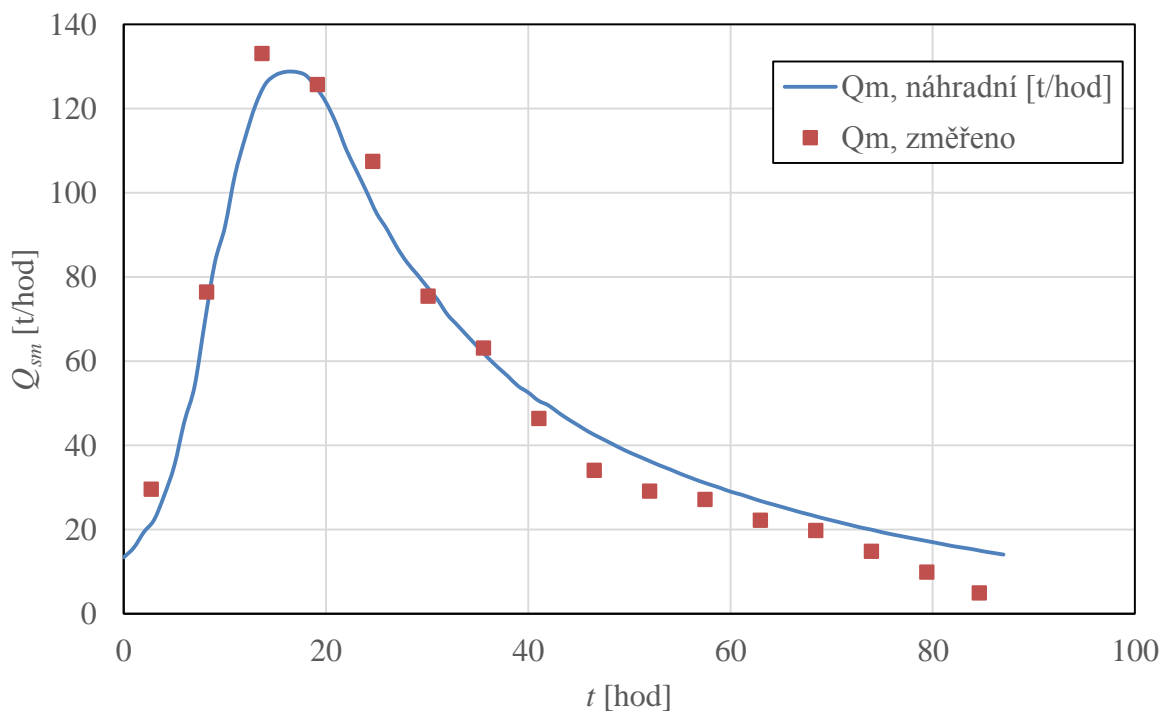
Průběh úrovně hladiny při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 85.

Úroveň dna po PV zobrazuje Obr. 83.

Tloušťku usazenin v UPDS zobrazuje Obr. 84.

Zrnitost usazenin zobrazuje Obr. 86

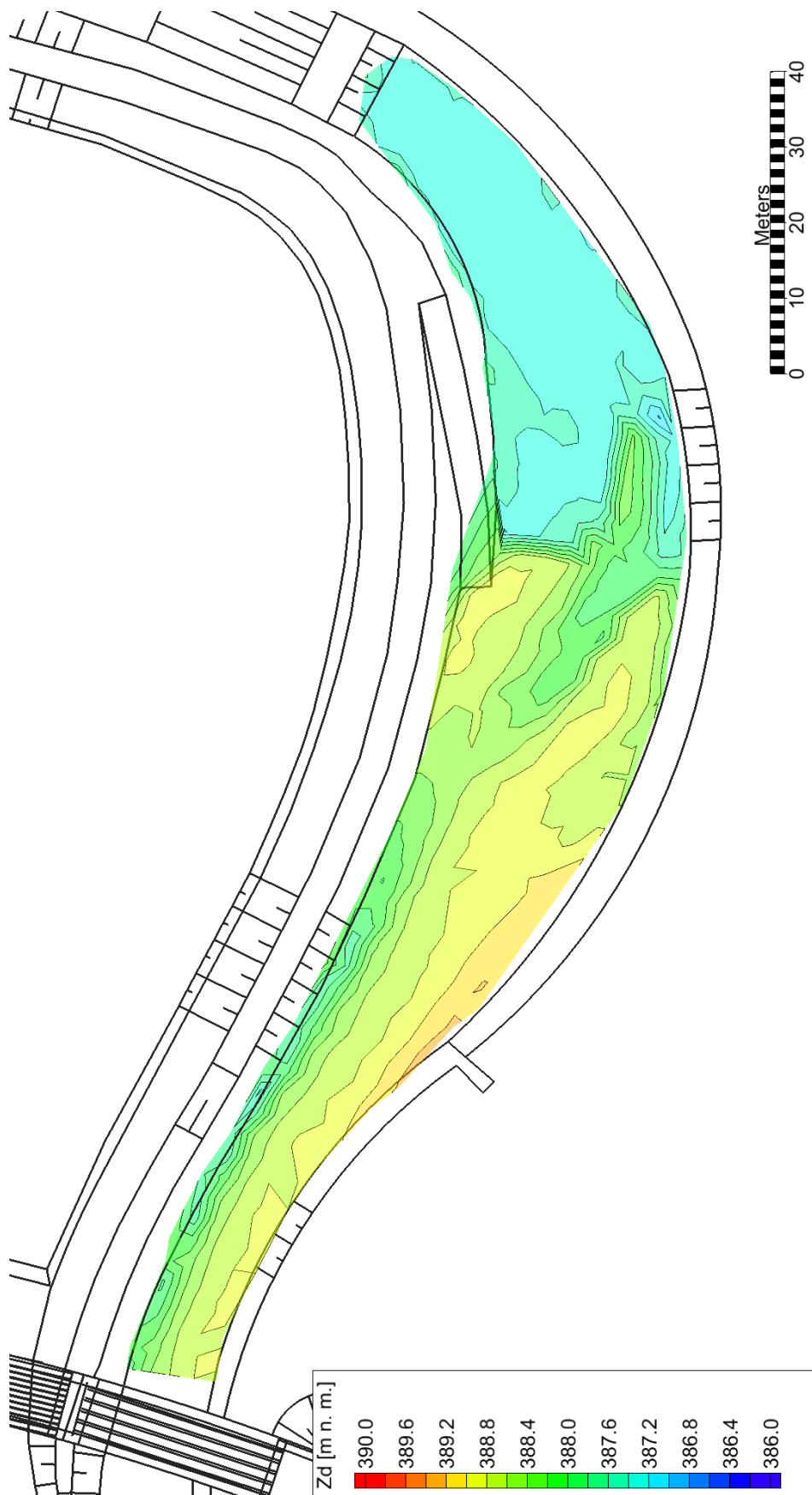
Veškeré dnové splaveniny se usadily v UPDS.



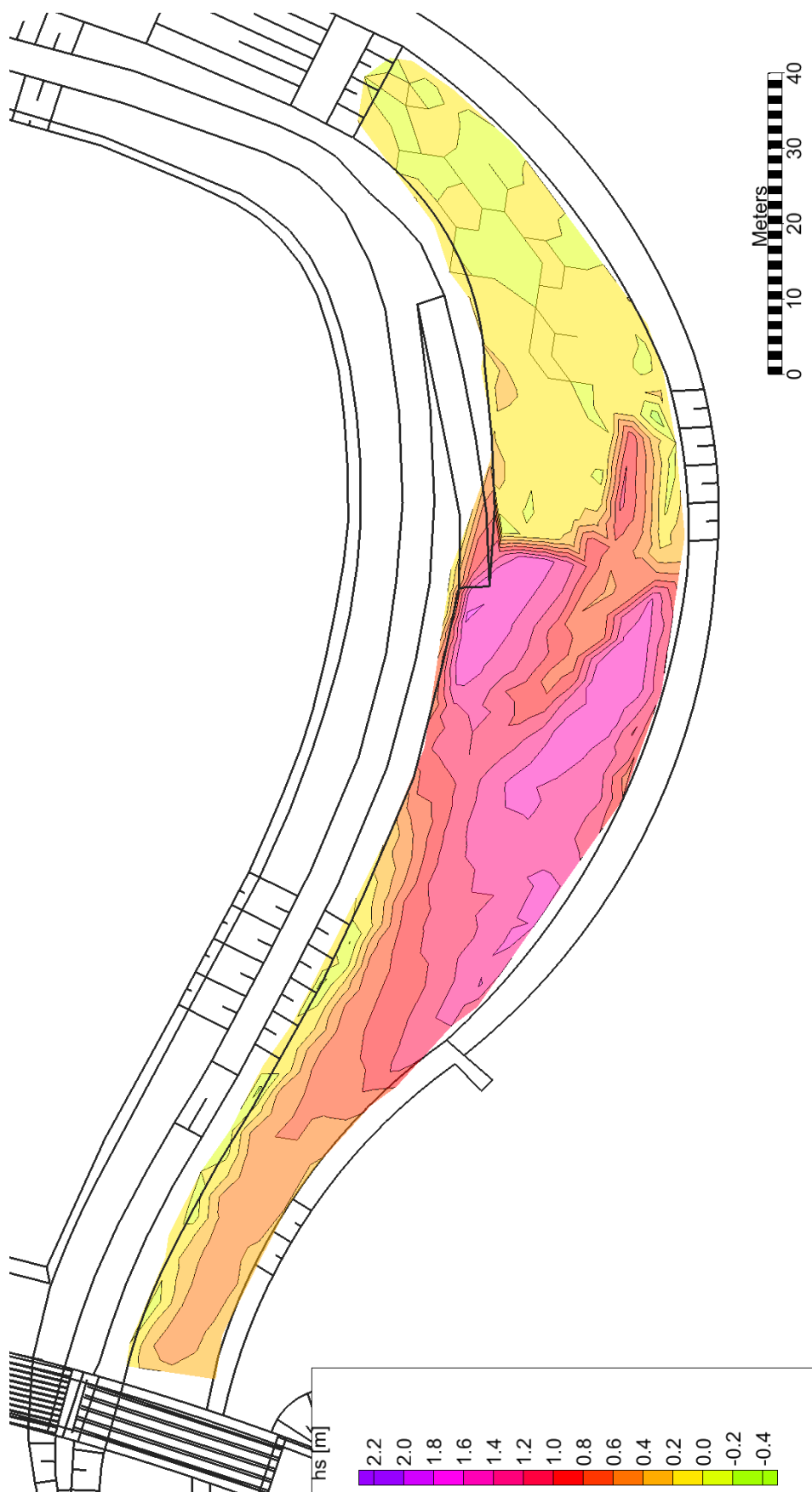
Obr. 81 PV₂₀, průběh dávkování splavenin



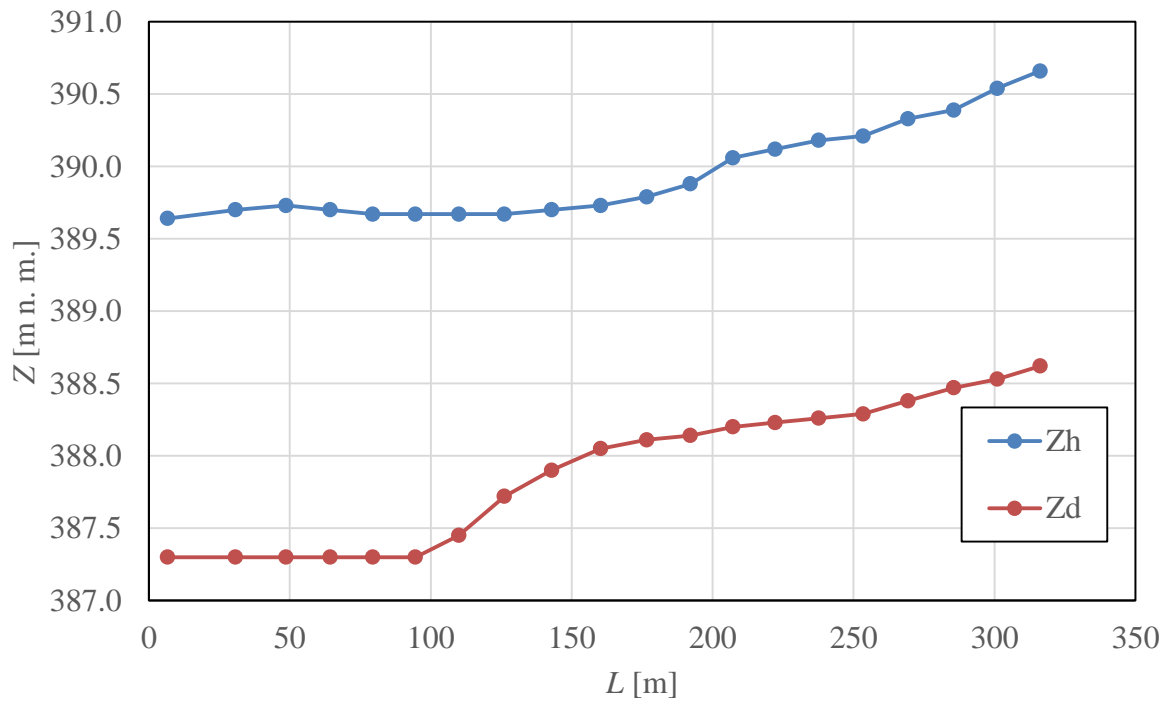
Obr. 82 PV₂₀, proudění při kulminačním průtoku



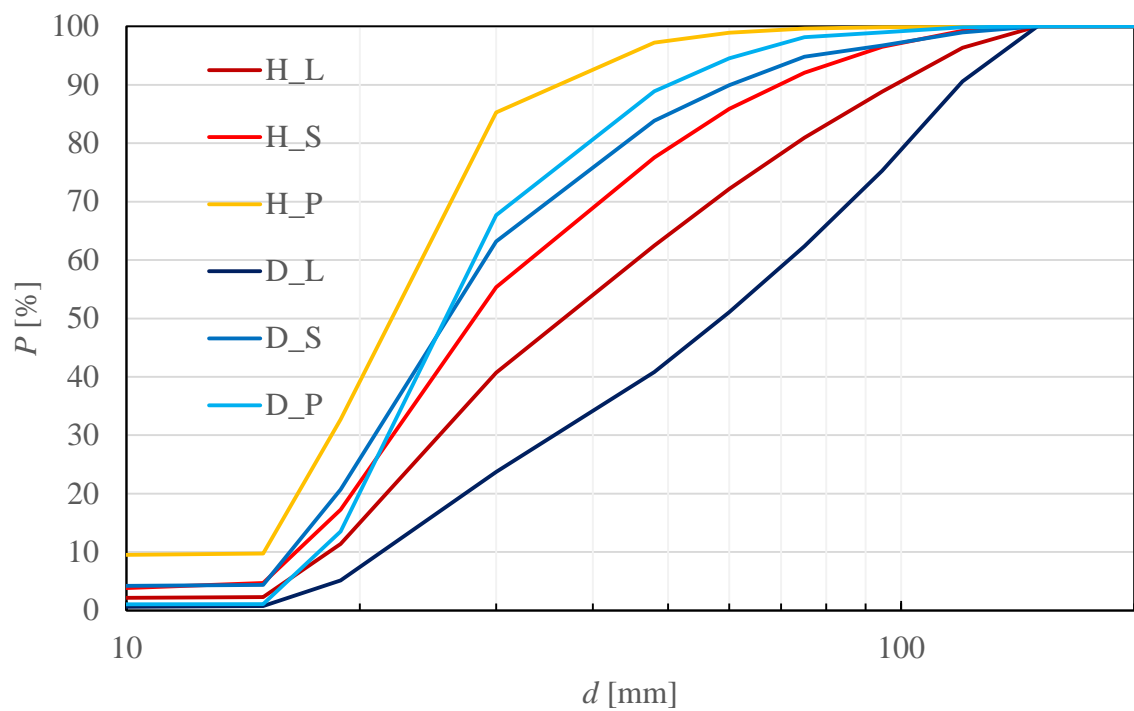
Obr. 83 PV₂₀, úroveň dna po PV



Obr. 84 PV₂₀, tloušťka usazenin



Obr. 85 PV₂₀, úroveň hladiny při kulminačním průtoku



Obr. 86 PV₂₀, zrnitost usazenin

10.2.4. PV₅₀

Postup při experimentu s PV₅₀ je popsán v úvodní pasáži podkapitoly.

Hydrogram PV₅₀ zobrazuje Obr. 45.

Průběh dávkování splavenin zobrazuje Obr. 87.

Proudění při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 88.

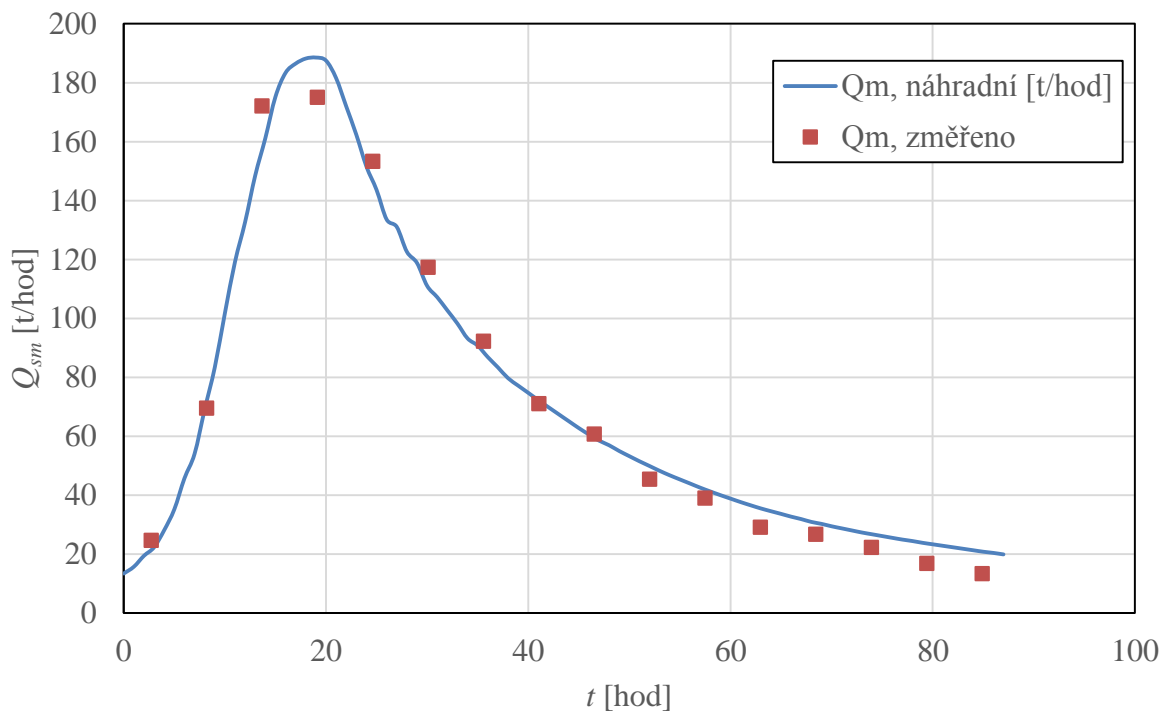
Průběh úrovně hladiny při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 91.

Úroveň dna po PV zobrazuje Obr. 89.

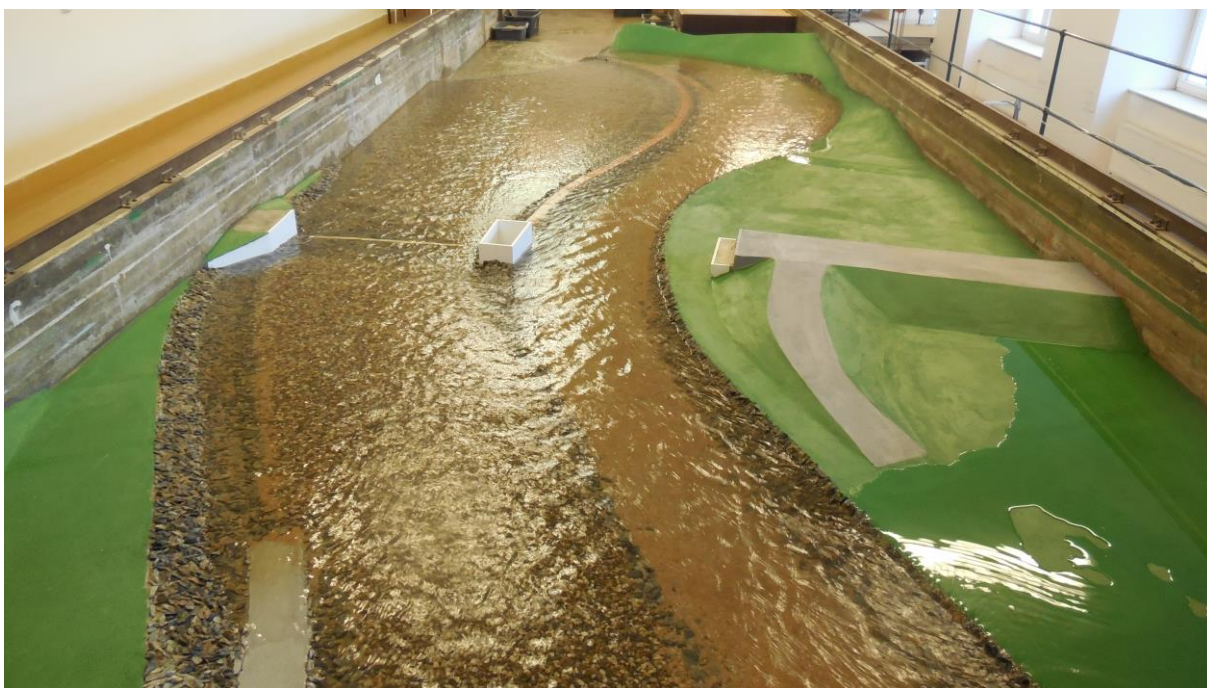
Tloušťku usazenin v UPDS zobrazuje Obr. 90.

Zrnitost usazenin zobrazuje Obr. 92

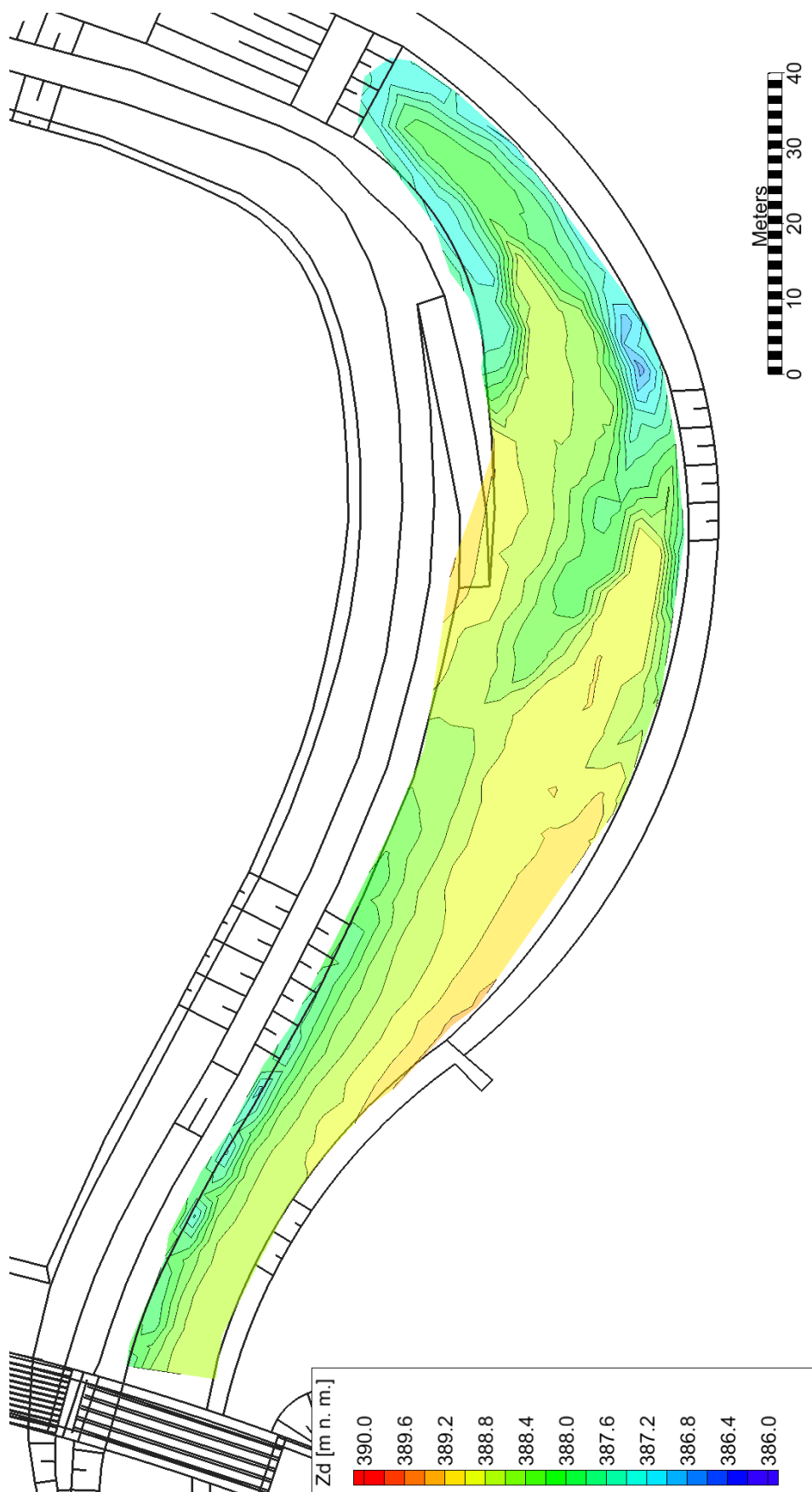
Veškeré dnové splaveniny z dávkování se usadily v UPDS. Cca 40 t materiálu na prototypu bylo proudem odneseno při třídění zrn ze dna v místě přelivu UPDS.



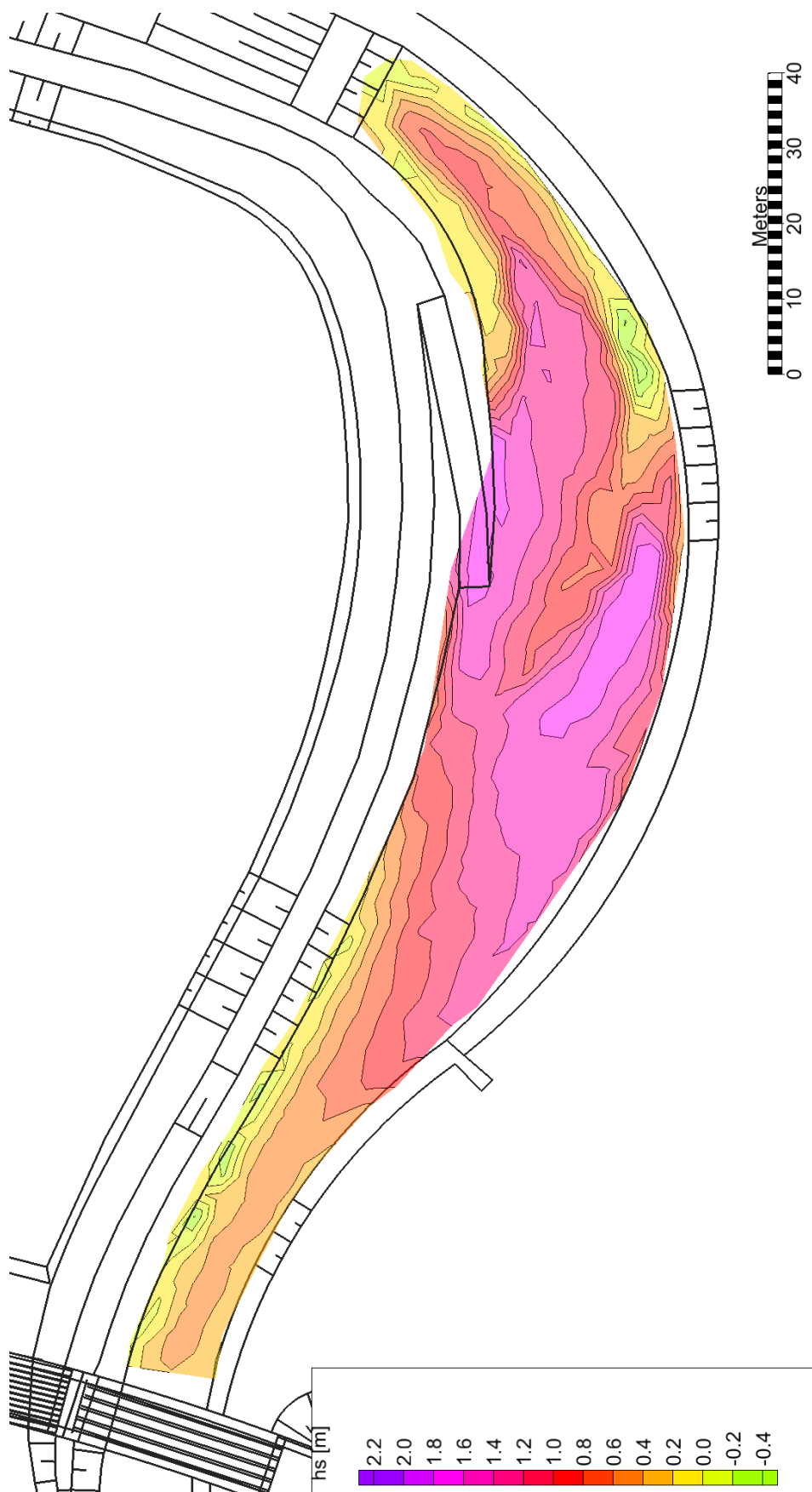
Obr. 87 PV₅₀, průběh dávkování splavenin



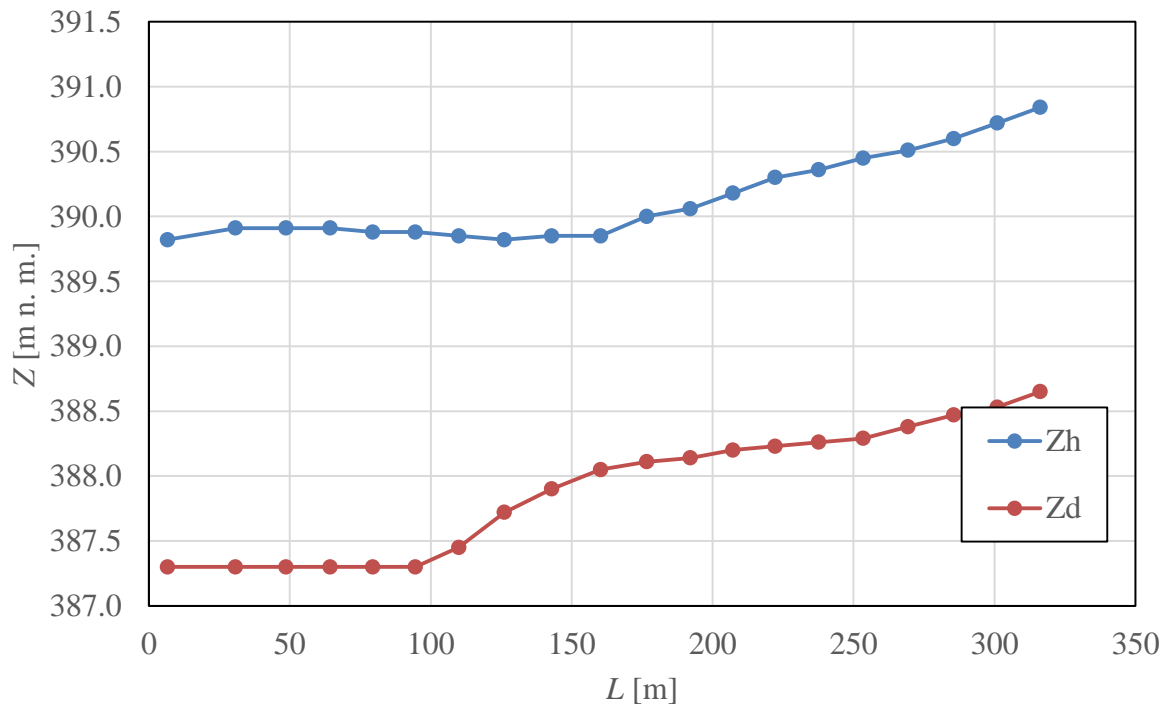
Obr. 88 PV₅₀, proudění při kulminačním průtoku



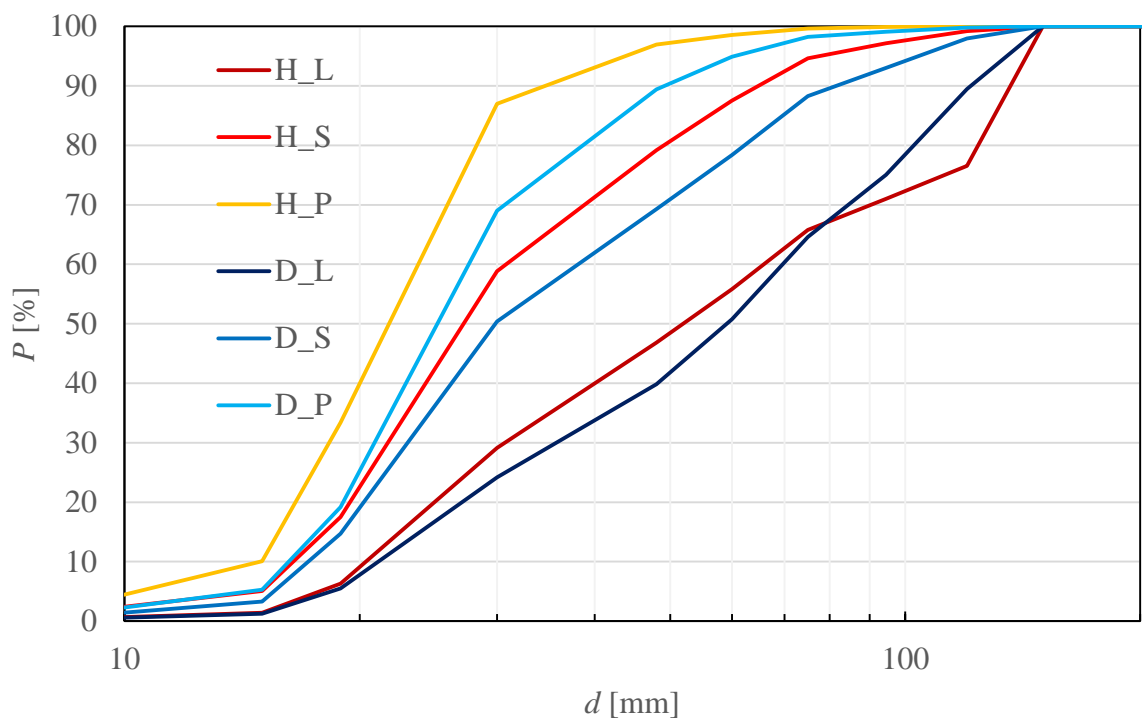
Obr. 89 PV₅₀, úroveň dna po PV



Obr. 90 PV₅₀, tloušťka usazenin



Obr. 91 PV₅₀, úroveň hladiny při kulminačním průtoku



Obr. 92 PV₅₀, zrnitost usazenin

10.2.5. PV₁₀₀

Postup při experimentu s PV₅ je popsán v úvodní pasáži podkapitoly.

Hydrogram PV₅ zobrazuje Obr. 45.

Průběh dávkování splavenin zobrazuje Obr. 93.

Proudění při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 94. Obr. 69

Průběh úrovně hladiny při kulminačním průtoku zobrazuje Obr. 97.

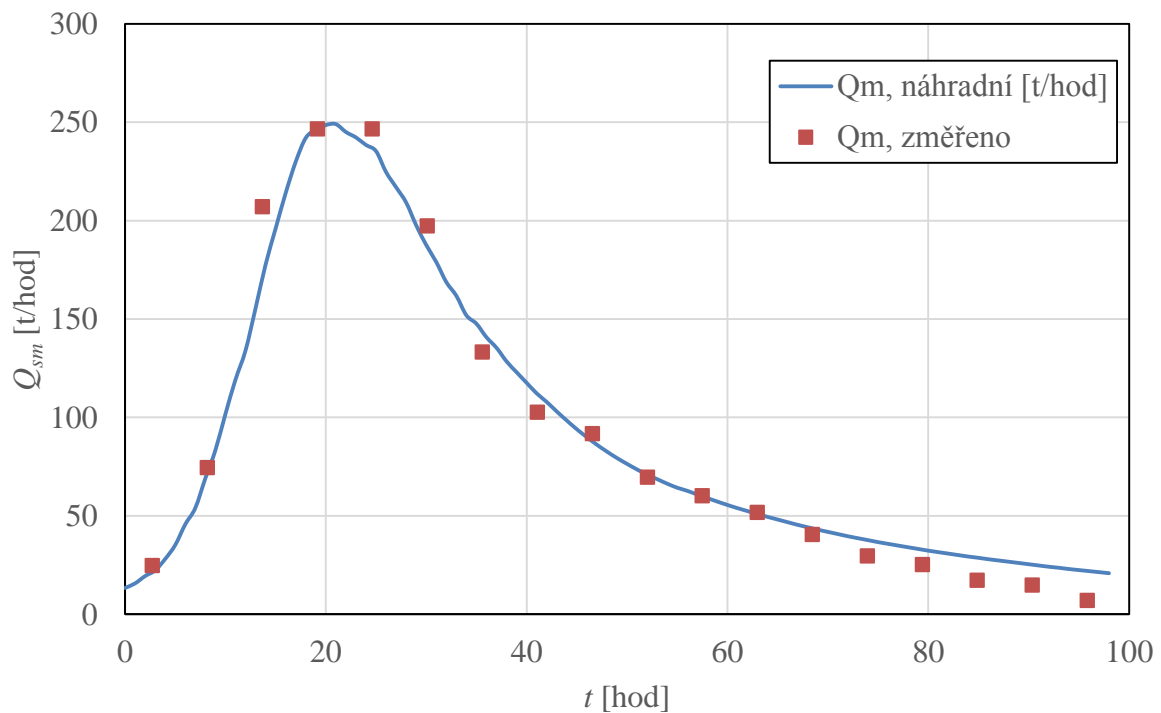
Úroveň dna po PV zobrazuje Obr. 95.

Tloušťku usazenin v UPDS zobrazuje Obr. 96.

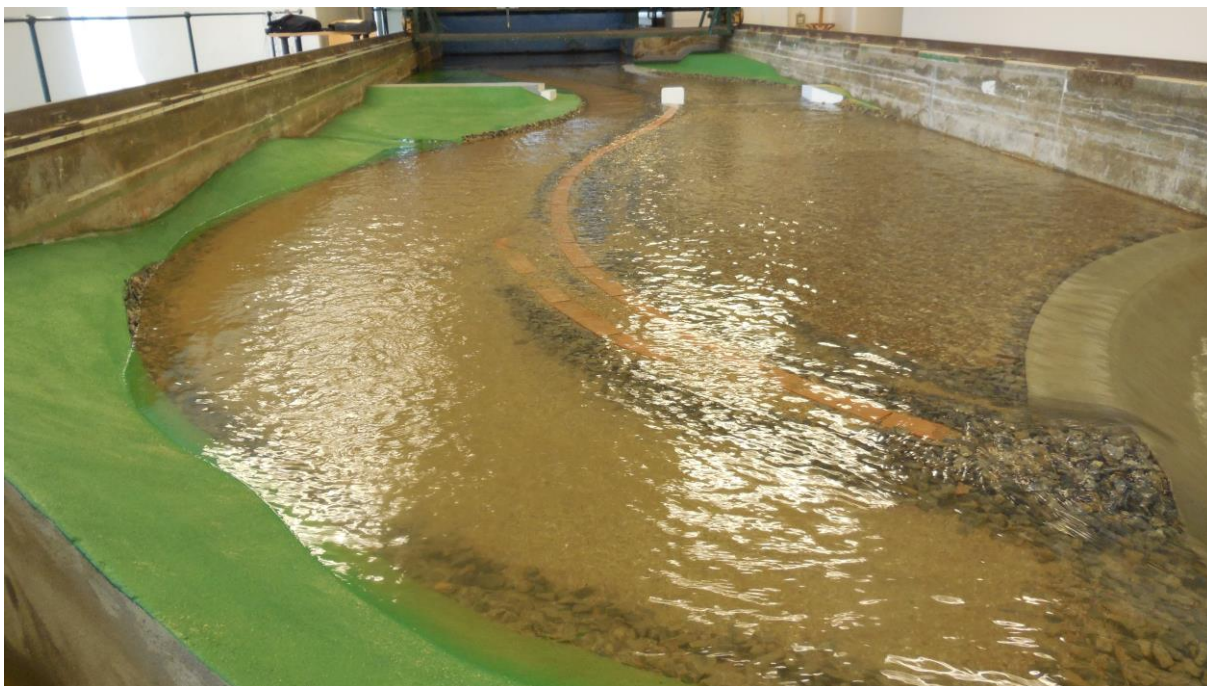
Zrnitost usazenin zobrazuje Obr. 98

Z UPDS bylo odneseno proudem vody cca 891 t materiálu. Počátek odnosu materiálu z UPDS byl v čase 45 hodin.

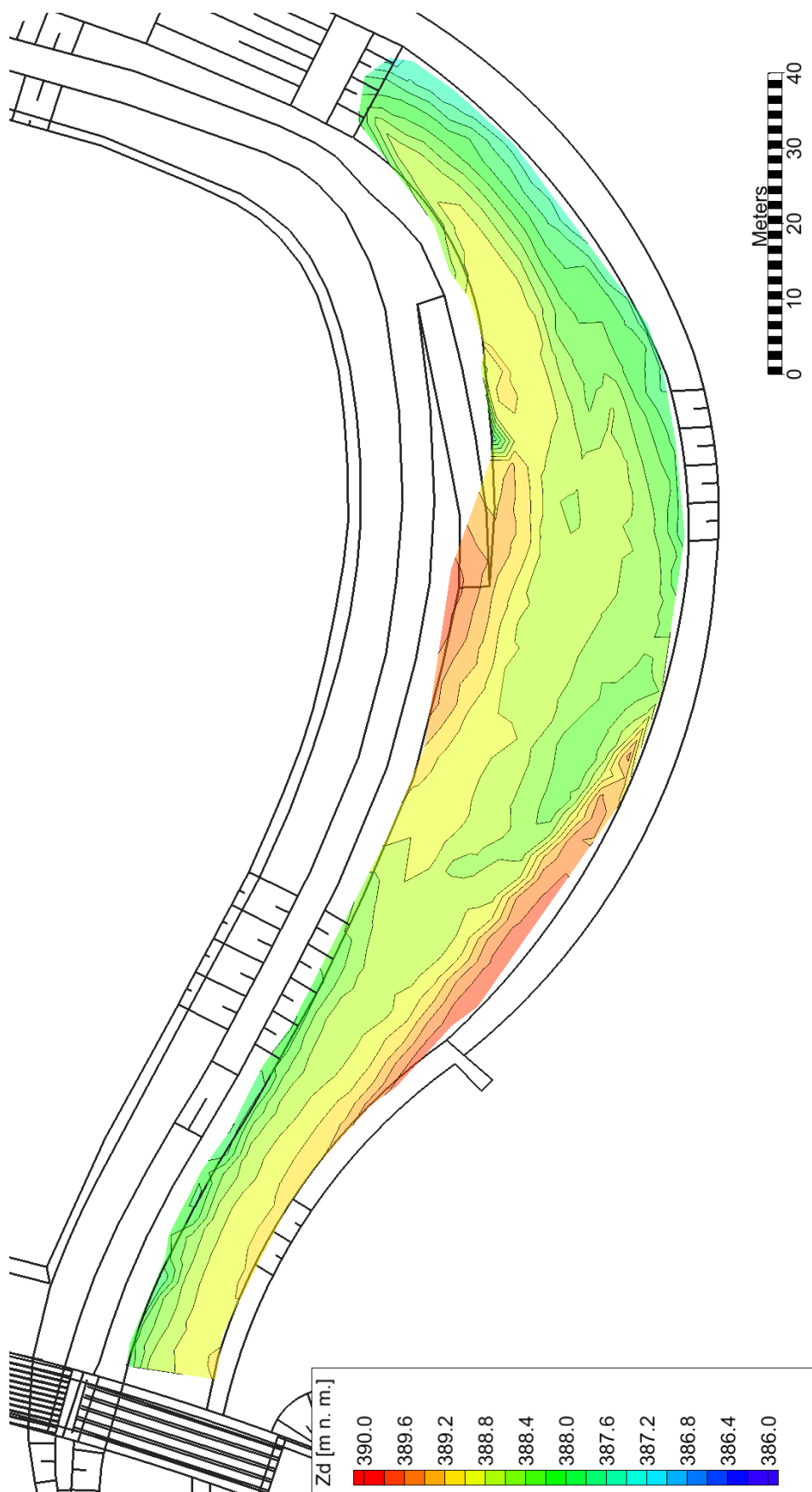
Část materiálu se dostala až do UPP.



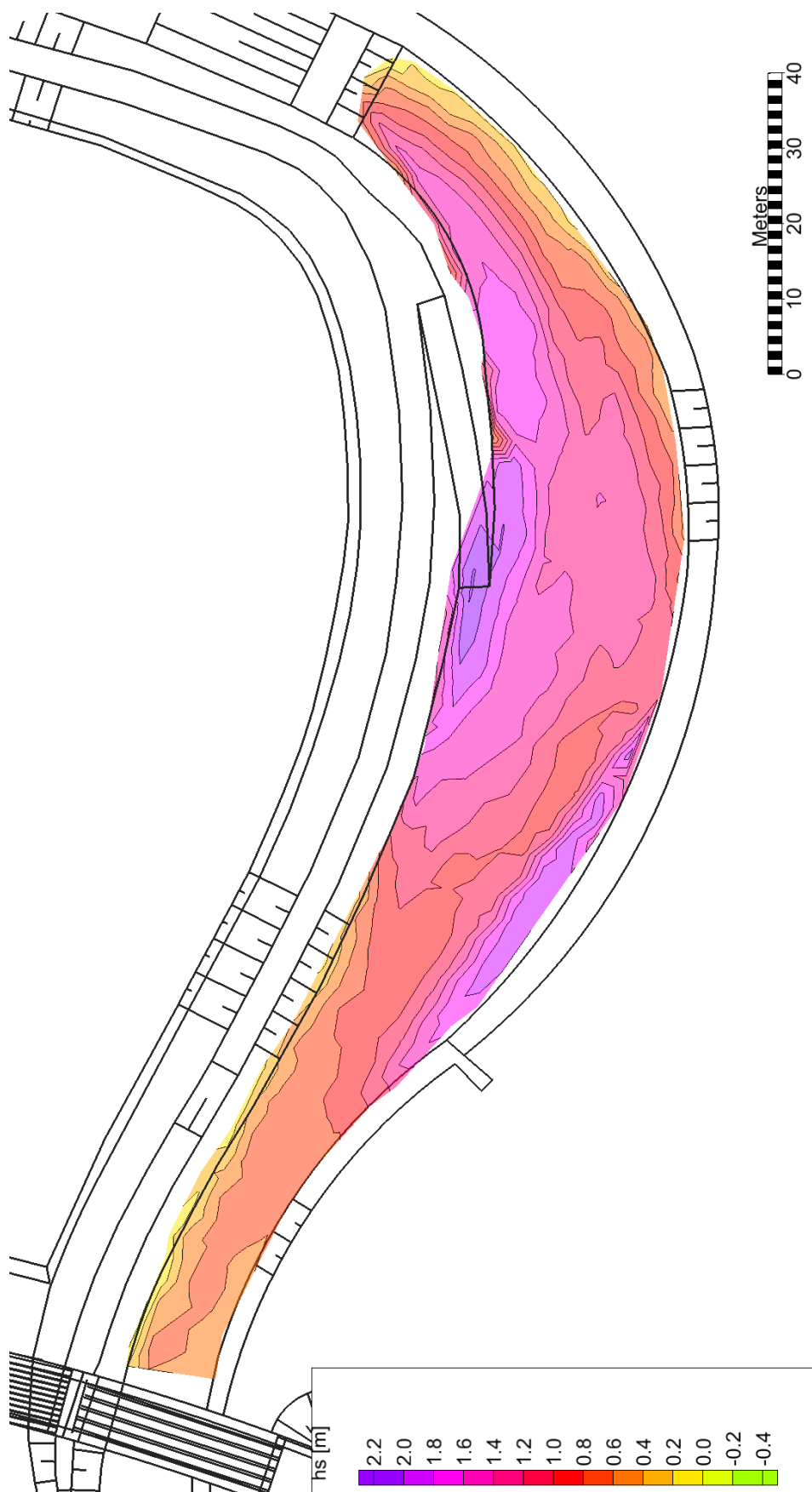
Obr. 93 PV₁₀₀, průběh dávkování splavenin



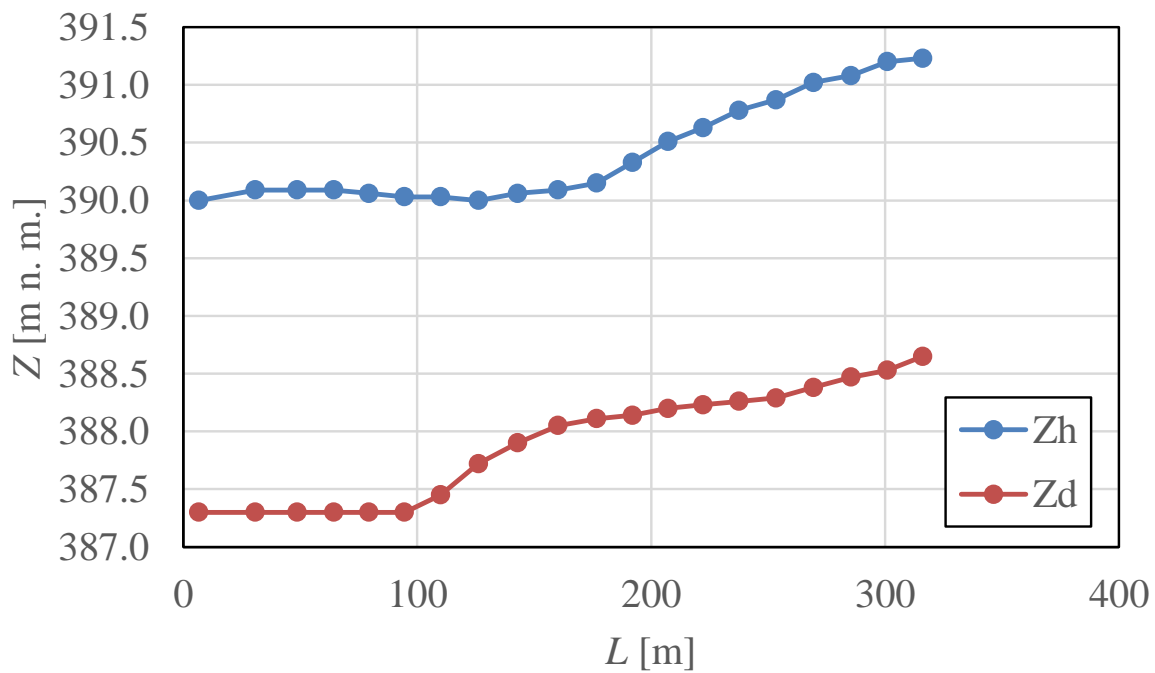
Obr. 94 PV₁₀₀, proudění při kulminačním průtoku



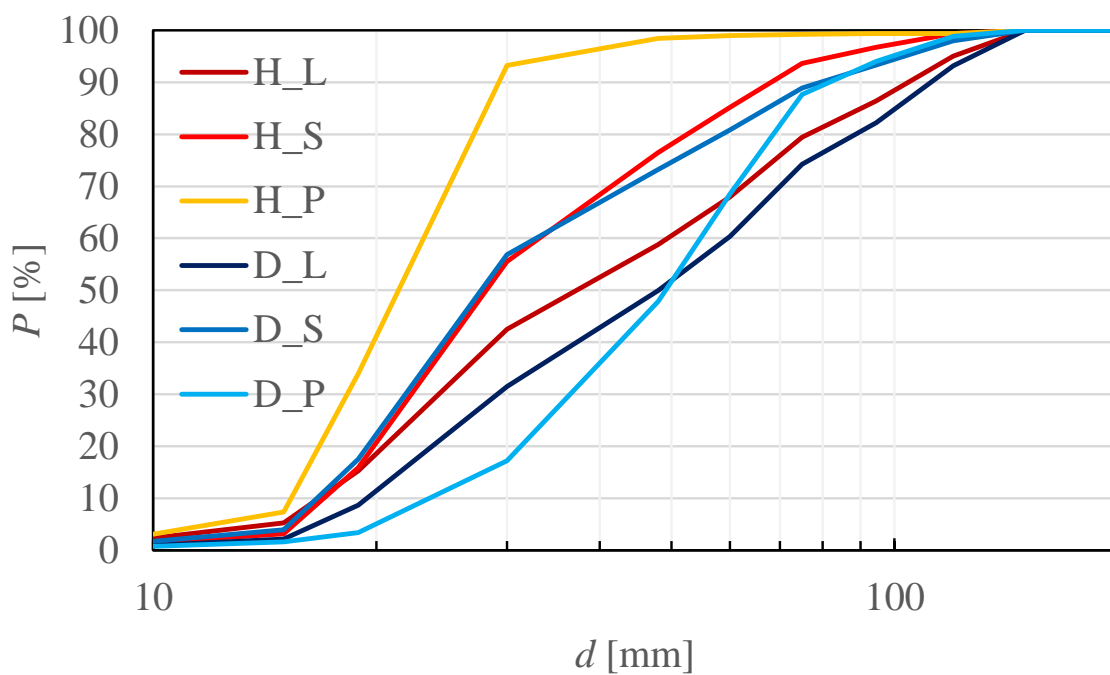
Obr. 95 PV₁₀₀, úroveň dna po PV



Obr. 96 PV₁₀₀, tloušťka usazenin



Obr. 97 PV₁₀₀, úroveň hladiny při kulminačním průtoku



Obr. 98 PV₁₀₀, zrnitost usazenin

10.2.6. Vyhodnocení zanášení UPDS

Při zanášení UPDS dochází k vytvoření čela nánosů (Obr. 99), které se v čase postupně pohybuje směrem k přelivu UPDS. Čelo je ostře ohraničené, jeho výška je závislá na průtokovém stavu. Maximální výšky dosahuje při kulminačním průtoku (nejvyšší poloze hladiny v UPDS). V místě čela dochází k sesuvům usazenin se separací zrn. Velká zrna se usazují nejnižší a malá zrna nejvýše.

Čelo se při vzestupné větvi hydrogramu PV šíří nejdříve v blízkosti dělicí hráze prostorů, kde u zvýšené části dělicí hráze proud vymílá hrubozrnné usazeniny, v blízkosti sjezdu se usazují. Při sestupné větvi se nános rozšiřuje směrem k pravému břehu. Zde se usazují především malá zrna. Při zmenšení průtoku na cca Q_5 až Q_2 (v závislosti na PV) dochází vymíláním nánosů k vytváření nového koryta, které vzniká přibližně ve střední části prostoru.

Separace zrn po příčném profilu je značná. Při menších PV je významnější, než při větších PV a zároveň v profilu H je separace významnější, než v profilu D.

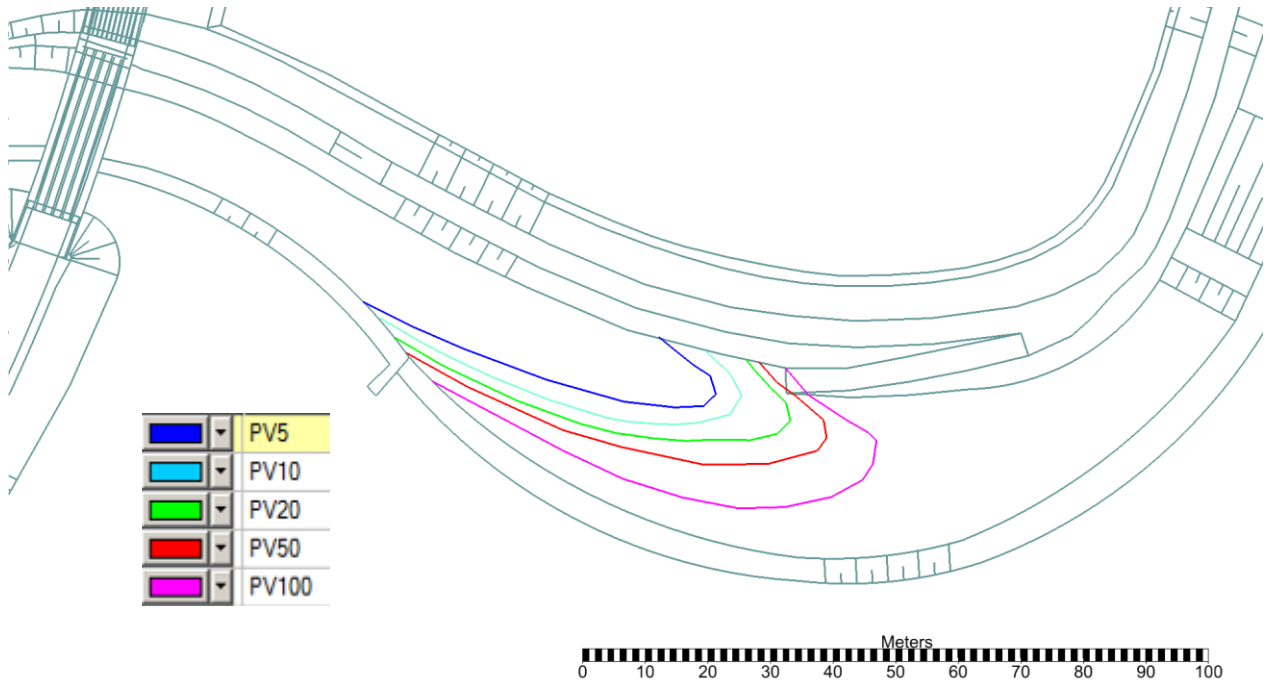


Obr. 99 Čelo nánosů po PV_5

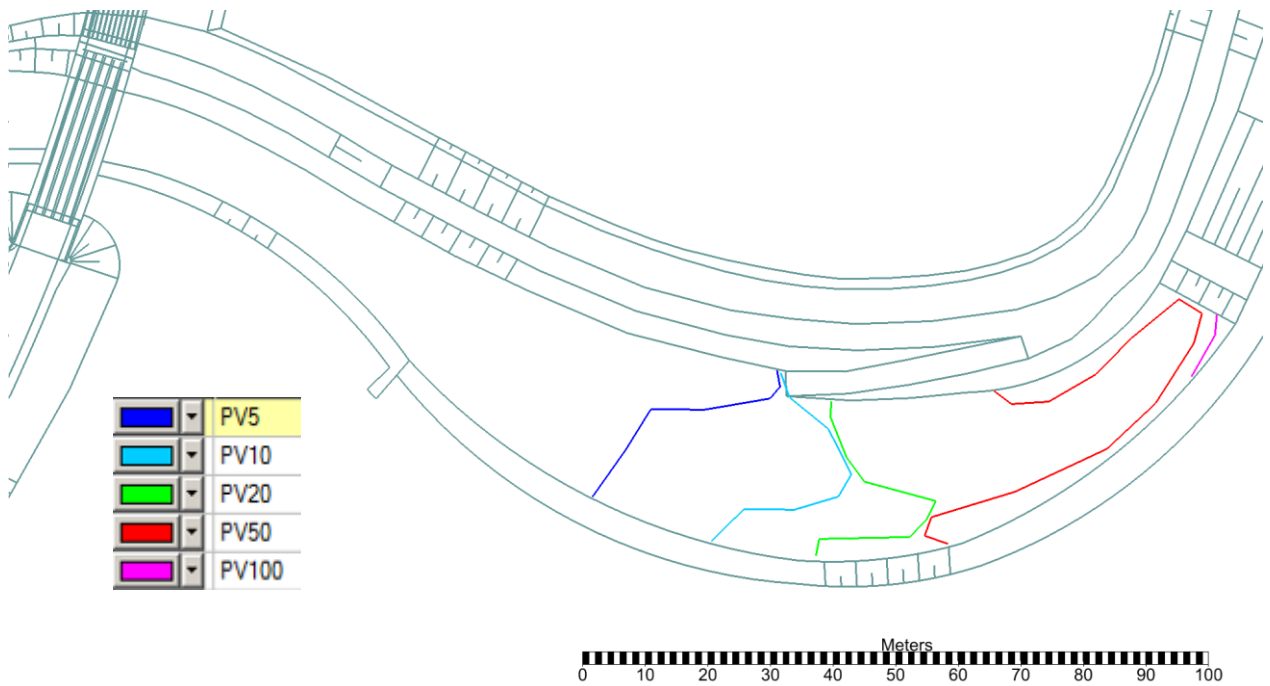
Vyhodnocení zanášení UPDS je provedeno pro všechny zkoušené PV a pro dva stavy. První stav odpovídá kulminaci průtoku, je zobrazený na Obr. 100 a druhý stav odpovídá konci PV a je zobrazený na Obr. 101.

Z Obr. 100 je zřejmé, že všechny splaveniny se při vzestupné větvi hydrogramu PV usadí v UPDS. Zanesou ho maximálně do 50 %. Trasování čela nánosů je od konce sjezdu do UPDS až po vyústění pravobřežního potoka. Půdorysně je zakřivené s maximem dosahu cca v 1/3 šířky UPDS.

Z Obr. 101 je zřejmé, že v UPDS se prakticky usadí všechny dnové splaveniny zkoušené na modelu až do PV_{50} . Při PV_{100} dojde k odnosu části usazeného materiálu v UPDS způsobeného především vznikem nového koryta.



Obr. 100 Poloha čela nánosů při kulminaci PV



Obr. 101 Poloha čela nánosů po PV

11. Chování koryta pod prostorem pro usazování dnových splavenin

Vliv UPDS na průtok splavenin níže po toku až do nádrže je významný. Dojde k přerušení transportu dnových splavenin až do PV_{50} . Prakticky veškerý materiál dnových splavenin se zrn většími než 15 mm se v UPDS usadí. Níže po toku dojde ke vzniku hladové vody.

Rozsah úseku se vznikem hladové vody bude dán spádovým objektem UPDS až po profil, kde bude v dané chvíli zasahovat vzduť hladina v nádrži.

Koryto bude třeba stabilizovat tak, aby nedocházelo ke vzniku vymílání. Následkem vymílání by bylo významné zahlubování dna koryta a odnos vymletých splavenin do nádrže, kde by docházelo k jejich usazování a tím nežádoucímu zanášení nádrže.

Opatření se nabízí více:

- Mezi vhodná opatření lze zahrnout zmenšení kapacity koryta tak, aby počátek pohybu splavenin nastal až při významném vylití proudu vody mimo koryto do inundačního území. Zmenšení kapacity koryta by muselo být ve smyslu zmenšení hloubky, nikoliv ve smyslu zúžení.
- Mezi další vhodná opatření lze zahrnout stabilizaci dna materiálem, který je vůči průtoku dostatečně odolný. Provedení by mohlo být buď ve formě stabilizačních prahů, pak by vznikly stabilní výmoly mezi prahy, nebo ve formě zásypu brodových částí materiálem z UPDS, který není vhodný k ukládání do VP. Opět tak vzniknou stabilní výmoly v podobě tůní se stabilními brody.
- Další možností je trasování málo kapacitního koryta mimo hlavní proud při průtocích, které vyvolávají pohyb dnových splavenin. V daném případě by hlavní proud vody protékal územím s vegetací s velkým hydraulickým odporem a relativně stabilním povrchem.
- Možností je také rozdělení koryta na několik menších koryt, u kterých by byla zvětšena významně délka, což by způsobilo zmenšení jejich podélného sklonu a tím ke zmenšení tečného napětí na dně.

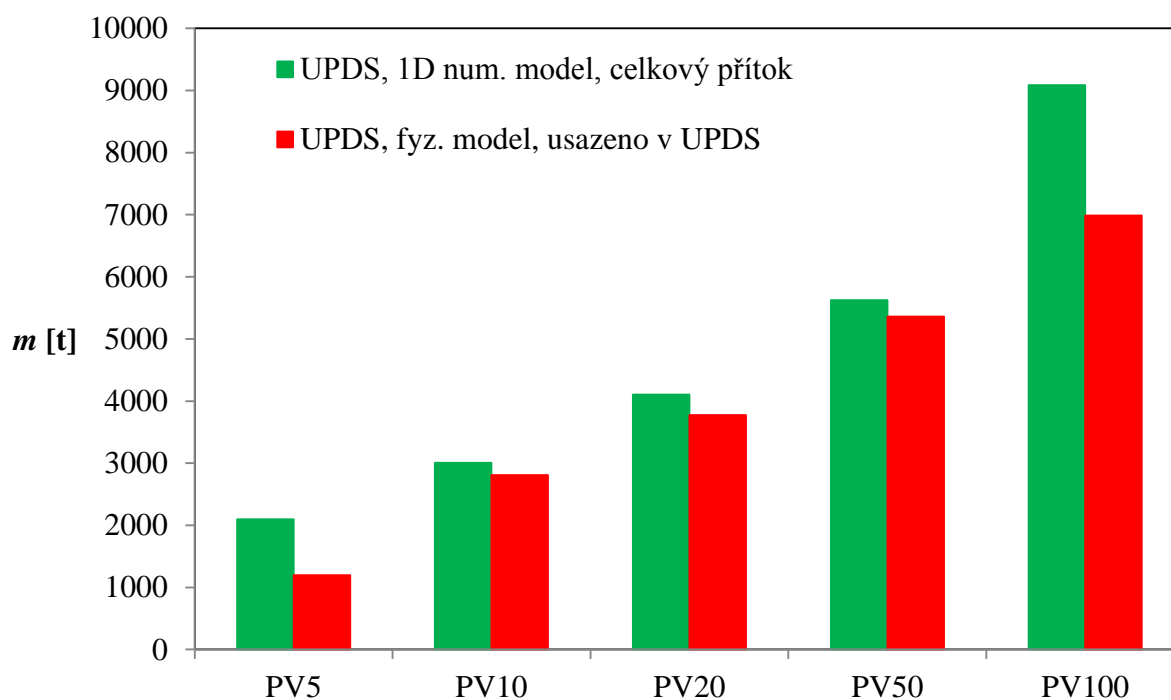
Vzhledem k tomu, že území je vymezeno pro biologické funkce, je nutné při návrhu případných opatření pro zabránění vymílání spolupracovat s odborníky z dané oblasti.

12. Zhodnocení a doporučení

12.1. Zhodnocení návrhu UPDS

Zhodnocení návrhu UPDS je provedeno pro všechny zkoušené PV.

Jako první je provedeno zhodnocení numericky a fyzikálně stanovené hmotnosti splavenin. Porovnání 1D numerickým modelem stanovené hmotnosti transportovaného materiálu v místě nátoku do fyzikálního modelu s hmotností usazeného materiálu v UPDS na fyzikálním modelu je vyobrazeno formou grafu pro jednotlivé PV na Obr. 102. Před vlastní analýzou je třeba zdůraznit, že fyzikální model nezahrnuje zrna menší než 15 mm, numerický model ano. Z Obr. 102 vyplývá, že numerický model stanovuje mírně větší hodnoty průtoku splavenin, zvláště pak v případě malých průtoků, což je způsobeno právě absencí malých zrn na fyzikálním modelu. Při ostatních průtocích lze považovat shodu za velmi dobrou a poměrově vyváženou po PV.



Obr. 102 Porovnání numericky stanovené hmotnosti transportovaného materiálu PV na přítoku do modelu a hmotnosti usazenin v UPDS na fyzikálním modelu

Dále je provedeno zhodnocení účinnosti UPDS vyjádřené relativním poměrem hmotnosti usazených splavenin ku přiteklym.

V Tab. 5 je uvedena procentuální účinnost zachycení dnových splavenin v UPDS a rovněž procentuální vyjádření neusazených. Na Obr. 103 je vyhodnocení provedeno ve formě hmotností.

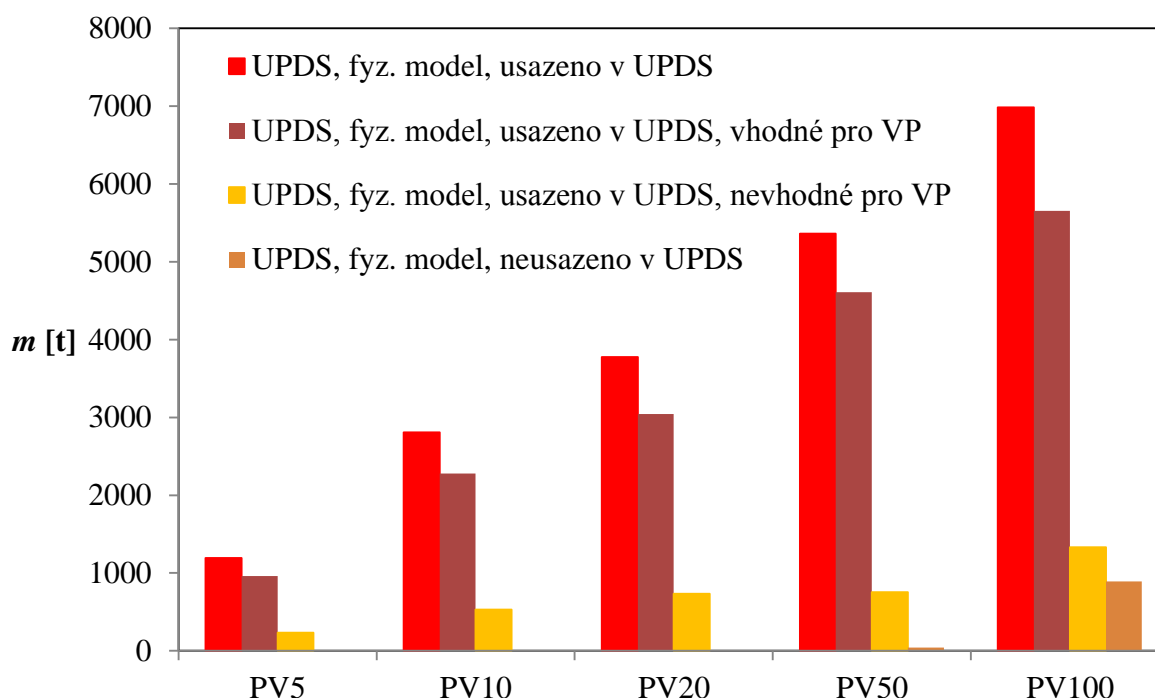
Z tabulky vyplývá, že UPDS je plně funkční prakticky až do PV₅₀.

Při PV₁₀₀ dochází k odnosu usazenin až při sestupné větvi hydrogramu PV, především při formování nového koryta v usazeninách UPDS.

Tab. 5 Účinnost UPDS

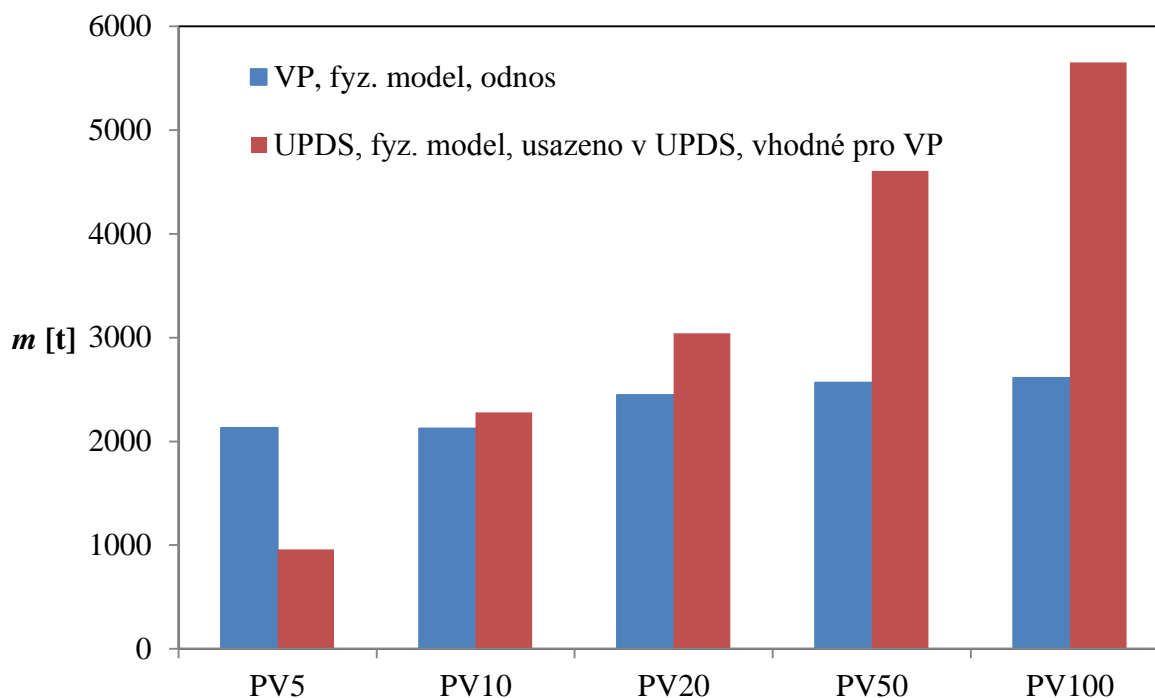
	Usazeno v UPDS	Neusazeno v UPDS
PV5	100 %	0 %
PV10	100 %	0 %
PV20	100 %	0 %
PV50	99 %	1 %
PV100	83 %	13 %

Velmi důležité pro zhodnocení návrhu UPDS je i stanovení hmotnosti materiálu vhodného pro přemístění do VP. Uvedené je provedeno formou grafu na Obr. 103. Z něj vyplývá, že poměr je přibližně stejný pro všechny PV a také, že z usazeného materiálu v UPDS bude pro VP vhodných cca 81 % a nevhodných bude cca 19%.



Obr. 103 Vyhodnocení usazování dnových splavenin v UPDS

Pro správnou funkci umělého transportu dnových splavenin je nezbytné, aby hmotnost usazenin v UPDS vhodná pro VP odpovídala hmotnosti usazenin, které je třeba do VP ukládat. Zmíněné je provedeno na Obr. 104. Z něj vyplývá, že se v UPDS při PV větších nebo rovných PV₁₀ usadí více materiálu, než je třeba ve VP, tedy v daném rozsahu nedojde k deficitu splavenin ve VP. Při PV₁₀ až PV₂₀ jsou hodnoty velmi blízké. Při PV₅₀ a PV₁₀₀ převyšuje přísun materiálu do UPDS nad potřebami VP. Uvedené je způsobeno návrhem VP na PV₂₀ a rozdílnými tvary PV v UPDS a VP (transformace PV VD Nové Heřminovy). Větší potřeba materiálu při PV₅ ve VP bude pravděpodobně způsobovat při první PV deficit, který se významně po vytvoření dnové dlažby ve VP zmenší. Z výše uvedeného vyplývá, že z dlouhodobého hlediska bude zásobování VP materiálem z UPDS zabezpečeno.



Obr. 104 Graf porovnání hmotnosti usazenin

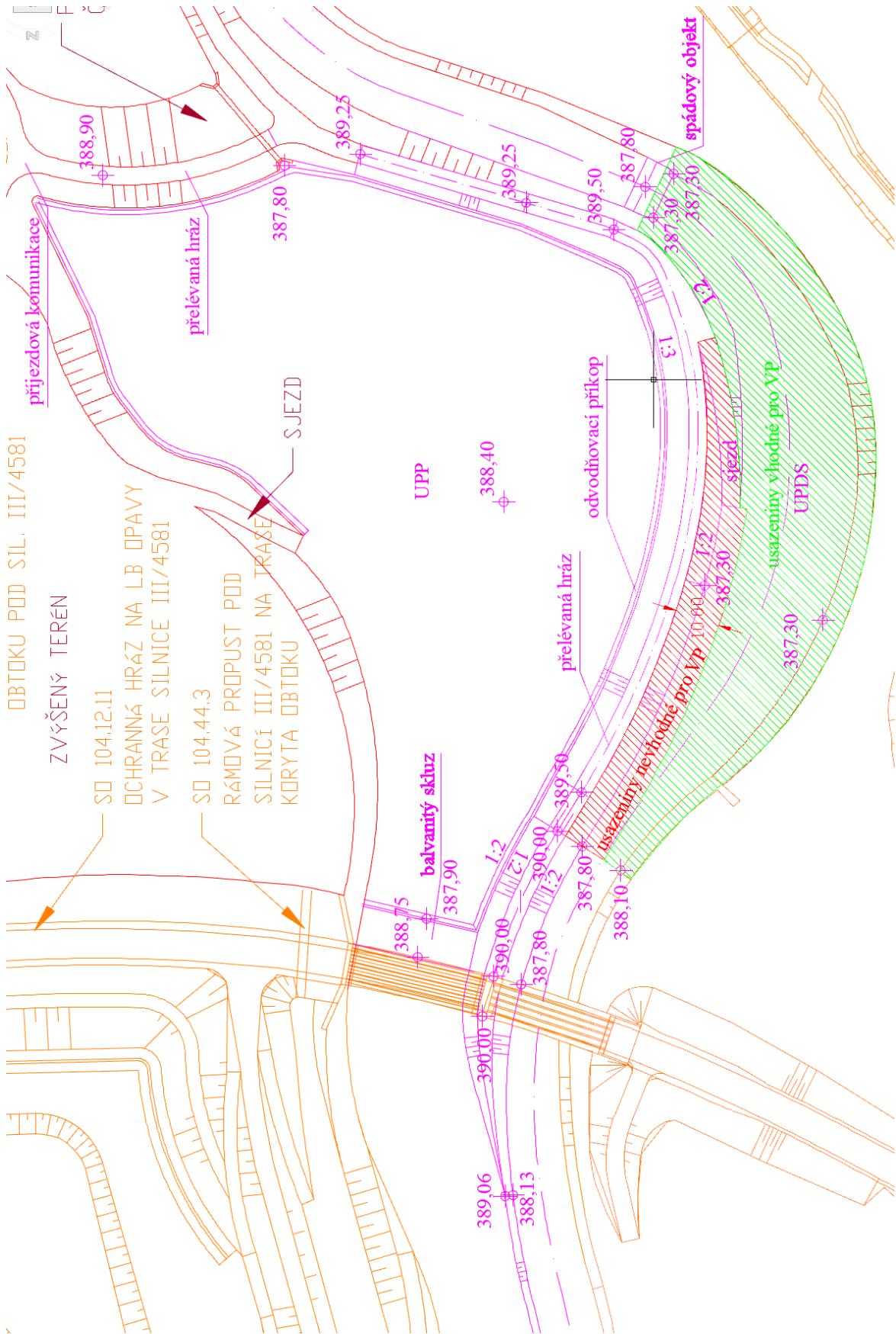
12.2. Doporučení

Na základě chování proudu vody, transportu splavenin deformací dna a opevnění lze doporučit následující:

- **Geometrie usazovacího prostoru:**

- Geometrický tvar obou prostorů provést dle Obr. 105. Doporučené změny oproti předběžnému návrhu jsou zobrazeny fialově.
- Vyhотовit UPS skládající se z UPDS a UPP z důvodu odlišné četnosti těžby usazenin, odlišné zrnitosti usazenin a přesné lokalizace nánosu usazenin v UPDS.
- Dělicí hráz mezi prostory provést s šířkou v koruně 4 m umožňující jízdu nákladním automobilům.
- Návodní svah dělicí hráze mezi prostory provést ve sklonu 1:2, povodní ve sklonu 1:3, aby byla zabezpečena stabilita svahů při přepadu.
- Šířku spádového objektu UPDS provést o hodnotě 12 m, korunu o délce (tloušťce) 5 m, sklony bočních svahů 1:2 a sklon návodního líce 1:4.
- Přidání odvodňovacího systému UPP po obvodu jeho dna (je řešeno pouze ideově, nebyly provedeny žádné výpočty), aby nedocházelo při vyšších úrovních hladiny podzemní vody, případně při vyšší hladině vody v UPDS, k jeho podmáčení.
- Přelévanou hráz UPP vybavit propustí s hrubými česlemi na vtoku zabraňujícími jejímu ucpání (bližší návrh propusti nebyl proveden, protože přímo souvisí s odvodňovacím systémem).

- Balvanitý skluz UPP se doporučuje provést v patě s odvodňovacím příkopem. Snížená pata zabezpečuje větší stabilitu opevnění skluzové plochy, lepší tlumení kinetické energie proudu a odvodnění při vysoké úrovni hladiny podzemní vody.
- **Opevnění:**
 - Svahy a paty svahů dělicí hráze mezi usazovacími prostory zabezpečit těžkým kamenným záhozem o velikosti zrna 0,55 m. Doporučuje se zapuštěná patka.
 - Úroveň pat svahů dokumentuje Obr. 105, mezi danými výškami se doporučuje provést po délce lineární interpolaci.
 - Dělicí hráz nad mostem na Milotice se doporučuje provést z těžkého kamenného záhozu s velikostí zrna 0,55 m.
 - Koruna přelivu UPDS byla uvažována hydraulicky drsná odpovídající drsnosti zrn s velikostí 0,55 m. V případě použití jiné drsnosti se doporučuje provést úpravu geometrie při dodržení stejné konzumní křivky.
 - V části bermy pod mostem na Milotice se doporučuje použít záhozu s velikostí zrna 0,4 m.
- **Těžba:**
 - Těžbu se doporučuje provádět selektivně dle zrnitosti usazeného materiálu.
 - Rozsah oblasti s nánosem usazenin v UPDS, které jsou vhodné pro ukládání do VP, je na Obr. 105 vyobrazen zeleně.
 - Rozsah oblasti s nánosem usazenin v UPDS, které nejsou vhodné pro ukládání do VP, ale jsou vhodné pro zásypy výmolů v korytě, je na Obr. 105 vyobrazen červeně. Jedná se o pás široký 10 m od horní hrany koruny dělicí hráze.
 - Těžbu z UPDS se doporučuje provádět co nejdříve po opadnutí PV, aby byl UPDS připravený na usazení dalšího materiálu. V případě, že nános nebude odtěžen, nebude mít UPDS požadovanou účinnost.
 - Těžbu z UPP se doporučuje neprovádět po každé PV (neekonomické), ale pouze v případě, že se zde usadí z hlediska těžitelnosti významné množství materiálu. Vzhledem k obecně velmi rozkolísané koncentraci plavenin ve vodě a absenci měřených dat koncentrace nelze blíže specifikovat, kdy daný stav nastane.
- **Údržba:**
 - V případě porušení opevnění je třeba vyhodnotit jeho příčinu a provést neodkladně jeho nápravu. Zvláště důležité je to u dělicí hráze mezi objekty, která je přelévána, a u přelivů. V případě jejich protržení by UPS přestal být funkční.
 - V UPDS ani UPP se nesmí vyskytovat keře a stromy, jinak by byla narušena jejich funkčnost a omezena těžitelnost.
 - Ve dně UPP je žádoucí pevný travní kryt.



Obr. 105 Situace s doporučením pro těžbu

12.3. Omezení

Je nutné uvést, že výzkum postihl pouze povodňové vlny, které byly dodány objednatelem, a tak nedokáže postihnout všechny průtokové vlny, které se v dané lokalitě vyskytnou. Rovněž nedokáže, vzhledem k jejich variabilitě, popsat všechny zrnitosti přitékajících splavenin, stavy vegetace, vytrídění zrn v krycí vrstvě koryta atd. Z těchto důvodů je třeba při těžbě usazenin z UPDS přihlídnout k aktuálnímu stavu usazenin z pohledu množství i zrnitosti.

Rovněž je třeba uvést, že fyzikální model simuloval pouze dnové splaveniny s velikostí zrna větší než 15 mm, zrna menší byla simulována pouze numerickým modelem.

Detailní řešení prvků UPS nebylo předmětem prací, zvláště není stanoven odvodňovací systém UPP a propust přelévané hráze UPP.

Vzhledem k absenci změřených dat koncentrace plavenin a její obecně velké rozkolísanosti nelze blíže určit rychlost zanášení UPP a tak i četnost těžby nánosů.

Část plavenin se bude do nádrže dostávat přes UPDS, tyto plaveniny budou nádrž zanášet.

Je nutné vyřešit navazující část koryta pod objektem, kde bude hladová voda a hrozilo by jeho vymílání.

13. Závěr

Numerické simulace a výpočty umožnily zhotovit předběžný návrh UPS, jehož provedení by v případě výzkumu na fyzikálním modelu bylo neefektivní. Podařilo se simulovat jak proudění vody, tak proudění dnových splavenin. Porovnání výsledků simulací z numerických modelů s výsledky z fyzikálního modelu ukázaly, že mnohé děje stále nedokážeme dostatečně spolehlivě popsat. Porovnání rovněž ukázalo, jak významná je nejistota pocházející z neznalosti úrovně dna za povodňových situací při transportu splavenin a deformaci dna, a akcentovalo nutnost řešit proudění splavenin a vody sdruženě pro získání věrohodnějších výsledků.

Fyzikální model UPDS včetně přítokového koryta umožnil provést takové úpravy předběžného návrhu, které významně zlepšily proudění vody v přítokovém korytě a především zlepšily funkci UPDS. Týkaly se zejména rozdělení proudu v přítokovém korytě, přepadu přes dělicí hráz mezi prostory a přepadu přes přeliv UPDS.

Navržený a fyzikálním modelem ověřený UPDS vytváří velmi dobrou separaci zrn, což umožňuje provádět selektivní těžbu materiálu. Jedná se o významný přínos pro vlastní těžbu materiálu.

Konstantním průtokem Q_{100} (i všemi menšími) byla ověřena odolnost všech opevňovacích prvků v modelu.

UPDS je po zakomponování všech výše uvedených doporučení plně funkční až do PV_{50} . Při PV_{100} dojde k odnosu malého množství dnových splavenin do UPP a do koryta níže po toku. Množství lze považovat za relativně malá vzhledem k množství zachyceného materiálu v UPDS.

Uvedené řešení UPS je unikátní a mohlo by se stát do jisté míry podkladem pro obdobné návrhy.

Rozsah prací a náročnost zadaného úkolu byly značné, přesto požadované termíny a požadovaný rozsah prací byl splněn. Výzkum umožnil zapojit studenty doktorského studijního programu do řešení, otevřel otázky pro vědecké bádání a umožní v případě kladného souhlasu objednatele a investora nabídnout témata pro řešení závěrečných studentských prací přínosných pro praxi.

V Brně dne 18. 3. 2016

doc. Ing. Zbyněk Zchoval, Ph.D.
řešitel

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
vedoucí ÚVST

14.Literatura

- Allen, J. 1946. Scale models in hydraulic engineering. Překlad. Manchester UK.
- Arcement, G. J., Schneider, V. R. 1990. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. United States Geological Survey Water-supply Paper 2339.
- Bogardi, J. 1974. Sediment Transport in Alluvial Streams. Budapest : Akadémiai Kiadó. ISBN 963-05-0278-X.
- Bunte, K., Abt, S. 2001. Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Addable Gravel- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring. Fort Collins, USA: Rocky Mountain Research Station, USDA.
- Bačík, M., Kališ, J., Klúčovská, J. 1985. Modelovanie zanášania nádrží, záverečná správa úlohy ŠPZV II-5-3/6. Bratislava: VÚV Bratislava.
- Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C. 1968. Hydraulika pro vodohospodářské stavby. Praha: SNTL/ALFA.
- Brandt, S. A. 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. Denmark: Institute of Geography, University of Copenhagen.
- Camenen, B., Bayram, A., Larson, M. 2006. Equivalent roughness height for plane bed under steady flow, The Inlet Modeling System Work Unit of the Coastal Inlets Research Program.
- Chow, V. T. 1959. Open-channel Hydraulics. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- Čábelka, J., Gabriel, P. 1987. Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. Praha: Academia.
- Čábelka, J., Novák, P. 1964. Hydrotechnický výzkum I. Modelový výzkum. Praha: SNTL/SVTL.
- ČSN ISO 4362 (259335) 1995. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Měrné přelivy lichoběžníkového průřezu. Praha, ČR: ČNI.
- ČSN ISO 8333 (259339), 1997. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech pomocí přelivů a žlabů – Přelivy se širokou korunou tvaru V. ČNI, Praha, ČR.
- Ettema, R. 2000. Hydraulic Modeling. Concepts and Practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 97, Reston, USA: ASCE. ISBN 0-7844-0415-1.
- García, M. H. 2008. Sedimentation Engineering. Processes, Measurements, Modeling, and Practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110. Reston, USA: ASCE. ISBN: 978-0-7844-0814-8.
- Gee, D. M., Thomas, W. A., Bonner, V., Davis, D. W. 1991. HEC-6 User's Manual. HEC.
- Graf, W. H. 1971. Hydraulic of Sediment Transport. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. ISBN 07-023900-2.
- Moris, G. L., Fan, J. 2009. Reservoir sedimentation handbook. Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. New York: McGraw-Hill.
- Novak, P., Čábelka, J. 1981. Models in Hydraulic Engineering. Physical Principles and Design Applications. Pitman Publishing. ISBN 0-273-08436-4.

- Strickler A. 1924. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Kanäle und Geschlossene Leitungen, Berna.
- Thompson, D. M., Wohl E. E., Jarrett R. D. 1999. Velocity reversals and sediment sorting in pools and riffles controlled by channel constrictions. *Geomorphology* 27, 229-241.
- Thompson, D. M. 2006. The role of vertex shedding in the scour of pools. *Advances in Water Resources* 29, 121-129.
- Veselý, J. Maleňák J., Pařílková J., Zachoval Z. 2002. Souhrnné hodnocení splaveninového průzkumu hlavních toků v Povodí Odry, s.p. Granulometrická skladba dna vodních toků v povodí Odry. Souhrn výsledků výzkumů provedených v letech 1952 až 2002. Brno: LVV ÚVST FAST VUT v Brně.
- Vincent, J. 1964. Zanášanie nádrží. Kandidátska dizertačná práca. Bratislava: VÚV Bratislava.
- Weiglová, K., Glisníková V., Masopust, J. 2003. Mechanika zemin a zakládání staveb. Brno: CERM. ISBN 80-214-2376-5.
- Yalin, M. S. 1972. Mechanics of Sediment Transport. Oxford: Pergamon Press. ISBN 08-016646-6.
- Zachoval, Z., Veselý, J., Pařílková, J., Uhmánová, H. 2009. Posouzení splaveninového režimu a prognóza. Tok Opava v úseku Kunov až Krnov. Provedené v rámci Opatření na horní Opavě – příprava akce v období 2008 – 2010. Závěrečná zpráva. Brno: LVV ÚVST FAST VUT v Brně.
- Zachoval, Z., Šulc, J., Pařílková, J., Veselý, J., Fejfarová, M., Picka, D. 2010. Hydraulický modelový výzkum prostoru pro ukládání splavenin pod připravovaným VD Nové Heřminovy. H.01 Hydraulické modely prostoru pro ukládání splavenin pod hrází VDNH, Závěrečná zpráva. Brno: LVV ÚVST FAST VUT v Brně.

15. Seznamy

15.1. Seznam veličin

Symbol	Název	Jednotka	Rozměr
a	zrychlení	m/s^2	$\text{L}\cdot\text{T}^{-2}$
a	délka zrna	m	L
b	šířka zrna	m	L
b	šířka dna	m	L
b_f	efektivní šířka dna koryta	m	L
b_p	šířka přelivu	m	L
c	tloušťka zrna	m	L
c	součinitel		
c	součinitel modelu turbulence		
c_A	součinitel v rovnici MPM stanovující počátek pohybu splavenin		
c_B	součinitel v rovnici MPM stanovující průtok splavenin		
C	Chézyho rychlostní součinitel	$\text{m}^{0.5}/\text{s}$	$\text{L}^{0.5}\cdot\text{T}^{-1}$
Ca	Cauchyho kritérium (číslo)		
C_d	součinitel průtok (přepadu) pravoúhlé části přelivu		
C_{dt}	součinitel průtok (přepadu) trojúhelníkové části přelivu		
C_C	číslo křivosti		
C_U	číslo stejnozrnnosti		
d	velikost zrna	m	L
d_e	efektivní velikost zrna	m	L
d_i	velikost zrna při $i\%$ hmotnostním propadu	m	L
D	průměr potrubí	m	L
E	energie	J	$\text{M}\cdot\text{L}^2\cdot\text{T}^{-2}$
F	síla	N	$\text{M}\cdot\text{L}\cdot\text{T}^{-2}$
F_t	třecí síla	N	$\text{M}\cdot\text{L}\cdot\text{T}^{-2}$
F_g	tíhová síla	N	$\text{M}\cdot\text{L}\cdot\text{T}^{-2}$
Fr	Froudovo kritérium (číslo)		
Fr^*_{*d}	třecí Froudovo kritérium (číslo) zrna		
g	tíhové zrychlení	m/s^2	$\text{L}\cdot\text{T}^{-2}$
h	hloubka	m	L
h_c	kritická hloubka	m	L
h_e	efektivní hloubka	m	L
h_p	přepadová výška	m	L
h_{min}	minimální hloubka vody	m	L
h_z	ztrátová výška	m	L
i	sklon		
K	modul objemové stlačitelnosti	Pa	$\text{M}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{T}^{-2}$
K	modul průtok	m^3/s	$\text{L}^3\cdot\text{T}^{-1}$
l	délka	m	L
l_a, l_b, l_c	délky kvádrů	m	L
m	hmotnost	kg	M
n	součinitel drsnosti		
n_p	pórovitost		
Ne	Newtonovo kritérium (číslo)		
O	omočený obvod	m	L

P	procentuální zastoupení		
q	specifický průtok vody	m^2/s	$L^2 \cdot T^{-1}$
q_s	specifický průtok splavenin	m^2/s	$L^2 \cdot T^{-1}$
q_{sm}	specifický hmotnostní průtok splavenin	$kg/(m \cdot s)$	$L^{-1} \cdot M \cdot T^{-1}$
Q	průtok vody (objemový průtok vody)	m^3/s	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_s	průtok splavenin (objemový průtok splavenin)	m^3/s	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_{sm}	hmotnostní průtok splavenin	kg/s	$M \cdot T^{-1}$
R	hydraulický poloměr	m	L
R_d	hydraulický poloměr aktivní části dna	m	L
Re	Reynoldsovo kritérium (číslo)		
Re_D	Reynoldsovo kritérium (číslo) kruhového potrubí		
Re_{kv}	Reynoldsovo kritérium (číslo) ohraničující kvadratickou oblast		
Re^*_{*d}	třecí Reynoldsovo kritérium (číslo) zrna		
$Re^*_{*d,min}$	minimální třecí Reynoldsovo kritérium (číslo) zrna pro hydraulicky drsné koryto		
Ro	Rousovo kritérium (číslo)		
s	poměrná hustota		
S	průtočný průřez	m^2	L^2
St	Strouhalovo kritérium (číslo)		
t	čas	s	T
T	teplota	$^{\circ}C$	
u_i	okamžitá bodová rychlost	m/s	$L \cdot T^{-1}$
u	časově střední bodová rychlost	m/s	$L \cdot T^{-1}$
u^*	třecí rychlost	m/s	$L \cdot T^{-1}$
v	průřezová rychlost	m/s	$L \cdot T^{-1}$
v_s	svislicová rychlost	m/s	$L \cdot T^{-1}$
V	objem	m^3	L^3
w_s	usazovací rychlost zrn	m/s	$L \cdot T^{-1}$
We	Weberovo kritérium (číslo)		
X	obecná veličina		
x	souřadnice	m	L
y	souřadnice	m	L
z	souřadnice	m	L
Z_h	úroveň hladiny	m n. m.	L
Z_d	úroveň dna	m n. m.	L
β	vrcholový úhel přelivu	$^{\circ}$	
τ	třecí napětí	Pa	$M \cdot L^{-1} T^{-2}$
τ_c	kritické třecí napětí	Pa	$M \cdot L^{-1} T^{-2}$
λ	součinitel tření		
θ	Shieldsovo kritérium (číslo)		
θ_c	kritické Shieldsovo kritérium (číslo)		
κ	Karmánova konstanta 0,41		
Φ	intenzita proudění splavenin		
Ξ	kritérium (číslo) zrna		
Δ	Nikuradseho ekvivalentní drsnost povrchu	m	L
ν	molekulární kinematičká viskozita	m^2/s	$L^2 \cdot T^{-1}$
ν_t	turbulentní kinematičká viskozita	m^2/s	$L^2 \cdot T^{-1}$
M	měřitko		
σ	povrchové napětí	kg/m^2	$L^{-2} \cdot M$

μ	dynamická viskozita	kg/(m·s)	$L^{-1} \cdot M \cdot T^{-1}$
ρ	hustota	kg/m ³	$M \cdot T^{-3}$
ρ_s	hustota zrna	kg/m ³	$M \cdot T^{-3}$
ξ	součinitel místní ztráty		

Indexy

m	model
p	prototyp
x	ve směru osy x
y	ve směru osy y
z	ve směru osy z

15.2. Seznam zkratk

Zkratka	Název
Bpv	baltský – po vyrovnání
D	Dimenze (rozměr)
DMT	Digitální model terénu
FAST	Fakulta stavební
HEC-RAS	hydrologic Engineering Centers – River Analysis System
IGP	Inženýrsko-geologický průzkum
IZ	Investiční záměr
LVV	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
PID	proporcionální integrační derivační
PV _N	N-letá povodňová vlna
Q _N	N-letý průtok
Q _m	m-denní průtok
UPDS	usazovací prostor dnových splavenin
UPP	usazovací prostor plavenin
UPS	usazovací prostor splavenin
ÚVST	Ústav vodních staveb
VD	Vodní dílo
VP	vymílací prostor
VUT v Brně	Vysoké učení technické v Brně

15.3. Seznam obrázků

Obr. 1	Situování lokality (www.mapy.cz)	10
Obr. 2	Situace lokality s vyznačením navrhovaných úprav (nahore) a vrstevnic (dole)	11
Obr. 3	Koncepční řešení, proudění vody	13
Obr. 4	Koncepční řešení, proudění splavenin	13
Obr. 5	Situace předběžného návrhu	15
Obr. 6	Úroveň hladiny v obou objektech v závislosti na průtoku v přítokovém korytě	17
Obr. 7	PV použité při simulaci průtoku vody i splavenin	19
Obr. 8	Q _{30d} , úroveň hladiny Z _h	20
Obr. 9	Q _{30d} , hloubka h	20
Obr. 10	Q _{30d} , svislicová rychlost v _s	21
Obr. 11	Q _{30d} , tečné napětí τ	21
Obr. 12	PV ₅ , kulminační průtok, úroveň hladiny Z _h	22
Obr. 13	PV ₅ , kulminační průtok, hloubka h	22
Obr. 14	PV ₅ , kulminační průtok, svislicová rychlost v _s	23
Obr. 15	PV ₅ , kulminační průtok, tečné napětí τ	23
Obr. 16	PV ₁₀ , kulminační průtok, úroveň hladiny Z _h	24
Obr. 17	PV ₁₀ , kulminační průtok, hloubka h	24
Obr. 18	PV ₁₀ , kulminační průtok, svislicová rychlost v _s	25
Obr. 19	PV ₁₀ , kulminační průtok, tečné napětí τ	25

Obr. 20	PV ₂₀ , kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h	26
Obr. 21	PV ₂₀ , kulminační průtok, hloubka h	26
Obr. 22	PV ₂₀ , kulminační průtok, svislicová rychlost v_s	27
Obr. 23	PV ₂₀ , kulminační průtok, tečné napětí τ	27
Obr. 24	PV ₅₀ , kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h	28
Obr. 25	PV ₅₀ , kulminační průtok, hloubka h	28
Obr. 26	PV ₅₀ , kulminační průtok, svislicová rychlost v_s	29
Obr. 27	PV ₅₀ , kulminační průtok, tečné napětí τ	29
Obr. 28	PV ₁₀₀ , kulminační průtok, úroveň hladiny Z_h	30
Obr. 29	PV ₁₀₀ , kulminační průtok, hloubka h	30
Obr. 30	PV ₁₀₀ , kulminační průtok, svislicová rychlost v_s	31
Obr. 31	PV ₁₀₀ , kulminační průtok, tečné napětí τ	31
Obr. 32	PV ₁₀₀ , kulminace hladiny v nádrži, úroveň hladiny Z_h	32
Obr. 33	PV ₁₀₀ , kulminace hladiny v nádrži, hloubka h	32
Obr. 34	PV ₁₀₀ , kulminace hladiny v nádrži, svislicová rychlost v_s	33
Obr. 35	PV ₁₀₀ , kulminace hladiny v nádrži, tečné napětí τ	33
Obr. 36	Schéma pro výpočet Bernoulliho rovnice	35
Obr. 37	Schéma pro výpočet rovnice spojitosti splavenin	36
Obr. 38	Volba příčných profilů modelu	38
Obr. 39	Interpolace příčných profilů modelu	38
Obr. 40	Proteklá hmotnost splavenin po délce úseku toku za dobu trvání PV, u UNRPV za rok	39
Obr. 41	Moodyho graf pro kruhové potrubí o průměru D	44
Obr. 42	Shieldsův graf	46
Obr. 43	Yalinův graf (Yalin, 1972)	48
Obr. 44	Simonsův a Richardsonův graf (García, 2008)	49
Obr. 45	PV použité na modelu	51
Obr. 46	Místa nově odebraných vzorků dna	52
Obr. 47	Zrnitostní křivky nových odběrů, náhradní zrnitostní křivka krycí vrstvy dna (dlouhodobé pozorování)	53
Obr. 48	Umístění volených řezů v půdorysu	54
Obr. 49	Úprava zrnitosti písku použitého na modelu	55
Obr. 50	Příprava žlabu pro umístění modelu, příprava písku	56
Obr. 51	Umístění příčných profilů a vyplnění jejich prostoru cihlami	56
Obr. 52	Vyhotovení betonové skořepiny modelu	57
Obr. 53	Úprava pohledovým betonem, zhotovení opevnění svahů a umístění drenážního potrubí s obsypem	57
Obr. 54	Přípevnění pilířů mostu a vyplnění prostoru levé části modelu cihlami	58
Obr. 55	Zасыпání modelu pískem	58
Obr. 56	Doplnění dělicí hráze UPDS a UPP, opevnění kynety, barevné ztvárnění povrchů, urovnání písku a položení mostovek	59
Obr. 57	Odvodňovací nádoby	59

Obr. 58	Pojezd s digitálním hrotovým měřidlem, v pozadí Thomsonův přeliv a ultrazvuková sonda	60
Obr. 59	Měřicí přístroj Therm 2285-2 s mikrovrtulí	61
Obr. 60	Příkopy UPP	64
Obr. 61	Úprava přelivu UPP	64
Obr. 62	Průtoky v období 2009 až 2015	67
Obr. 63	Zvolené profily N pro porovnání úrovně dna	68
Obr. 64	Podobnost tvaru volených příčných profilů v úseku nad mostem na Milotice (protiproudí profily)	69
Obr. 65	Podobnost zrnitosti krycí vrstvy dna	70
Obr. 66	Opevnění dělicí hráze UPDS a UPP	72
Obr. 67	Úroveň dna na počátku zatížení modelu PV, rastr bodů pro vyhodnocení, triangulace	74
Obr. 68	Místa odběru usazenin pro stanovení zrnitosti	75
Obr. 69	PV ₅ , průběh dávkování splavenin	76
Obr. 70	PV ₅ , proudění při kulminačním průtoku	77
Obr. 71	PV ₅ , úroveň dna po PV	78
Obr. 72	PV ₅ , tloušťka usazenin	79
Obr. 73	PV ₅ , úroveň hladiny při kulminačním průtoku	80
Obr. 74	PV ₅ , zrnitost usazenin	80
Obr. 75	PV ₁₀ , průběh dávkování splavenin	81
Obr. 76	PV ₁₀ , proudění při kulminačním průtoku	82
Obr. 77	PV ₁₀ , úroveň dna po PV	83
Obr. 78	PV ₁₀ , tloušťka usazenin	84
Obr. 79	PV ₁₀ , úroveň hladiny při kulminačním průtoku	85
Obr. 80	PV ₁₀ , zrnitost usazenin	85
Obr. 81	PV ₂₀ , průběh dávkování splavenin	86
Obr. 82	PV ₂₀ , proudění při kulminačním průtoku	87
Obr. 83	PV ₂₀ , úroveň dna po PV	88
Obr. 84	PV ₂₀ , tloušťka usazenin	89
Obr. 85	PV ₂₀ , úroveň hladiny při kulminačním průtoku	90
Obr. 86	PV ₂₀ , zrnitost usazenin	90
Obr. 87	PV ₅₀ , průběh dávkování splavenin	91
Obr. 88	PV ₅₀ , proudění při kulminačním průtoku	92
Obr. 89	PV ₅₀ , úroveň dna po PV	93
Obr. 90	PV ₅₀ , tloušťka usazenin	94
Obr. 91	PV ₅₀ , úroveň hladiny při kulminačním průtoku	95
Obr. 92	PV ₅₀ , zrnitost usazenin	95
Obr. 93	PV ₁₀₀ , průběh dávkování splavenin	96
Obr. 94	PV ₁₀₀ , proudění při kulminačním průtoku	97
Obr. 95	PV ₁₀₀ , úroveň dna po PV	98
Obr. 96	PV ₁₀₀ , tloušťka usazenin	99
Obr. 97	PV ₁₀₀ , úroveň hladiny při kulminačním průtoku	100
Obr. 98	PV ₁₀₀ , zrnitost usazenin	100

Obr. 99	Čelo nánosu po PV ₅	101
Obr. 100	Poloha čela nánosu při kulminaci PV	102
Obr. 101	Poloha čela nánosu po PV	102
Obr. 102	Porovnání numericky stanovené hmotnosti transportovaného materiálu PV na přítoku do modelu a hmotnosti usazenin v UPDS na fyzikálním modelu	104
Obr. 103	Vyhodnocení usazování dnových splavenin v UPDS	105
Obr. 104	Graf porovnání hmotnosti usazenin	106
Obr. 105	Situace s doporučením pro těžbu	108

15.4. Seznam tabulek

Tab. 1	Množství odneseného materiálu z VP vybranými PV	8
Tab. 2	Vyjádření měřítka vybraných veličin M_x měřítkem délky dle Froudova kritéria	50
Tab. 3	Průtoky	51
Tab. 4	Značení experimentů	71
Tab. 5	Účinnost UPDS	105

16. Záznamy z jednání

Vzhledem k úplnosti a z důvodu v textu práce popsaných rozhodnutí jsou zde uvedeny záznamy jednání vyhotovené objednatelem a prezenční listiny.

16.1. První pracovní jednání 10.12.2015

Jednání ze dne 10.12.2015

Opatření na horní Opavě, příprava akce v období 2013 - 2016

3A15186

Záznam

z jednání k akci „Opatření na horní Opavě, příprava akce v období 2013 – 2016“
konané dne 10. 12. 2015 v Brně

Přítomní:	Povodí Odry, s.p. (POD)	Ing. Jiří Pagáč Ing. Břetislav Tureček Ing. Dalibor Kratochvíl
	VUT v Brně (VUT)	prof. Ing. Jan Šulc, CSc. doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
	AQUATIS a.s. (AQT)	Ing. Jiří Švancara Ing. Marek Čejda Ing. Michaela Tvrzníková

Jednání bylo svoláno operativně prostřednictvím e-mailu k dílčímu předmětu plnění

H.01.03 - Modelový výzkum prostoru pro ukládání říčních splavenin.

Ve smyslu zadání bude v rámci této činnosti s podporou prostředků modelového výzkumu proveden výchozí návrh prostoru pro usazování splavenin a budou optimalizovány jeho uspořádání a funkce. Výstup modelového výzkumu bude podkladem pro projektové řešení tohoto objektu (příp. souvisejících objektů).

V rámci společnosti OHO je odpovědným řešitelem společnost AQUATIS a.s., která zajistila pro modelový výzkum spolupráci s VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, Laboratoř vodohospodářského výzkumu (LVV). Odpovědným řešitelem úkolu *Modelový hydraulický výzkum prostoru pro sedimentaci říčních splavenin* za LVV je Doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Záznam z jednání pořídila Ing. Michaela Tvrzníková.

1. Vstupní informace a vazby na části projektu

- 1.1 Prostor pro sedimentaci říčních splavenin v horní části zátopy nádrže vodního díla Nové Heřminovy (VDNH) je jedním z kompenzačních opatření za narušení říčního kontinua a bude sloužit pro řízené nakládání se sedimenty. Sedimenty sloučené v tomto prostoru budou přemísťovány do prostoru pro ukládání splavenin pod hrází.
- 1.2 Ing. Švancara uvedl vazby na jednotlivé části projektu OHO. Prostorově náleží sedimentační prostor do horní části plochy zátopy VDNH. Navazuje na koryto z ohrázeného prostoru v souběhu s obcí NH (ochrana obce NH) a začíná za přemostěním v linii hráze proti zpětnému vzdutí (směr Milotice). V konci vzdutí VDNH je nutné jej koordinovat s dopravním řešením (etapizace výstavby přel. I/45, návrh komunikací zajišťujících přístupnost pro techniku...).
- 1.3 Z funkčního hlediska bude sedimentační prostor ovlivňován vývojem koryta nad obcí NH, které je ponecháno samovolnému přírodnímu vývoji, což přispívá ke zvýšení množství sedimentů. Dále bude ovlivňován povahou úpravy řeky Opavy v rozsahu ohrázení.
- 1.4 Byl podán přehled dosud provedených prací směřujících k výchozímu návrhu koncepce sedimentačního prostoru.
- 1.5 Z časových důvodů byl pro zahájení prací přijat předpoklad, že se oproti předchozím dosavadním nemění koncepce vyvedení přel. I/45 do obce NH (konzultováno s budoucím řešitelem DUR). V rámci průběžné koordinace je třeba soulad kontrolovat.

2 Projednání výchozí koncepce

- 2.1 Úvodem zástupci AQT představili přítomným prostorové řešení výchozí koncepce sedimentačního prostoru pro VDNH.
- 2.2 Řešitel za LVV (Doc. Zachoval) shrnul znalosti o chodu sedimentů v zájmovém území na podkladu archivních prací, výzkumů prováděných v předchozím období pro VDNH i doplnění podkladů (rekognoskace a odběr vzorků 11/20015).

Copyright © AQUATIS a.s.

Z20151210_Jednani_03.docx

strana 1

- 2.3 Byla upřesněna představa o pohybu splavenin a plavenin a o funkci prostoru pro usazování splavenin. Výchozí koncepcí předpokládá využití přirozené linie oblouku při pravém břehu. Ke dni jednání byl dokončen numerický model a po schválení koncepce řešení v konci vzdutí bude možno začít s výstavbou fyzikálního modelu v příslušném měřítku.
- Základní koncepce spočívá v předpokladu, že průtoky menší velikosti budou proudit v korytě směrově vedeném v původním oblouku Opavy, kde rozšířením koryta ve vnitřním oblouku vznikne tzv. *usazovací prostor dnových splavenin* (dále jen UPDS). Ten bude výškově oddělen přeléváním hrází od tzv. *usazovacího prostoru plavenin* (dále jen UPP), jehož rozloha je kolem 1,1 ha. UPDS je zakončen směrem po proudu řeky Opavy balvanitým skluzem (obecněji - spádovým objektem – viz dále), UPP je ukončen přeléváním hrázkou a propustkem.
- S uvážením rozsahu rozlivu provedli řešitelé (oproti investičnímu záměru a navazující úpravě koncepce dopravního řešení) navýšení terénu v sousední severní oblasti konce vzdutí, kde bude možná s ohledem na méně četné zatápní parková úprava (bude řešeno v DUR VDNH). Tím byl ohraničen rozsah UPP, kde bude třeba (oproti parkové úpravě) předpokládat jiný charakter provozních činností správce VD.
- 2.4 Doc. Zachoval na podkladu provedeného matematického modelování provedl výklad k předpokládané funkci sedimentačního prostoru. Pro výpočet byly uvažovány dva proudy vycházející z odlišných výškových úrovní dna - jeden unášející směs splavenin a plavenin, které budou následně snadno těžitelné v navrženém UPDS a druhý proud unášející zejména plaveniny, které budou usazovány v UPP, který by byl těžen ve větších periodách.
- Mezi UPDS a UPP byla navržena již výše zmíněná přelévání hráz, a to z toho důvodu, že zvyšující se tečné napětí způsobené zvětšujícím se průtokem v UPDS by vedlo k nežádoucímu transportu již usazených splavenin do nádrže (zatímco cílem je aby po průchodu povodňové vlny byly z UDPS řízeně odtěženy). Cílem návrhu bylo, aby se část proudů při zvyšujících se průtocích ve vhodném místě přelévala a v určitém pásmu průtoků se nezvyšovaly unášecí síly v UPDS. Volbu rozdělení oblasti v konci vzdutí nádrže na dva prostory oddělené přeléváním hrází podpořily i výsledky z nově provedeného zrnitostního rozboru odebraných vzorků, kde je zastoupení velikosti hrubozrnných částic dlouhodobě beze změny, ale dochází ke změně ve zastoupení jemnozrnných částic (zvýšení podílu - zejména vlivem úseku nad obcí NH).
- Řešitelé provedli simulace pro škálu v úvahu připadajících povodňových průtoků vč. ověření úrovně zpětného vzdutí z nádrže, výsledky byly předvedeny účastníkům jednání. Z obrazových příloh bylo patrné rozložení rychlostního pole, úrovně hladin, hloubek, Froudova kritéria a tečných napětí. Numerické simulace byly prováděny v prostředí programu SMS-TUFLOW, který je schopen věrohodně simulovat proudění vody prostory pro usazování. Simulováno bylo ustálené i neustálené proudění.
- Za AQT bylo upozorněno na problematiku nakládání se sedimentem. Není žádoucí, aby pod hrázový profil byl ukládán jemnozrnný materiál zachycený v UPP (zahliněný, vysoký podíl organické hmoty). Současně je nutné omezit přesun materiálu velmi frakcí s velkou zrnitostí (viz doporučení k návrhu prostoru pro ukládání splavenin pod hrází).
- 2.5 Ing. Tureček požádal, aby byl vyhotoven a dodán investorovi podélný profil řeky Opavy v řešené oblasti. Dále doporučil, aby do doby upřesnění vhodného typu spádového objektu nebylo užíváno označení balvanitý skluz. Nadále tedy bude užíváno pojmu spádový objekt a ten bude používán v celé studii. Oblast UPP by do budoucna měla být chápána jako technicky přiznaný objekt zejména pro jeho budoucí snadnější provoz, údržbu apod. Z hlediska provozu není žádoucí, aby tento prostor byl trvale zatopen vodou. Z provozních důvodů, bude tedy UPP navržen jako volná plocha terénu s odvodněním (po odeznění povodně).
- 2.6 Ohledně fyzikálního modelu bylo doc. Zachovalem uvedeno, že z hlediska modelové podobnosti na fyzikálním modelu se jako vhodné jeví měřítko 1:30. Fyzikální model bude řešit pohyb dnových splavenin. Z numerických simulací proudění vody bylo odhadnuto, že cca do 20% splavenin by se mohlo ukládat v UPP. Do 50-leté vody by nemělo docházet k ovlivnění UPDS zpětným vzdutím z nádrže VDNH. Na základě modelování transportu splavenin na fyzikálním modelu bude upřesněna geometrie řešené oblasti a bude možné upřesnit i výškové uspořádání všech objektů.

3 Další postup a různé

- 3.1 Zástupci objednatele odsouhlasili koncepční prostorové řešení zanesené v příloze č.1 tohoto záznamu a předpoklad modelového měřítká fyzikálního modelu.
- 3.2 Bylo odsouhlaseno, že model bude svým rozsahem začínat v oblasti proti proudu již od Milotického mostu kvůli zajištění verifikace fyzikálních jevů. LVV navrhne vhodné řešení přítoku do modelové oblasti umožňující dotaci splaveninami.
- 3.3 Bylo dohodnuto, že LVV navrhne vhodný odvod vodního proudu z modelu v návaznosti na potřebu měření příslušných veličin.
- 3.4 LVV s ohledem na výsledky matematických modelových simulací upozorňuje na nevhodnou povahu detailního návrhu koryta v ohrázeném prostoru od obloukového mostu po most na Milotice nad Opavou v IZ. Výsledky matematických modelových simulací ukazují, že vývoj koryta nebude směřovat k vývoji meandrů (původní návrh Šindlar a jeho postupná modifikace v IZ). Výsledky simulací ukazují, že při vyšších průtocích bude mít koryto Opavy tendenci se napřímit, což by bylo spojeno s významným odnosem materiálu, který by byl přemístěn do sedimentačního prostoru. Bylo dohodnuto, že není žádoucí, aby zmíněný úsek úprav Opavy významně dotoval UPDS (nad rámec přirozené dotace z výše položených úseků). Bylo proto dohodnuto, že v DUR části „Ochrana obce NH“ bude dolní úsek v ohrázení navazující na most a dále na sedimentační prostor vycházet z optimalizace tvarového řešení provedené v modelovém výzkumu. V úseku výše pak budou provedena opatření omezující nežádoucí dotaci sedimentů. Bylo stanoveno, že pro další práce v rámci DUR části „Ochrana obce NH“ je třeba na úpravu Opavy v souběhu s obcí NH pohlížet jako na část uceleného řešení s danými technickými parametry a doprovodnými prvky PBPPPO.

Zaznamenali: Ing. Michaela Tvrzníková

Podpisy přítomných jsou uvedeny na prezenční listině.

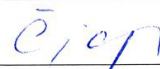

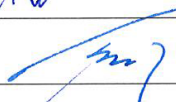
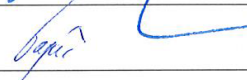

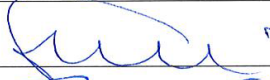
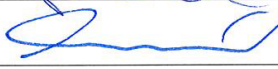
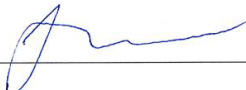
Rozdělovník: Přítomným prostřednictvím elektronické pošty.

Příloha č. 1:

Situace záchytného prostoru splavenin vyhotovená v měřítku 1:1000

PREZENČNÍ LISTINA

z pracovního jednání k projektu
Opatření na horní Opavě, příprava akce v období 2013-2016
 konaného dne 10.12.2015 v budově VUT FAST v Brně

Jméno	Organizace	Podpis
MAREK ČESDA	AQUATIS a.s.	
MICHAELA TRZNIŠKOVÁ	AQT	
T. V. REČEK	Poradni Odjel, o.j.	
PRAGŮ JIŘÍ	-"-	
Dr. libor Kratochvíl	-s-	
JAN ŠUKO	VUT a SROU	
ZBYNĚK ZAČAVAL	-"-	
JITŘI ŠVALICOVA	AQT	

16.2. Druhé pracovní jednání 25.2.2016

Jednání ze dne 25. 02. 2016

Opatření na horní Opavě, příprava akce v období 2013 - 2016

3A15186

Záznam

z jednání k akci „Opatření na horní Opavě, příprava akce v období 2013 – 2016“
konaného dne 25. 02. 2016 v LVV ÚVST FAST VUT v Brně

Přítomní:	Povodí Odry, s.p. (PO)	Ing. Eva Hrubá Ing. Břetislav Tureček Ing. Lukáš Pavlas Ing. Jiří Konečný Ing. Jiří Fuka Ing. Radek Pekař Ing. Jan Štaš
	LVV ÚVST FAST VUT v Brně (LVV)	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc. doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
	AQUATIS a.s. (AQT)	Ing. Jiří Švancara Ing. Marek Čejda Ing. Michaela Tvrzníková Ing. Daniel Brázda

Jednání bylo svoláno prostřednictvím e-mailu Ing. Švancarou, dne 10. 02. 2016. Předmětem jednání je provádění modelových zkoušek v prostoru pro ukládání říčních sedimentů v horní části zátopy nádrže VD Nové Heřminovy (VDNH) (položka **H.01.03**).

Program jednání:

1. Úvod.
2. Informace o sestavení modelu.
3. Průběh modelových zkoušek.
4. Další postup a jiné.
5. Prohlídka modelu.

V záznamu bylo dodrženo pořadí projednávaných bodů dle pozvánky. Záznam z jednání byl pořízen Ing. Michaelou Tvrzníkovou a Doc. Zbyněkem Zachovalem.

1. Úvod

- 1.1 Úvodem doc. Zachoval představil jako spoluřešitele doc. Pařílkovou a doc. Veselého, kteří jsou součástí týmu podílejícím se na provádění modelových zkoušek v konci vzdutí VDNH. Vedoucí týmu, prof. Šulc a doc. Veselý byli omluveni z důvodu služebních cest.
- 1.2 Ing. Švancara uvedl, že se jedná o první ze dvou fyzikálních modelů, které budou v roce 2016 v LVV řešeny. Prostor pro sedimentaci říčních splavenin v horní části zátopy nádrže VDNH je jedním z kompenzačních opatření za narušení říčního kontinua a bude sloužit pro řízené nakládání se sedimenty. Sedimenty zachycené v tomto místě budou přemístovány do prostoru pro ukládání splavenin pod hrází. Byla připomenuta koordinace mezi úpravami v konci vzdutí, dopravním řešením a ochranou obce NH.
- 1.3 Odpovědným řešitelem za LVV je doc. Zachoval. Byl podán celkový souhrn k předmětnému modelu. Fyzikální model byl vytvořen na základě modelové podobnosti v měřítku 1:30. Jedná se o místo přirozeného meandru řeky Opavy, kde při povodňových průtocích kolísá hladina a ve vodním toku a rychlostní pole je proměnlivé. Zde lze s využitím přirozených procesů při transportu splavenin objekt ke třídění splavenin a plavenin a jejich sedimentaci. Vlivem třídění zm při usazování je možné usazeniny selektivně těžít v závislosti na jejich budoucím použití. V prezentaci byly blíže specifikovány objekty, které museli řešitelé modelu pro svou činnost zohlednit, tj. násyp nového mostu plánované přeložky I/45, profil mostu vedoucího na Milotice, hráz proti zpětnému vzdutí nad Opavou a složené koryto návrhového stavu řeky Opavy.
- 1.4 Byla připomenuta výchozí koncepce (projednávaná na předchozím jednání):
 - Průtoky menší velikosti budou proudit v korytě směrově vedeném v linii původního oblouku

Copyright © AQUATIS a.s.

Z20160225_Jednani.docx

strana 1

Opavy, kde rozšířením koryta ve vnitřním (levém) břehu vznikne *usazovací prostor dnových splavenin* (dále jen UPDS).

- UPDS bude výškově oddělen přelévanou hrází od tzv. *usazovacího prostoru plavenin* (dále jen UPP), UPDS je zakončen směrem po proudu řeky Opavy spádovým objektem – viz dále, UPP je ukončen přelévanou hrázkou a propustkem.

2 Informace o sestavení modelu

2.1 Doc. Zachoval shrnul postupy, které vedly k sestavení modelu:

- Představil základní koncepci funkce objektů na základě grafu zobrazujícího závislost úrovně hladiny a průtoku. Výpočet sloužil pro prvotní návrh úrovní korun přelivů a přelévaných hrází.
- Pro tři hlavní režimy proudění byly prezentovány výsledky se simulací 2D proudění (SMS-TUFLOW) pro kulminační průtoky vybraných povodňových vln.
- Průtok splavenin byl simulován v prostředí 1D modelem HEC-RAS. Vyhodnocován byl pohyb splavenin při PV_5 až PV_{1000} a při upravené náhradní průměrné roční povodňové vlně.
- Následně bylo možno přejít ke tvorbě fyzikálního modelu. Fyzikální model byl zhotoven s využitím Froudova kritéria mechanické podobnosti při dodržení mezních podmínek podobnosti.
- Model musel zahrnovat UPDS a dostatečně dlouhou část přítokového koryta, aby byla zabezpečena podobnost ve tvarování dna koryta a třídění zrn v krycí vrstvě dna jak v podélném, tak v příčném profilu. Výše uvedené je nutnou podmínkou pro věrohodné simulování třídění zrn v UPDS. Model simuluje proudění vody s volnou hladinou a transport dnových splavenin s deformací dna koryta.
- Dalším výchozím podkladem byl odběr vzorků sedimentů na lokalitě celkem ze 4 míst (3 krycí, 1 spodní a 1 celkový vzorek). Část vzorků byla odebrána i v tzv. oblasti přirozeného vývoje nad obcí Nové Heřminovy. Byl potvrzen vliv přirozeného vývoje koryta na složení zrnitosti usazenin ve dně níže po toku. Při vlastním modelování je nutné brát v potaz, že nelze modelovat částice $< 0,5$ mm ($d > 15$ mm *in situ*), pro něž již neplatí podmínky modelové podobnosti.
- Postup výstavby fyzikálního modelu byl doložen fotografiemi v prezentaci (viz Příloha 1), na kterých byl patrný průběh z vysoušení a separace písku, čištění žlabu, osazení příčných profilů a vytvarování povrchu z betonu. Následně došlo k upevnění mostních pilířů, rozmístění a fixaci opevnění koryta modelu Opavy, dokončení těsnění a provedení finálních nátěrů. Model byl následně zavodněn a provedeno nastavení technologie.

3 Průběh modelových zkoušek

3.1 Vlastní kalibrace fyzikálního modelu byla obtížná, neboť v období 2009 až 2015 nastaly jen dva stavy, při kterých došlo k porušení dnové dlažby. Na modelu byly simulovány průtoky, které mají vliv na třídění zrn v krycí vrstvě a na formování tvaru koryta. Porovnávány byly:

- tvar koryta;
- zrnitost krycí vrstvy materiálu dna.

3.2 Dále následovaly:

- testy v rozsahu Q_a až Q_{100} ;
- kontrola funkčnosti zařízení modelu;
- sledování dělení průtoků mezi bermu a kynetu (byla změněna drsnost v bermě včetně úrovně její koruny);
- došlo k doplnění opevnění;
- byl stanoven počátek pohybu dnových splavenin a bylo potvrzeno, že se nedostávají do UPP;
- UPDS zachytí veškeré dnové splaveniny ($d > 15$ mm), byla potvrzena výborná třídící schopnost UPDS.

4 Další postup a jiné

- 4.1 Doc. Zachoval představil další postup modelových prací:
- bude nutné upravit korunu přelivu UPP včetně úpravy drsnosti jeho dna;
 - na modelu budou simulovány povodňové vlny PV₅, PV₁₀, PV₂₀, PV₅₀ a PV₁₀₀ a následovně bude vyhodnocován objem a hmotnost zachycených splavenin;
 - bude dokončována zpráva.
- 4.2 Ing. Švancara upozomil na nutnost zohlednit efektu hladové vody pod UPDS při návrzích úprav v konci vzdutí nádrže NH, aby nedošlo k zahlubování koryta mezi koncem vzdutí VDNH při Hz a UPDS.
- 4.3 Lze předpokládat, že model potvrdí vhodnost výchozího návrhu pro dosažení funkce objektu.
- 4.4 Objednateli bylo přislíbeno konceptu závěrečné zprávy shrnující výsledky modelových zkoušek dne 18. 03. 2016. Termín závěrečného projednání za osobní účasti řešitelů bude ještě upřesněn.

5 Prohlídka modelu

- 5.1 Přítomní se po ukončení prezentace přesunuli do prostoru laboratoře, kde byl proveden výklad k funkci fyzikálního model a ukázka.
- 5.2 Omočené plochy modelu byly upraveny pro příslušnou drsnost. Drsnost povrchu bermy byla vytvořena tříděným štěrkem se zmitostí, která má odpovídat součinitel drsnosti, jakou by měl uvažovaný travní kryt.
- 5.3 Na modelu byly simulovány průtoky Q₁, Q₅, Q₁₀, Q₂₀, Q₁₀₀.

6 Různé

- 6.1 Z režimu proudění a s uvažováním malé četnosti zaplavování ploch pod levobřežním polem mostu na Milotice lze usuzovat, že by zde mohla být vedena migrační cesta suchozemských živočichů (viz migrační studie – bude projednáno na příslušném jednání).

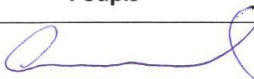


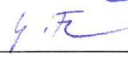
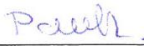




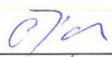



Zaznamenali: Ing. Michaela Tvrzníková; doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.; Ing. Jiří Švancara
Podpisy přítomných jsou uvedeny na prezenční listině.
Rozdělovník: Přítomným prostřednictvím elektronické pošty.

Příloha č.1: Prezentace řešitele (doc. Zachoval)

PREZENČNÍ LISTINA

Hydraulický modelový výzkum prostoru pro sedimentaci říčních splavenin v horní části zátopy
VD Nové Heřminovy

dne 25.2.2016 v LVV ÚVST FAST VUT v Brně včetně školení o bezpečnosti.

Č.	Jméno a příjmení	Organizace	Podpis
1	Zbyněk Zachoval	VUT v Brně	
2	Hrubá Eva	Povodň. Odby	
3	FUUKA	—	
4	FUUKA	-II-	
5	Lukáš Pavlas	-II-	
6	BADEK PEKARĚ	-II-	
7	Jan Šiš	Povodň. Odby, s.p.	
8	Jiří Konečný	-II-	
9	MARKEL BRÁDLO	AQUATIS o.s.	
10	MAREK ČEJDA	-II-	
11	MICHAELA TRZEMÍKOVÁ	-II-	
12	Jana Páteková	VUT v Brně	
13	JIŘÍ ŠVANCARL	AQUATIS o.s.	
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			