



OPERAČNÍ PROGRAM
ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ



EVROPSKÁ UNIE | Pro vodu,
Fond soudržnosti vzduch a přírodu

DOLNÍ VLTAVA – PODKLADY PRO OPTIMALIZACI ZVLÁDÁNÍ POVODŇOVÝCH RIZIK A OCHRANY PŘED POVODNĚMI

TECHNICKÁ ZPRÁVA

ZÁŘÍ 2015





OPERAČNÍ PROGRAM
ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ



EVROPSKÁ UNIE | Pro vodu,
Fond soudržnosti vzduch a přírodu

DOLNÍ VLAVA – PODKLADY PRO OPTIMALIZACI ZVLÁDÁNÍ POVODŇOVÝCH RIZIK A OCHRANY PŘED POVODNĚMI

TECHNICKÁ ZPRÁVA

Pořizovatel:



Povodí Vltavy, státní podnik
Holečkova 8
Praha 5
150 24

Zhotovitel:



DHI a.s.
Na Vrších 1490/5
Praha 10
100 00

V PRAZE, ZÁŘÍ 2015

Obsah:

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod..... | 5 |
| 2 | Řešená témata | 6 |
| 3 | Použité modely | 8 |
| | MIKE 21C | 8 |
| 4 | Přehled podkladů | 9 |
| 4.1 | Topologická data | 9 |
| 4.1.1 | Digitální model terénu..... | 9 |
| 4.1.2 | Zaměření koryta Vltavy, projekty prohrábek a úprav v korytě | 10 |
| 4.1.3 | Mapové podklady | 10 |
| 4.2 | Hydrologická data | 11 |
| 4.3 | Doplňující podklady – technické a provozní informace, zprávy, studie, dokumenty, literatura | 11 |
| 5 | Aplikace modelů, kalibrace..... | 12 |
| 5.1 | Základní poznatky a přístupy | 12 |
| 5.1.1 | Teorie pohyblivého dna | 12 |
| 5.1.2 | Vliv vegetačních období | 12 |
| 5.1.3 | Plynulá interpolace součinitelů hydraulických drsností podle průtoku | 13 |
| 5.2 | Model „Praha“ | 13 |
| 5.2.1 | Topologická data | 13 |
| 5.2.2 | Schematizace území, aplikace modelu | 14 |
| 5.2.3 | Tvorba nové mapy hydraulických drsností | 14 |
| 5.2.4 | Kalibrace modelu, hydraulické drsnosti | 15 |
| 5.2.5 | Úpravy modelu pro jednotlivé etapy studie..... | 20 |
| 5.3 | Model „Klecany – Mělník“ | 20 |
| 5.3.1 | Topologická data | 21 |
| 5.3.2 | Schematizace území, aplikace modelu | 22 |
| 5.3.3 | Kalibrace modelu, hydraulické drsnosti | 23 |
| 5.3.4 | Úpravy modelu pro jednotlivé etapy studie..... | 26 |
| 6 | Etapa A - Posouzení účinnosti dosavadních opatření pro různé návrhové N-leté průtoky | 27 |
| 6.1 | Ověření stupně ochrany protipovodňových opatření v rámci modelu Praha..... | 27 |
| 6.2 | Ověření stupně ochrany protipovodňových opatření v rámci modelu Klecany – Mělník..... | 28 |
| 6.3 | Ověření konzumčních křivek hlavních profilů | 33 |
| 6.3.1 | Analýza křivky LGS Praha – Chuchle + zvážení přesunu měření vysokých průtoků na jiný pražský vodočet 33 | |
| 6.3.2 | Analýza křivky LGS Mělník..... | 34 |
| 6.3.3 | Analýza křivky LGS Vraňany (+ ověření zpětného vzdutí od Labe) | 34 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 7 | Etapa B - Posouzení návrhů změn vyplývajících z nového VH řešení Vltavské kaskády a manipulací za povodní na ochranu území pod Vltavskou kaskádou | 36 |
| 8 | Etapa C - Posouzení možnosti zvýšení neškodného průtoku pod Vltavskou kaskádou | 37 |
| 9 | Etapa D- Analýza změn hladin, rozsahu rozlivů a objemů vyvolaných výstavbou PPO | 38 |
| 10 | Etapa E - Sestavení ovlivněných Q-H křivek na soutoku Vltavy s Berounkou | 40 |
| 11 | Závěry a doporučení | 44 |
| | LITERATURA | 46 |

1 Úvod

Po průchodu nedávných povodní předmětným územím úseku dolní Vltavy od posledního díla Vltavské kaskády VD Vrané po soutok Vltavy s Labem zůstávají mezi odbornou vodohospodářskou veřejností téma, na která zatím nebylo možno dosud použitými prostředky a metodami dát uspokojivou odpověď. Tyto nejasnosti lze rozřadit do následujících typů:

Hydrologické – vyhodnocení průběhů povodní a jejich kulminačních průtoků je nesmírně náročná záležitost a při prozatímním použití převážně bilančních metod je i při současném ověřování průtoků hydrometrováním v průběhu povodně problematická. Problematičnost se ukazuje hlavně při pokusech rekonstruovat jednotlivé epizody pomocí hydrodynamického modelu a simulovat tak průchod skutečné povodňové vlny ve spojených úsecích říční sítě. V úseku dolní Vltavy a na soutoku s Labem dodnes nejsou vyjasněny nesrovnanosti mezi průtoky vyhodnocenými v hlavních měrných LGS profilech Praha – Chuchle, Vraňany a Mělník.

Společenské – po povodni 2013 se objevila tvrzení, že nově vybudovaná protipovodňová opatření po povodni 2002 významně zhoršila situaci v průběhu povodně v červnu 2013 v oblasti soutokové kotliny Vltavy a Labe. Podobným tématem se stal neškodný průtok, vypouštěný z Vltavské kaskády, respektive diskutovaná možnost jeho zvýšení. Rovněž byly vedeny diskuze o změně manipulačního řádu Vltavské kaskády, který by umožnil zvýšení retenčního objemu a tím zvýšil možnost ovlivnit průběh povodni. V neposlední řadě pak proběhla diskuze, řešící účel a účinnost historických ochranných a koncentračních hrází v úseku Veltrusy - Mělník.

Proto byla zadána tato svou komplexností a rozsahem unikátní studie, mající za cíl pomocí dvou existujících 2D hydrodynamických modelů analyzovat průběh tří největších povodňových epizod z nedávné doby, provést kalibraci modelů na tyto povodně, pokrývající svým rozsahem vlastně celý interval povodňových průtoků, zajímavých z hlediska problematiky protipovodňové ochrany a pomocí zkalirovaných modelů potom posoudit účinnost dosud vybudovaných protipovodňových opatření, jejich vliv na průběh povodně a analyzovat efekt uvažovaných opatření nestavebního typu – zmírňování dopadu povodně pomocí manipulací na dílech Vltavské kaskády.

Projekt byl spolufinancován z prostředků Evropské unie (Fond soudržnosti) prostřednictvím Operačního programu Životní prostředí z Prioritní osy 1, oblast podpory 1.3.1.

2 Řešená témata

Celý projekt byl rozdělen do pěti tematických etap, kterým předcházel důkladný rozbor problematiky, aktualizace obou modelů, jejich kalibrace a vytvoření systému plynulého použití modelů pro celý rozsah zkoumaných povodňových průtoků, analýza konzumčních křivek hlavních limnigrafických profilů. Etapy byly rozděleny následujícím způsobem:

Etapa A: Posouzení účinnosti dosavadních opatření pro různé návrhové N-leté průtoky

- Ověření stupně ochrany protipovodňových opatření v rámci modelu Praha;
- Ověření stupně ochrany protipovodňových opatření v rámci modelu Klecany – Mělník
- Analýza měrných křivek LGS stanic Praha – Chuchle, Vraňany a Mělník

V rámci této etapy se měla analyzovat vybudovaná protipovodňová opatření v celém úseku z hlediska stupně ochrany – průtoku, při kterém dochází k jejich přelití. V soutokových oblastech se měl zároveň vyšetřit vliv kombinace průtoků z obou řek a pokusit se jej přehledně kvantifikovat. Dále se měla vyšetřit funkce historických ochranných a koncentračních hrází v úseku Veltrusy - Mělník a pokusit se tuto funkci dokumentovat a stanovit území, které jednotlivé hráze chrání do okamžiku jejich přelití. Jako poslední úkol této etapy měla být (pomocí hydrodynamických simulací) provedena analýza tří hlavních měrných profilů v oblasti s cílem vyjasnit nesoulady ve vyhodnocených průtocích historických povodní a navrhnut případná řešení.

Etapa B: Posouzení návrhů změn vyplývajících z nového vodo hospodářského řešení Vltavské kaskády a manipulací za povodní na ochranu území pod Vltavskou kaskádou

Jako podklad k řešení této etapy byla použita studie „Prověření strategického řízení Vltavské kaskády – parametry manipulačního řádu. FSv ČVUT, Praha, prosinec 2014“ [10]. Její výsledky – hydrogramy v profilu Praha – Chuchle - představují možné využití retenčního objemu a manipulace na Vltavské kaskádě pro případ povodně z června 2013, a to variantně bez předpovědi průtoků a s jejich předpovědí. V rámci etapy měly být provedeny hydrodynamické simulace průchodu modifikovaných povodňových vln zájmovým úsekem a kvantifikován důsledek těchto manipulací na průběh povodňové vlny.

Etapa C – Posouzení možnosti zvýšení neškodného průtoku pod Vltavskou kaskádou

- Výpočet rozsahu záplavy pro nově stanovený neškodný průtok v modelu Praha;
- Výpočet rozsahu záplavy pro nově stanovený neškodný průtok v modelu Klecany – Mělník.

V rámci Etapy C měly být provedeny ustálené simulace současného neškodného průtoku a zadavatelem definovaných variant zvýšení neškodného průtoku. Výsledek měl být analyzován podle záplavových čar, vygenerovaných z vypočtených průběhů hladin a digitálního modelu terénu.

Etapa D – Analýza změn hladin, rozsahu rozlivů a objemů vyvolaných výstavbou protipovodňových opatření (dále jen PPO)

- Odstranění definovaných PPO z terénu modelu a výpočet vybraných průtoků na modelu Praha;
- Odstranění definovaných PPO z terénu modelu a výpočet vybraných průtoků na modelu Klecany – Mělník;

V rámci etapy D měl být fakticky zkoumán vliv nově vybudovaných protipovodňových opatření na průchod povodně zájmovým územím.

Etapá E – Sestavení ovlivněných Q-H křivek na soutoku Vltavy s Berounkou

- Výpočet pro kombinace průtoků z Vltavy a Berounky;
- Analýza křivek Zbraslav a Radotín

V rámci Etapy E měl být aktualizován a rozšířen systém výpočtů, řešící kombinaci průtoků z Vltavy a Berounky v oblasti soutoku, vyvinutý v rámci studie „Doplnění Operačních map rozlivu Vltavy a Berounky na území hl. města Prahy o nižší povodňové průtoky 2011“ [9]. Tento systém pracuje s myšlenkou, že pro jakýkoli bod v oblasti ovlivňované průtoky ze dvou přítoků nelze sestavit jednoznačnou Q-H křivku, ale diagram několika Q-H křivek pro jednotlivé průtoky z druhého přítoku, které ovlivňují hladinu. Pásma průtoků mělo být rozšířeno, křivky spočítány s aplikací plynulé změny hydraulických parametrů dle provedených kalibrací a hned také použity pro analýzu podružných měrných profilů Zbraslav a Radotín, nacházejících se v oblasti vlivu soutoku, a analýzy stupně ochrany PPO, také se nacházejících v této oblasti.

3 Použité modely

Výpočty charakteristik proudění ve všech zájmových oblastech byly provedeny matematickými modely MIKE 21C (DHI, Hørsholm, Dánsko). Jednalo se jak o výpočty metodou neustáleného proudění – rekonstrukce průběhu povodňových vln (skutečných i teoretických), tak o výpočty metodou ustáleného proudění – simulace charakteristik proudění při kulminačním průtoku povodňových vln a při různých kombinacích ustálených průtoků v soutokových oblastech Vltavy a Berounky, resp. Vltavy a Labe. Použití modelů v rámci řešené studie je podrobněji popsáno v kap. 5.

MIKE 21C

Dvourozměrný matematický model proudění v otevřeném korytě s inundačním územím MIKE 21C je založen na řešení Saint-Venantových diferenciálních rovnic (rovnice kontinuity a rovnice zachování hybnosti) metodou konečných differencí v jednotlivých bodech půdorysné výpočetní sítě. Model MIKE 21C pracuje v neekvidistantní křivočaré síti; tzn. že jeho výpočetní síť lze, na rozdíl od pravoúhlých (obdélníkových) sítí, přizpůsobit tvaru území a tak omezit počet bodů a tím i velikost výpočetní maticy. Neekvidistantní síť dále umožňuje zahuštění výpočetních bodů (tj. zmenšení velikosti výpočetních „buněk“) v oblastech, kde je třeba podrobněji modelovat reliéf terénu (např. objekty na toku), resp. v oblastech, kde požadujeme velmi detailní znalost výsledků.

Výstupem modelu MIKE 21C jsou primárně tyto charakteristiky proudění:

- hodnoty úrovní hladiny vody
- vektory rychlostí (tj. směr a velikost vektorů rychlostí, nebo též možno vyjádřit pomocí velikosti podélné a příčné složky vektorů rychlostí)

ve všech výpočetních bodech zájmové oblasti a pro všechny počítané časové kroky. 2D model tak dává reálnou představu o zakřivené ploše hladiny v celém zájmovém území (např. při ustáleném proudění je hladina v neprotékaném inundačním území výše než v korytě) i o rozdělení rychlostí v celé oblasti.

Charakteristiky proudění ovlivňují především reliéf terénu (tvar koryta, inundačního území, sklonové poměry) a odpory proudění (drsnost a tvarové odpory – zúžení resp. rozšíření průtočného profilu, oblouky, obtékání překážek, proudění přes objekty, apod.). Velkou pozornost je proto třeba věnovat přípravě souboru s geometrickými daty pro 2D model, neboť tento soubor v sobě obsahuje jak vlastní reliéf terénu tak i veškerá data pro výpočet tvarových odporů.

Podklady pro vytvoření všech modelů v softwaru MIKE 21C, jejich geneze, rozsah, kalibrace a použití jsou podrobně popsány v kap. 5.

4 Přehled podkladů

Při zpracování projektu byly použity tyto podklady:

Hydrologické podklady:

- Hodnoty N-letých průtoků (ČHMÚ, 2012)
- Časové řady vodních stavů a průtoků z LGS stanic z povodní 2013, 2006, 2002 (ČHMÚ)

Topologické podklady:

- DMT (ÚRM MHMP, Povodí Vltavy, státní podnik, DHI, a.s. 2009-2011)
- DMR5G (ČZÚK, a.s., 2011 - 2012)
- ORTOFOTO v digitální podobě (ÚRM MHMP, Povodí Vltavy, státní podnik) 2013, 2014
- ZABAGED v digitální podobě (Povodí Vltavy, státní podnik)
- Výkresy objektů z TPE (Povodí Vltavy, státní podnik)
- Manipulační řady objektů na toku
- Projekty úprav v korytě v rámci odstraňování škod po povodni 6/2013
- Zaměření ochranných hrází v úseku Klecany-Mělník pro zápis do KN 2009-2010 (Povodí Vltavy, státní podnik)
- Zaměření koryta měřicím plavidlem Valentýna II., 2001-2014
- Projekty PPO obcí Veltrusy, Zálezlice, Hořin

Další podklady:

- Říční kilometráž (digitální, Povodí Vltavy, státní podnik)
- Osa toku (digitální, Povodí Vltavy, státní podnik)
- Zpracování map povodňového nebezpečí a povodňových rizik v oblasti povodí Vltavy (Povodí Vltavy, státní podnik, 2013)
- 2D Povodňový model Prahy (DHI, a.s., 2001-2010)
- Kalibrační podklady – Q-h křivky měrných profilů (Povodí Vltavy, státní podnik, ČHMÚ)
- Fotodokumentace a odborné poznatky z terénního šetření (DHI, a. s. 2012-2015)
- MPN Dolního Labe (DHI, a.s., 2011-2012)

4.1 Topologická data

4.1.1 Digitální model terénu

Pro úsek Praha byl jako hlavní topologický podklad použit DMT území Prahy (formát DMT Atlas), jehož základ pochází od ÚRM MHMP, do kterého byla zpracovatelem dodána vodohospodářsky důležitá topologická data (zaměření koryta řek, vodohospodářské objekty) a který je po celou dobu spolupráce společnosti DHI a.s. s MHMP kontinuálně doplňován a aktualizován nově pořizovanými daty v terénu záplavového území, stejně jako v korytech řek, ať již geodetickými či za pomoci vyměrovacích plavidel.

Pro tuto studii byly použity dvě verze modelu - základní model, aktualizovaný v letech 2009-2010, kdy byl použit pro studie „Operační mapy rozlivu Vltavy a Berounky na území hl. města Prahy pro různé povodňové průtoky 2009“ a „Podklad pro aktualizaci záplavových území 2010 hl. města Prahy 2010“. V tomto modelu je zanesena většina městských částí z velmi přesného pozemního zaměření, pořízeného IPR (dříve URM) MHMP postupně v letech 2004-2009. Též jsou v něm ručně vloženy vodohospodářské objekty na vodním toku a vymodelováno koryto řeky z postupně aktualizovaných zaměření – časově postupným systémem (oblasti, které nepokrývá nejnovější zaměření, jsou doplňovány vždy pomocí starších dat).

Druhým modelem, použitým pro současnou studii, je prozatím nejnovější digitální model terénu Atlas od společnosti Geodis a.s. (2011), aktualizovaný pomocí nového náletu území hl. m. Prahy od z roku 2010. Ve vnitřním městě je model dále doplněn výše zmíněným pozemním zaměřením jednotlivých městských částí.

Po vložení pozemních zaměření je terén vnitřního města takřka identický u obou modelů, batimetrie byla proto vytvořena z původního modelu 2009-2010 – z důvodu lepšího popisu koryta a objektů. Pro generaci terénu 2D modelu v inundacním území (mimo koryto) mimo území vnitřního města a hlavně v oblasti soutoku byl tudíž použit novější model 2011. Ortofotogrammetrický nálet pro tento model vykázal v některých oblastech poměrně

velké rozdíly v kótě terénu, kde po kontrole náhodnými pozemními GPS měřeními konstatoval zpracovatel výrazně větší přesnost nového modelu.

Pro úsek **Roztoky-Mělník** byl jako hlavní podklad použit DMT, vytvořený ve formátu DMT Atlas z DMR 5G od ČZÚK, a.s. v r. 2012 pro studii „Zpracování map povodňového nebezpečí a povodňových rizik v oblasti povodí Vltavy“ [3]. Jako další podklad byl použit již zmíněný DMT Atlas širšího území Prahy, pořízený ÚRM MHMP a ortofotogrammetricky zpracovaný firmou Geodis, spol. s r.o. v roce 2011, který zasahuje po řece Vltavě až pod řežský meandr. Do takto zkombinovaného modelu terénu byla posléze přidána zaměření koryta řeky vyměřovacím plavidlem Valentýna II. a v úseku Vraňany – soutok Labe s Vltavou geodetické zaměření přičních profilů, pořízené DHI a.s. a zaměřené firmou Geodis spol. s. r.o. na jaře 2013. DMT koryta Labe a přilehlého záplavového území bylo převzato ze studie „Tvorba map povodňového nebezpečí a povodňových rizik v oblasti povodí horního a středního Labe a uceleného úseku dolního Labe. DHI a.s., Praha, prosinec 2012“ [4]. Dále byla do modelu terénu přidána zaměření hrází (pro zápis do KN 2009-2010), nová protipovodňová opatření Veltrusy a Zálezlice, zaměření hrází podél plavebního kanálu Vraňany-Hořín, rekonstrukce pravobřežní hráze v úseku Vraňany - Lužec n.V. dle projektu v rámci odstraňování škod po povodni 2013.

4.1.2 Zaměření koryta Vltavy, projekty prohrábek a úprav v korytě

Vzhledem k použité hypotéze „teorie pohyblivého dna“ v rámci aktuálně zpracovávané studie byl na zaměření a data, na jejichž základě se dno tvoří, brán obzvláštní zřetel. Základem pro tvorbu minimálního dna byla zaměření dna Vltavy, pořízená pravidelně vyměřovací lodí Valentýna II. Povodí Vltavy, státní podnik. K dispozici byly sady měření 2001 – 2014, ze kterých byly zpracovatelem sestaveny digitální modely terénu DMT Atlas v rozsahu zaměření, tedy v plavební dráze.

Pro nesplavný úsek Vltavy – jez Vraňany - soutok s Labem byly použity zaměřené přičné profily Vltavy po cca 150 m z dubna 2013 (Geodis, spol. s.r.o.).

V nesplavném úseku Vltavy pod jezem Troja bylo použito zaměření z roku 2009 (W-computer) pro Povodí Vltavy, státní podnik.

V nesplavném úseku Berounky byl použit DMT dna, který je součástí DMT Prahy 2009-2010, a je sestaven ze zaměření 2007 (Kafka a syn, Povodí Vltavy, státní podnik), a zaměření úseku Přístav Radotín - Lávka Radotín (Geomax, 2009) pro chystanou studii ŘVC splavnění Berounky do Radotína. Pro tento úsek byl použit taktéž projekt rekonstrukce jezu Černošice (HDP a.s., 2009).

Pro tvorbu „návrhového dna“ byly použity projekty prohrábek a úprav dna pro PVL, vypracované v rámci akce odstraňování škod po povodni 2013: projekty prohrábek DPK Štvanice, HPK Troja, odstranění nánosu u ZOO, odstranění nánosu Klecany-podjezí, odstranění nánosu Dolany - podjezí, Dolany – zdrž, DPK Hořín, prohrábka zdrže Vraňany, odstranění nánosu a obnovení ostrova pod jezem Miřejovice, prohrábka Miřejovice - zdrž, odstranění břehového nánosu a obnova opevnění Ouholice, odstranění nánosů v úseku Vraňany - soutok s Labem, odstranění nánosu zdrž Klecany.

4.1.3 Mapové podklady

Pro práci s modelem a prezentaci výsledků **modelu Praha** byly jako hlavní mapový podklad použity sady leteckých ortofotomap z roku 2014 (nálet 28.9.2014), dále byly pro účely zpracování modelu a kalibrace použity sady ortofotomap 2014 období mimovegetační (nálet 20. a 21.3.2014), 2013 po povodni (nálet 2.8 a 7.9.2013)), 2013 během (den po kulminaci 5.9.2013) povodně a vrstvy digitální mapy Prahy (JDMP) z let 2009-2014, vše poskytnuto IPR MHMP. Dále byly pro kontrolu správnosti terénu použity DSPS (dokumentace skutečného provedení stavby) ve specifikovaném rozsahu záplavového území.

Pro tvorbu **modelu Klecany - Mělník** a pro prezentaci výsledků použity letecké snímky z roku 2013 po povodni, poskytnuté státním podnikem Povodí Vltavy.

Všechny souřadnice jsou v polohopisném systému S_JTSK a výškovém systému Balt po vyrovnání.

4.2 Hydrologická data

Tab.4.1 - N-lété průtoky (Q_N) v $m^3.s^{-1}$

| Hydrologický profil | Datum pořízení | Q_5 | Q_{20} | Q_{100} | Q_{500} | Třída přesnosti |
|---------------------------------|----------------|-------|----------|-----------|-----------|-----------------|
| Vltava nad soutokem s Berounkou | 18. 4. 2006 | 1300 | 1970 | 2870 | | II |
| Berounka nad soutokem s Vltavou | 18. 4. 2006 | 627 | 1020 | 1580 | | II |
| Vltava pod soutokem s Berounkou | 2006 | 1770 | 2720 | 4030 | | II |
| Vltava nad soutokem s Berounkou | 27.6.2011 | | | | 3900 | Neuved. |
| Berounka nad soutokem s Vltavou | 27.6.2011 | | | | 2270 | Neuved. |
| Vltava pod soutokem s Berounkou | 27.6.2011 | | | | 5530 | Neuved. |
| Vltava nad Zákolanským p. | 13.5.2012 | 1785 | 2750 | 4060 | 5550 | II |
| Vltava ústí | 13.5.2013 | 1800 | 2770 | 4085 | 5300 | II |
| Labe nad ústím Vltavy | 13.4.2012 | 772 | 1064 | 1420 | 1800 | II |
| Labe pod ústím Vltavy | 13.4.2012 | 2060 | 2990 | 4150 | 5410 | II |

Třída přesnosti dle ČSN 75 1400

- Jako další hydrologická data byly použity časové řady hladin a průtoků z LGS stanic z povodní 2002, 2006, 2013 (ČHMÚ)

4.3 Doplňující podklady – technické a provozní informace, zprávy, studie, dokumenty, literatura

Jako doplňující podklady byly použity manipulační řady všech manipulovatelných objektů na toku, dodané správci toků, státním podnikem Povodí Vltavy, stávajici i starší konzumční křivky limnigrafických stanic a informace z webu ČHMÚ.

5 Aplikace modelů, kalibrace

5.1 Základní poznatky a přístupy

5.1.1 Teorie pohyblivého dna

Na základě vyhodnocení batymetrických dat z různých zaměření koryta Vltavy z let 2002 až 2014 a po analýze výsledků prvních kalibračních simulací a jejich porovnání s výsledky historických kalibračních simulací došlo řešitelé k poznatku, že při velkých až extrémních povodních dochází k remobilizaci dnových splavenin, a během určitého období těchto povodňových epizod (především v době kulminace) nastává pohyb splavenin. Lze tedy předpokládat, že v okamžiku kulminace je říční dno na podstatně nižší kótě, než dno naposledy zaměřené (v období mimo povodně). Kótou tohoto „nižšího dna“ sice nelze zcela přesně stanovit, ale dá se s jistotou předpokládat, že neobsahuje nánosy, typicky naměřené po každé větší povodni nebo po delší periodě pozvolného usazování. Při tvorbě souboru „batymetrie“ bylo proto použito tzv. „minimální dno“, vytvořené jako obálka minim ze všech dostupných zaměření. Vyhodnocení výsledků kalibračních simulací, při kterých bylo použito „minimální dno“, potvrzuje, že vypočtené charakteristiky proudění (především průběh hladin) lépe odpovídají vyhodnoceným údajům z reálné povodně. Rovněž použité kalibrační parametry (u 2D modelů především prostorově proměnné definice součinitelů drsnosti – tzv. „mapy hydraulických drsností“) vykazují realistické hodnoty, a to v poměrně velkém rozsahu průtoků. V případě použití aktuálně zaměřeného dna, které obsahuje nánosy usazené po povodni, je nutno se součiniteli hydraulických drsností v korytě mnohem více pracovat, aby se kalibrační hladina v modelu dostala na hodnoty, zaměřené při povodni. Výsledkem jsou bud' výrazné a nepřirozené změny drsnostního součinitele po úsecích, nebo při zachování plynulých změn součinitele drsností větší rozptyl hladin oproti reálně zaměřeným hodnotám. Při pozdějším použití modelu pro jinou úlohu s použitím nového zaměření dna potom logicky hladiny neodpovídají kalibračním hodnotám i při jinak nezměněném terénu a totožném průtoku.

Přístup pomocí použití minimálního dna samozřejmě neřeší nastíněný problém zcela dokonale: nelze změřit skutečnou úroveň dna v řece v průběhu povodně, a také okamžik remobilizace splavenin se jistě bude lišit místně po úsecích a pravděpodobně i v čase dle velikosti povodně, která splaveniny transportovala. Výsledky jsou ale i s minimálním dnem, vytvořeným pouze z dostupných zaměření, velmi uspokojivé. V běžné praxi se samozřejmě na modelovaných tocích vždy budou vyskytovat úseky, kde bude použití této metody nemožné, třeba jednoduše pro nedostupnost více zaměření (typicky např. nesplavné úseky). Zde je nutno uvést, že v praxi při kalibraci modelu slouží základní kalibrační parametr 2D modelu, tedy součinitel hydraulického odporu dna, k náhradě vlivu celé řady jevů, které bud' není možno modelem tohoto typu postihnout, nebo je prostě neznáme: kromě skutečného hydraulického odporu také např. k náhradě zvýšeného turbulentního odporu, zvýšeného odporu vlivem nesených splavenin (dvoufázová směs), atd. Mezi tyto vlivy patří též vliv změny dna, a protože bez použití teorie minimálního dna již tak jako tak při kalibraci na reálnou epizodu musíme nižší hloubku v modelu oproti skutečnosti kompenzovat sníženým součinitelem odporu. Pro úseky bez možnosti použití minimálního dna bude nutno tedy postupovat touto původní cestou. I s popsanými omezeními však metoda použití minimálního dna eliminuje značnou část problematických míst s velkým pohybem dna a značně usnadňuje aplikaci modelu na širší pásmo povodňových průtoků.

Při porovnání současných kalibrací s historickými a po diskusích s provozními pracovníky Povodí Vltavy, státní podnik, došli řešitelé k názoru, že pohyb dna nastal již i při nejnižší kalibrační povodni 2006, s kulminačním průtokem cca 1450-1500 m³/s ve Vltavě pod soutokem s Berounkou. Tento průtok bude pravděpodobně blízko průtokového limitu pro počátek pohybu splavenin ve zkoumaných úsecích.

Pro zkoumaný úsek se zdá, že pro (z hlediska protipovodňové ochrany a prevence) zajímavý interval průtoků (od cca 1200-1500 m³/s až do výše extrémních povodní) použití minimálního dna výrazně usnadňuje kalibraci na všechny tři historické povodně a taktéž usnadňuje použití systému plynulé změny kalibračních parametrů v celém pásmu povodňových průtoků. Podmínkou použití v budoucnosti je, aby se pro jakékoli další použití používalo toto minimální dno, byť případně v delším výhledu korigované dle dalších zaměření.

5.1.2 Vliv vegetačních období

Dalším zásadním poznatkem z ucelené kalibrace obou modelů na tři reálné povodně 2002, 2006 a 2013 je překvapivě velký vliv vegetačních období na součinitele hydraulických drsností v inundaci oblasti mimo urbanizované území. Při kalibrování modelu se vždy vychází z posouzení využití území pomocí map využití území či z leteckých snímků a rekognoskace v terénu, a dle typu vegetačního porostu či typu pěstovaných plodin

se na začátku kalibrace stanoví totožné či podobné hodnoty Manningových součinitelů drsnosti pro určitý druh vegetace. Tak tomu bylo i u kalibrací na povodňové epizody ze srpna 2002, dubna 2006 a června 2013, Vzhledem k rozdílným vegetačním obdobím všech tří kalibračních povodní však byly tyto hodnoty významně upravovány. Tento přístup vychází především ze zkušeností, získaných při řešení studie [8], která prokázala, jak relativně velký hydraulický odpor může klást svěží vegetace s pevnými lodyhami na začátku léta (prakticky neprůtočná pole řepky a podobných plodin při povodni v červnu 2013). Kromě přímého působení rozbujelé vegetace je také charakteristické její působení nepřímé formou upcpávání hlavně pletivových plotů zvýšeným množstvím splává – trávy, bylin, listí apod. Při zaplavení pole, osázeného hustě silnou plodinou – do určitého poměru výšky záplavy k výšce rostliny – lodyhy vydrží nápor vody, pole se na straně nátoku zanese jemným plávím a stane se zcela neprůtočným do hloubky až několika desítek cm. Pletivové ploty, zanesené např. trávou, jsou schopné se změnit v prakticky nepropustné stěny, hradící až do okamžiku jejich destrukce – do výšky v řádu metrů. Tyto fenomény jsou velmi náročné na odhalení a vyžadují velmi pečlivý průzkum zájmového území.

Vegetace v polovině srpna 2002 (na polích již často sklizená) kladla hydraulický odpor o poznání nižší a povodeň z dubna 2006 (začátek jara) je charakteristická relativně nízkými hydraulickými odpory inundačního území i břehové vegetace.

Ačkoli tedy z jednotlivých kalibrací vyplynuly příslušné hodnoty součinitelů hydraulických drsností, definitivní sady, použité pro navazující výpočty pro etapy projektu A až E, používají nejnepříznivější hodnoty součinitelů hydraulických drsností, odpovídající vrcholnému vegetačnímu období.

5.1.3 Plynulá interpolace součinitelů hydraulických drsností podle průtoku

V odstavci 5.1.1 je zmíněn fakt, že součinitel hydraulické drsnosti jako hlavní kalibrační parametr slouží k náhradě vlivu celé řady jevů, které buď není možno modelem tohoto typu postihnout (zvýšená turbulence proudu při vysokých průtocích, pohyb dnových splavenin, makrodrsnost, neznámé změny dna). Se zvyšujícím se průtokem se tedy součinitele hydraulické drsnosti v místech s vysokým specifickým průtokem a svislicovými rychlostmi typicky zvyšují. Sady drsností, získané kalibrací, proto zpravidla mají zvyšující se součinitel hydraulické drsnosti v korytě toku, zatímco v inundačním území používají hydraulickou drsnost pro nejnepříznivější vegetační období (viz. 5.1.2). Protože 2D hydrodynamický model neumožňuje zadat plynule měnitelnou mapu hydraulických drsností, byl pro výpočty použit systém interpolace hodnot hydraulických součinitelů v korytě toku podle hodnoty průtoku. Tento systém je zcela vyhovující pro výpočty ustálených průtoků, v případě dynamických simulací je nutno interpolované sady drsností měnit ve více krocích a i tak jsou zpravidla na výstupních hydrogramech i průběžích hladin většinou patrné kroky, ve kterých se sady drsnostních součinitelů mění.

5.2 Model „Praha“

5.2.1 Topologická data

Pro úsek Praha byl jako hlavní topologický podklad použit DMT území Prahy – (kompletní specifikace viz kap. 4.1.1) Pro tuto studii byly použity dvě verze modelu - základní model, aktualizovaný v letech 2009-2010, kdy byl použit pro studie „Operační mapy rozlivu Vltavy a Berounky na území hl. města Prahy pro různé povodňové průtoky 2009. DHI a.s., Praha, březen 2010“ [1] a „Podklad pro aktualizaci záplavových území hl. města Prahy 2010. DHI a.s., Praha, květen 2010“ [2] V tomto modelu jsou je zanesena většina městských částí z velmi přesného pozemního zaměření, pořizovaného IPR (dříve URM) MHMP postupně v letech 2004-2009. Též jsou v něm ručně vloženy vodohospodářské objekty na toku a vymodelováno koryto řeky z postupně aktualizovaných zaměření časově postupným systémem, kdy oblasti, které nepokrývá nejnovější zaměření, jsou doplňovány vždy pomocí starších dat.

Druhým modelem, použitým pro současnou studii, je prozatím nejnovější digitální model terénu Atlas od společnosti Geodis a.s. (2011), aktualizovaný pomocí nového náletu území hl. m. Prahy od z roku 2010. Ve vnitřním městě je model dále doplněn výše zmíněným pozemním zaměřením jednotlivých městských částí.

Protože díky vložení pozemních zaměření je terén vnitřního města takřka identický u obou modelů, byl zde pro vytvoření batymetrie použit původní model 2009-2010 z důvodů lepšího popisu koryta a objektů.

Pro generaci terénu 2D modelu v inundaci (mimo koryto) v oblasti modelu „Soutok“ byl tudíž použit novější model 2011. Ortofotogrammetrický nálet pro tento model vykázal v některých oblastech poměrně velké rozdíly v kótě terénu, kde po kontrole náhodnými pozemními GPS měřeniami konstatoval zpracovatel výrazně větší přesnost nového modelu a výšší kóta terénu celých rozsáhlých oblastí tohoto modelu do značné míry objasnila problémy

s příliš nízkou hladinou v nivě Berounky u výsledků úvodních simulací, prováděných na modelu, používajícím původní terén.

5.2.2 Schematizace území, aplikace modelu

Křivočará (vnitřní ortogonální) výpočetní síť modelu má velikost 3218 x 306, tedy 984 708 výpočetních bodů. Promítnutím této sítě na DMT je získán geometrický (batymetrický) model terénu ve výpočetní síti modelu MIKE 21C o rozměru 3217 x 305 bodů. Hustota sítě (vzdálenost mezi výpočetními body) je proměnlivá - ve městech a v úsecích, kde se nacházejí objekty na toku (mosty, plavební stupně) je výpočetní síť hustší, ve volných říčních tratích a v širokém záplavovém území je výpočetní síť řidší. Míra schematizace zájmového území je dostatečná pro podrobný popis podstatných prostorových jevů prouďení v oblasti. Přílisy mostů a rovněž jezové pilíře a přelivné hrany jezů jsou v geometrickém modelu reprezentovány buď zvýšeným terénem v místě jejich polohy, nebo zadáním hydraulického objektu – jezu v setupu modelu. Domky a bloky domů byly modelovány pomocí podstatně vyvýšeného terénu (nepřelitelné překážky); ploty, mosty s konstrukcí kladoucí při zvýšené hladině odpor a jiné překážky podobného charakteru byly simulovány pruhy zvýšené drsnosti. Linie a stavby PPO, pakliže nejsou součástí DMT (součástí modelu terénu jsou většinou jen zemní valy), byly do batymetrii zadány s kótami horních úrovni PPO konstrukcí (zdi a mobilní hrazení s osazujícími prvky) dle projektové dokumentace.

Jak bylo uvedeno v kap. 5.2.1, terén (batymetrie) modelu byl v oblasti soutoku Vltavy s Berounkou vytvořen s pomocí nového DMT Prahy 2011, v oblasti vnitřní Prahy byl ponechán původní model (používající většinou identická pozemní zaměření jednotlivých městských částí), vloženy byly pouze některé známé změny terénu.

Horní okrajové podmínky:

- Vltava Vrané, ř.km.70,06
- Berounka Kazín, ř.km 9,7

Spodní okrajová podmínka:

- Roztoky-Brnky, ř.km. 38,98

Spodní okrajová podmínka (dělící profil obou modelů Praha a Roztoky-Mělník) v km 38,98 je určena hranicemi hl. m. Prahy.

5.2.3 Tvorba nové mapy hydraulických drsností

Vytvoření nové mapy hydraulických drsností, provedené za pomoci historických i aktuálních sérií ortofotomap, rekognoskací v terénu, různých získaných dat a doplňkově též za pomoci služby Google Street View portálu Google Maps a služby Panorama portálu Mapy.cz, bylo od počátku jedním z hlavních úkolů v rámci studie. Doposud používaná sada drsností inundačního území vznikla v roce 2004, v roce 2009 byla v rámci kalibrace na povodeň 4/2006 modifikována pouze co se týče drsnosti v oblasti koryta. Nová mapa drsností byla již vytvořena s využitím posledních 8 let poznatků o průtočnosti jednotlivých typů území, zástavby a oplocení při velkých povodních. Protože typ zástavby i využití území mimo zástavbu na území města se v období 2002 – 2013, kdy proběhly všechny tři kalibrační povodně, nijak výrazně neměnily, bylo základní rozložení typů drsností použito pro ověřovací kalibrační běhy všech tří povodní, pouze v městech, kde došlo k významným změnám, byla mapa rozložení drsností modifikována. Pro jednotlivé povodňové epizody byly však upraveny hodnoty drsnostních součinitelů vybraných typů porostu dle vegetačního období, ve kterých povodeň proběhla (viz. kap 5.1.2 Vliv vegetačních období). Jak je v uvedené kapitole popsáno, jsou rozdíly hydraulických drsností vlivem vegetačního období překvapivě vysoké, pro potřeby dalších výpočtů v rámci plnění zadání jednotlivých etap studie byly proto použity součinitele hydraulické drsnosti získané kalibrací na povodeň 6/2013, tedy nejnepříznivější hodnoty součinitelů hydraulických drsností, odpovídající vrcholnému vegetačnímu období. Tyto hodnoty Manningových součinitelů hydraulických drsností ukazuje tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Manningovy součinitely hydraulické drsnosti pro model Praha

| Popis povrchu | M | n |
|---|-------|-------|
| Hladké plochy, ulice, volná prostranství | 33,3 | 0,030 |
| Nízká tráva | 25 | 0,04 |
| Vyšší, nesekaná tráva | 16,67 | 0,06 |
| Řidší lesní porost | 14,29 | 0,060 |
| Hustý lesní porost | 12,5 | 0,08 |
| Technické stavby | 13 | 0,077 |
| Keřovitý porost normální, řidší ploty | 10 | 0,1 |
| Keře husté, husté nepropustné ploty | 5,02 | 0,198 |
| Porosty řepky olejky a podobných silných plodin | 13,5 | 0,074 |
| říční koryta: | | |
| Minimální drsnost | 38,56 | 0,026 |
| Maximální drsnost | 30,3 | 0,033 |

5.2.4 Kalibrace modelu, hydraulické drsnosti

Model Praha byl v minulosti (r. 2004) základně kalibrován na povodeň ze srpna 2002, později (r. 2009) na povodeň z dubna 2006 (v Praze $Q < Q_5$). Při kalibracích na povodně 2006 a 2002 tak byly získány dvě sady hydraulických drsností, ze statistického hlediska pro malou povodeň a pro extrémní povodeň. Povodeň v červnu 2013 proběhla až v průběhu zpracování studie [3] a oficiální vyhodnocení povodně nebylo ještě v době jejího dokončení známo, proto nemohla být kalibrace na tuto povodeň provedena. Kalibrace modelu na povodeň 2013 a vytvoření systému sad součinitelů hydraulických drsností, použitelných pro celý rozsah povodňových průtoků byly proto jedním ze základních cílů studie.

Protože z kalibračních pokusů v navazujícím úseku Klecany-Mělník vyplynuly pochybnosti ohledně kulminačního průtoku povodně 2013, odtekajícího z Prahy (bylo velmi obtížné nalézt shodu vypočtených úrovní hladin se zaměřenými značkami při průtoku $3040 \text{ m}^3/\text{s}$, udávaného jako kulminační průtok v LGS Praha – Chuchle při použití věrohodných hodnot hydraulických drsností), byla kalibrace modelu Praha pojata poněkud širší i jako ověření kulminačního průtoku. Pro tento účel pro úsporu času byly pokusy provedeny nejprve na výsekových modelech:

Model Šítkovská zdrž model Šítkovské zdržě byl použit pro ověření kulminačního průtoku povodně s tím, že se jedná o úsek, obsahující několik zaměřených kulminačních značek včetně LGS stanice Praha – Chuchle. Postupně zde byly provedeny simulace ustáleného průtoku pro průtokové varianty kulminačního průtoku povodně 6/2013 $3040 \text{ m}^3/\text{s}$ (oficiální kulminační průtok v profilu LGS Praha – Chuchle), $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ (průtok použitý pro generaci záplavové čáry povodně 6/2013 v úseku Klecany - Mělník v rámci studie [3], a $5160 \text{ m}^3/\text{s}$ (kulminačního průtoku povodně 2002)). Protože tento model byl také postaven za účelem zkoumání vlivu změn dna v bezprostředním okolí profilu LGS Praha – Chuchle na přesnost měření, proto bylo kromě naposled použitého zaměření dna 2007 použito minimální dno, vytvořené jako obálka minim ze všech dostupných zaměření. V prvních simulacích byla použita sada drsností získaná kalibrací na Q_{2002} , která měla v Šítkovské zdrži v korytě toku ostrý předěl přibližně v úrovni Barrandovského mostu- od jezu po Barrandovský most byl použit Manningův součinitel $M= 33,9$, od mostu až k LGS Praha – Chuchle pak podstatně vyšší drsnost $M=27,03$. Důvodem byla evidentně skutečnost přiblížit se hladinou jak značce z povodně 2002 u Barrandovského mostu, tak hladině v profilu LGS Praha – Chuchle. Po sérii simulací, experimentujícími s průtoky pro povodeň $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ a $3040 \text{ m}^3/\text{s}$ (6/2013) a $5160 \text{ m}^3/\text{s}$ (8/2002) a dnem toku ze zaměření 2007 a minimálním dnem, bylo jasné, že po odstranění po fyzikální stránce nepříliš logického předělu drsností a použití jednotné drsnosti $M=30,3$ pro celou

zdrž průběh hladin velmi uspokojivě odpovídá zaměřeným značkám pro průtok Q_{2002} a vyšší průtok Q_{2013} 3200 m^3/s při použití minimálního dna. Ačkoli použití minimálního dna bylo zde zamýšleno spíše pro účely analýzy vlivu nánosu na měření průtoků v LGS Praha – Chuchle, vedl tento výsledek k dvěma základním poznatkům:

- Formulování teorie minimálního dna, použité a ověřené ve všech dalších kalibracích jak modelu Praha, tak Klecany - Mělník, odstraňující do značné míry nutnost nerovnoměrného rozdělení součinitelů hydraulických drsností v korytě toku v podélném směru
- Potvrzení domněnky, že kulminační průtok povodně 6/2013 mohl být o něco vyšší než oficiálních 3040 m^3/s , pravděpodobně přibližně 3200 m^3/s . Pro nižší průtok by nastala nutnost použít vyšší součinitele hydraulických drsností než pro podstatně vyšší průtok Q_{2002} , což je fyzikálně neodůvodnitelné. Dále se ukázalo, že intenzita jevů turbulence, chodu splavenin a vzniku makrodrsností, které zvýšené drsnostní koeficienty nahrazují, se u povodní této velikosti již zřejmě tolík neliší.

Model Praha-soutok: výsekový model soutoku byl použit pro dynamické simulace v rámci studie [8] v odpovídající části, posuzující transformační vliv inundačního území kotliny soutoku Vltavy a Berounky na průchod povodně 2013. Jako horní okrajová podmínka Vrané na Vltavě byl použit oficiální hydrogram ČHMÚ v LGS profilu Zbraslav, posunutý o 30 min. jako horní okrajová podmínka Kazín na Berounce byl použit výsledný hydrogram dynamické simulace na modelu Berounky mezi Berounem a Černošicemi. Při použití tohoto hydrogramu se však ukázalo, že v období mezi první (menší) kulminaci a druhou (vyšší) kulminací průtoku z Berounky došlo zřejmě vlivem vytrvalého deště v modelované oblasti k výraznému průtoku z mezipovodí a v soutokové kotlině Berounky se nedostává vody jak na hladině, tak na průtoku. V dalších krocích byl jako horní okrajová podmínka Kazín na Berounce použit oficiální hydrogram ČHMÚ v Radotíně, fázově posunutá tak, aby kulminace odpovídala kulminaci výsledného hydrogramu dynamické simulace Beroun-Černošice. Poté již výsledný hydrogram ve spodní okrajové podmínce – LGS profilu Praha – Chuchle dobře odpovídá oficiálnímu hydrogramu v tomto profilu, avšak hladina v kotlině Berounky byla oproti záznamu průběhu hladin povodně 2013 stále výrazně nižší. Protože podobná situace nastala i v případě druhé řešené oblasti soutoku Vltavy s Labem, došel řešitelský tým po studiu dat a dokumentace z terénu k závěru, že hlavním důvodem je omezená průtočnost oblastí osázených silnými plodinami (především řepkou), kteréto oblasti se stávají po zaplavení relativně malými hloubkami a vlivem zanesení vstupních oblastí drobným plavím takřka neprůtočné. Po aplikaci zvýšených drsností v těchto oblastech se sice v profilu Radotín stále nepodařilo cca o 30 cm dostat na hladinu zaznamenanou při povodni 2013. Simulace v rámci studie [8], prováděné na konci roku 2013, skončily závěrem, že kulminační průtok z Berounky byl pravděpodobně o něco vyšší než oficiální hodnota.

V rámci současných studií bylo na modelu Soutok navázáno na výpočty v rámci studie [8] několika experimenty, při kterých bylo nejprve v několika krocích zvyšován průtok z Berounky v souladu s poznatkem, získaným simulacemi na modelu Štítkovské zdrže a simulacemi na modelu Klecany-Mělník, že kulminační průtok odtékající z Prahy byl pravděpodobně vyšší než oficiální. V tomto bodě byly předběžné pokusné dynamické simulace na výsekovém modelu Soutok ukončeny a byla provedena porovnávací ustálená simulace, používající jako horní okrajové podmínky kulminační průtoky v profilech Kazín a Vrané a jako spodní okrajovou podmínku kulminační hladinu v profilu Praha – Chuchle. Účelem této simulace bylo ověřit možnost provést kalibraci modelu na nově stanovené drsnosti inundačního území jako ustálený výpočet. Výsledkem bylo zjištění, rozdíly v kótách hladin při mezi dynamickou a ustálenou simulací jsou zanedbatelné a další pokusy byly tudíž prováděny jako ustálené.

Další simulace byly prováděny také již po aktualizaci modelu na nová data: nového DMT a nově vyhodnocených map drsností dle ortofotografií z let 2013 a 2014 (viz kap 5.2.1 a 5.2.3). Ortofotogrammetrický nálet pro nový DMT Prahy od společnosti Geodis (2011), poskytnutý IPR MHMP, vykázal právě v některých oblastech soutoku Vltavy a Berounky poměrně velké rozdíly v kótě terénu. Kontrolní pozemní GPS měření provedená zpracovatelem poté prokázaly v drtivé většině případů větší přesnost nového DMT. Nový DMT byl poté zpracován do batymetrije hydrodynamického 2D modelu a protože v novém modelu mají celé oblasti polí v oblasti Radotína a mezi Radotínem a Velkou Chuchlí výrazně vyšší kótou terénu, podařilo se pomocí série kalibračních běhů, kdy byla taktéž použita teorie minimálního dna a nová mapa drsnostních součinitelů, dosáhnout dobré shody.

Model byl poté znova sloučen s již separátně kalibrovaným modelem spodního úseku Praha-Město a finální kalibrační simulace byly prováděny na celé výpočetní síti modelu Praha.

Model Praha-Město: výsekový model Praha-Město (od ř.km 38.98 Roztoky po LGS Praha – Chuchle) byl použit pro simulace v rámci kalibrace na povodeň 2013 ustálenými průtoky z časových důvodů. Protože úsek vnitřního města je pro 2D modelování vždy problematický z důvodů velkého množství objektů (hlavně jezů a při extrémních

průtocích i mostů s větším odporem mostní konstrukce), u kterých je třeba najít vhodný způsob schematizace a ten potom podle potřeby jemně doladit, aby dolní a horní hladiny na objektech souhlasily se zaznamenanými hodnotami a při nižších průtocích s daty uvedenými v manipulačních řádech. Schematizace jezů ve 2D hydrodynamických modelech je všeobecně komplikovaná a nesnadná – konkrétně u použitého modelu MIKE 21C jsou dvě možnosti: vložením zjednodušeného hydraulického objektu nebo zadáním zvýšené kóty dna do souboru „Batymetrie“ a zpřesněním požadovaného spádu na jezu pruhem zvýšené hydraulické drsnosti. Při použití prvního způsobu jsou ve specifikované linii objektu nahrazeny Saint-Venantovy rovnice rovnici objektu, u které je třeba nastavit v setupu pro správnou funkci jezové koeficienty. Výhodou je, že by pak rovnice měla pracovat správně pro širší pásmo průtoků. Nevýhodou je, že při výpočtu rovnici přes linii objektu se ztrácí rychlosť proudu a rychlosť v buňkách pod jezem se počítá dle profilu a sklonu hladiny pod jezem. Ukázalo se, že při vyšších hodnotách koeficientu zatopení přepadu již přestává funkce objektu (jezu) pracovat korektně a přestává již být použitelná. Navíc některé specifické jezové konstrukce jsou pro tuto zjednodušenou funkci obtížně zpracovatelné a jsou problematické i v pásmu průtoků, kdy přepad není ještě zcela zatopený.

Po sérii kalibračních výpočtů pro všechny tři povodně byl nakonec vyvinut systém, kdy byl pomocí vložené funkce objektu schematizován pouze Helmovský jez, a to do průtoku cca 3200 m³/s, který odpovídá zhruba kulminačnímu průtoku povodně 6/2013, zbylé pražské jezy a od uvedeného průtoku výše i Helmovský jez byly potom schematizovány terénem zvýšeným na hodnotu kóty přelivné hrany. Při použití teoretické vlny pro přelití PPO v Praze, mající kulminační průtok okolo 6200 m³/s, pak muselo být použito několik typů simulací dle schematizace jezů a mostů, a ty pak byly použity pro posouzení v těch pásmech průtoků, pro které byly jednotlivé schematizace korektní.

Definitivní kalibrace na celém modelu Praha

Finální ověřovací kalibrace na všechny povodňové epizody ze srpna 2002, dubna 2006 a června 2013 proběhly již na kompletní výpočetní síti modelu Praha. Pro všechny epizody byly ověřovací kalibrace provedeny jako ustálený výpočet – pro povodně 8/2002 a 4/2006 byla korektnost takového postupu ověřena již v rámci minutních kalibrací, u povodně 6/2013 byla korektnost ověřena samostatným porovnáním na výsekovém modelu Soutok-viz výše.

Batymetrie: pro kalibrace 2006 a 2013 byly použitá totožná batymetrie, vytvořená z aktuálních podkladů (viz kap. 5.2.2) – pro oblast soutoku byl terén generován z nejnovějšího DMT 2011, v oblasti vnitřní Prahy byl ponechán původní model (používající většinou identická pozemní zaměření jednotlivých městských částí), vloženy byly pouze některé známé změny terénu. Pro kalibrační simulace na povodeň 2002 byl pro velkou odlišnost terénu použit původní terén, na kterém byla prováděna kalibrace v roce 2004. Pro všechny tři kalibrace pak bylo použito hypotézy „minimální úrovně dna“ při průchodu významné povodně, finální kalibrační simulace byly proto provedeny s batymetrií koryta reprezentující minimální úroveň dna v korytě Vltavy ze všech dostupných zaměření z let 2002 až 2014.

Hydraulická drsnost a místní zvýšené odpory proudění jsou pro model MIKE 21C zadávány pro každý bod výpočetní sítě. V rámci této studie byla vytvořena zcela nová základní „mapy drsností“ **inundačního území** (podrobný popis viz kap 5.2.3 a Tab. 1). Pro jednotlivé kalibrace byly součinitele hydraulických drsností vybraných typů porostu upraveny dle vegetačního období, ve kterém jednotlivé povodňové epizody proběhly (viz kap 5.1.2).

Hydraulické drsnosti **v korytě toku** by se dle zkušeností teoreticky měly zvyšovat s průtokem, neboť jsou proto reálné fyzikální důvody: V říčním korytě nastává při velkých povodních pohyb dnových splavenin, v určité vrstvě u dna se pohybuje dvoufázová směs vody a sedimentu, vytvářejí se proměnlivé dnové útvary (makrodrsnost); navíc významně roste vnitřní turbulence rychlého proudu v korytě – to všechno zvyšuje hydraulické odpory proudění, které lze víceméně vyjádřit jen zvýšením drsnosti. Protože ale hydraulické drsnosti jako vlastně jediný významný hydraulický parametr 2D modelu slouží k náhradě vlivu celé řady jevů, které bud' není možno modelem tohoto typu postihnout, nebo je prostě neznáme (kromě skutečného hydraulického odporu také např. k náhradě zvýšeného turbulentního odporu, zvýšeného odporu vlivem nesených splavenin, atd.) a rovněž i pravděpodobně změn dna, které neznáme (i když použití minimálního dna tento vliv do značné míry eliminuje), nemusí být tento trend vždy jednoznačný.

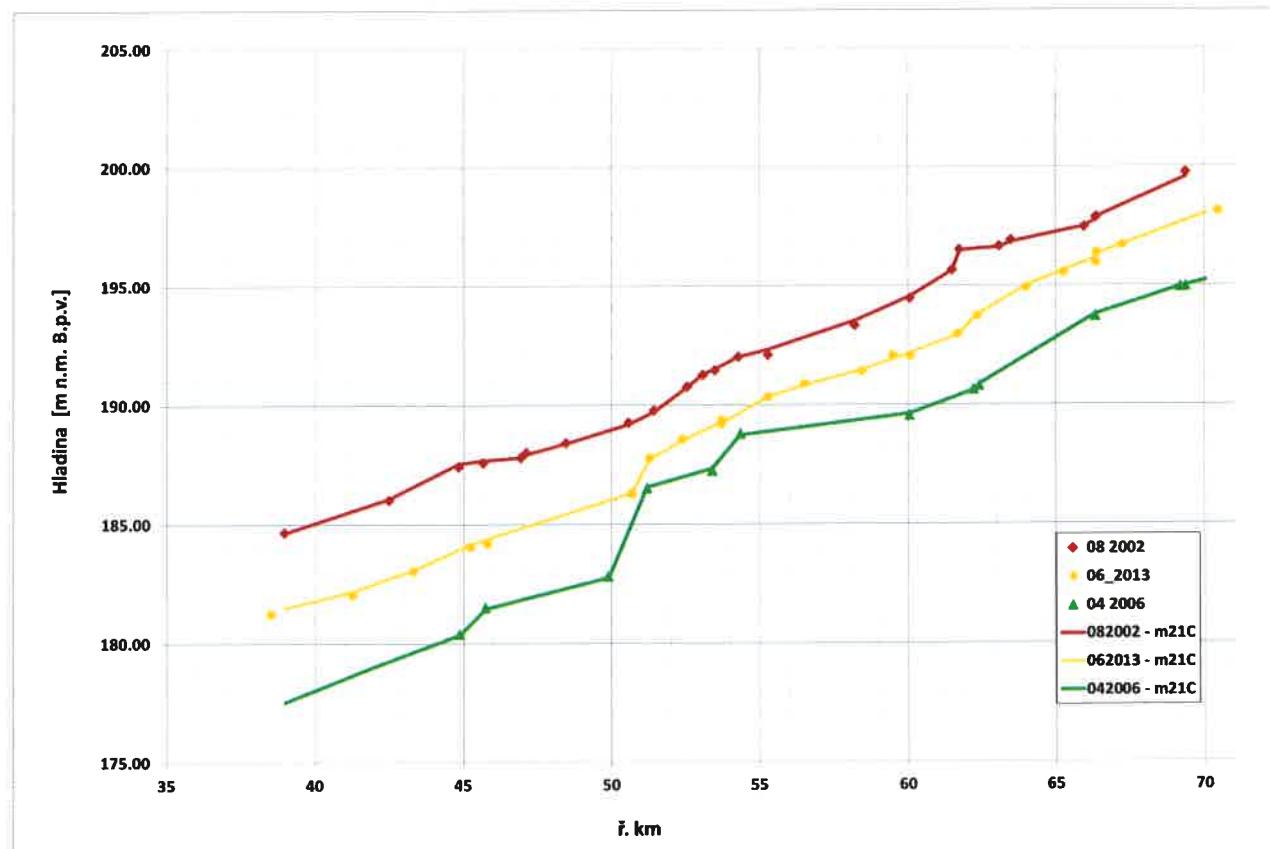
V případě kalibrací na povodně 4/2006, 6/2013 a 8/2002 se trend růstu hydraulických drsností projevil pouze mezi povodněmi 4/2006 a 6/2013 – v úseku Štvanice – VD Modřany je nárůst drsnosti cca 8%, v úseku VD Modřany – Zbraslav, (resp. Radotín na Berounce) pak cca 14%. V úseku Roztoky-Štvanice a v úsecích Vrané-Zbraslav a Černošice-Radotín naopak zůstávají hydraulické drsnosti pro všechny kalibrační epizody

stejné. Z kalibrací povodní 6/2013 a 8/2002 tedy vyplynuly stejné hydraulické drsnosti koryta, pro povodeň 8/2002 byly pouze přidány pruhy zvýšené drsnosti v profilech vybraných mostů, které svou konstrukcí a nižší výškou mostovky působí při hladině povodně 8/2002 zvýšený odpor.

Kalibrační průtoky: kalibrace všech tří epizod byly, jak již bylo vysvětleno dříve, provedeny metodou ustáleného průtoku.

- Pro kalibraci 8/2002 byl použit kalibrační průtok 5160 m³/s v profilu LGS Praha – Chuchle (3000 m³/s Vltava, 2160 m³/s Berounka), tedy oficiální průtok uváděný ČHMÚ.
- Pro kalibraci 6/2013 byly použity mírně korigované kulminační průtoky z Vltavy (2135 m³/s) a Berounky (1080 m³/s), které vyplynuly z dynamické analýzy výsekového modelu Soutok. Kulminační průtok v profilu LGS Praha – Chuchle je tedy 3215 m³/s, tedy nepatrně vyšší průtok, než vychází z dynamické simulace (3183 m³/s). Úspora času při kalibraci na ustálený průtok však tuto drobnou nepřesnost ospravedlňuje, v dynamické variantě výpočtu navíc přítoky z Botiče a Rokytky tento rozdíl na odtoku z Prahy vyrovnají.
- Pro kalibraci 4/2006 byl použit také mírně modifikovaný průtok: v průběhu povodně 4/2006 došlo ke korekci měrné křivky LGS Praha – Chuchle, kterou se měl odstranit nesoulad mezi průtoky, které vycházejí z měrných křivek LGS Praha – Chuchle a LGS Vraňany. Výsledky prvních kalibračních pokusů naznačovaly, že zvýšení průtoku na původní úroveň by odpovídalo lépe, proto byl použit korigovaný průtok 1480 m³/s ve stanici Praha – Chuchle (Vltava 1230 m³/s, Berounka 2050 m³/s) oproti oficiálnímu průtoku 1430 m³/s (1205 m³/s Vltava, 225 m³/s Berounka). Po dokončení kalibrace byla ještě provedena citlivostní analýza na původní průtok 1430 m³/s, po které bylo konstatováno, že rozdíly nejsou vzhledem k nepřesnosti metod vyhodnocení povodňových průtoků významné: zatímco pro vyšší průtok vycházejí hladiny v úseku Praha spíše v horní kalibrační toleranci, pro nižší průtok vycházejí v toleranci nižší.

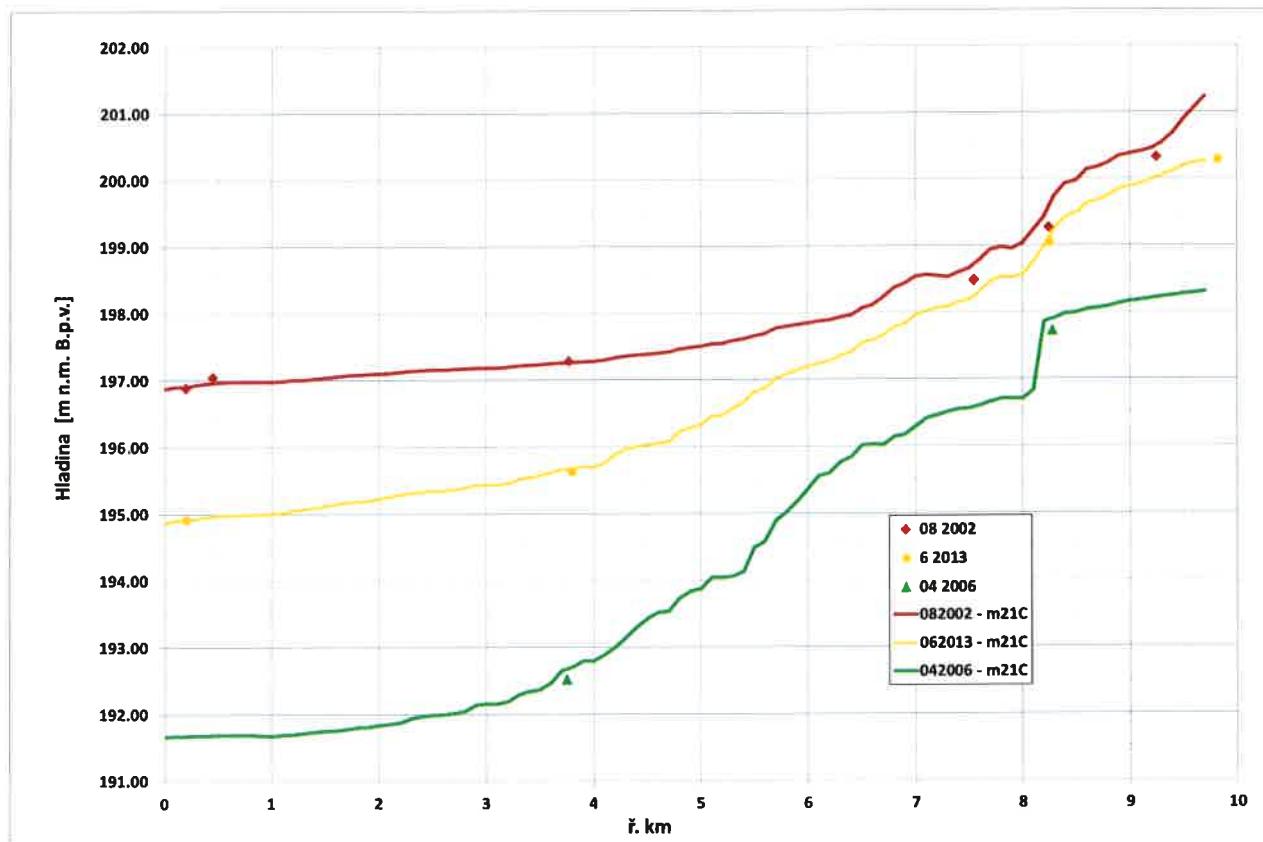
Výsledek kalibrace modelu (průběh hladin podél zaměřených značek) pro všechny 3 kalibrační epizody je vykreslen v grafech podélných profilů Vltavy (obr. 5.1) a Berounky (obr. 5.2). Z grafů je patrná dobrá shoda vypočtených úrovní hladin s vyhodnocenou niveletou značek kulminační hladiny – většina rozdílů mezi vypočtenými a pozorovanými hodnotami se pohybuje v rozmezí ±10 cm, jen v několika ojedinělých případech se vyskytuje odchylka až 20 cm. Pouze hladiny povodní 4/2006 a 8/2002 v úseku Berounky zůstaly při kalibraci zvláště v horním úseku Radotín – Černošice konstantně nepatrně nad hodnotami zaměřenými při obou povodních. Dalším snižováním hydraulických drsností ploch osetých zemědělskými plodinami by se tento rozdíl ještě dal eliminovat, protože však v této fázi prací bylo již rozhodnuto, že pro další výpočty se použijí hodnoty hydraulických drsností, odpovídajících nejneprživějšímu vegetačnímu období, po dosažení horní kalibrační tolerance cca +15 cm byly kalibrace ukončeny s tím, že hydraulické drsnosti v korytě toku byly již ověřeny a účelu kalibrace bylo tím dosaženo.



Obr. 5.1 – Kalibrace modelu Praha – průběh hladin Vltavy podél zaměřených značek

Dynamická rekonstrukce povodně v rámci celého modelu Praha

Jako poslední kalibrační výpočet byla provedena dynamická rekonstrukce povodně 6/2013 na modelu Praha. Z hlediska kalibrace se, vzhledem k tomu že proběhly již kromě ustálených i dynamické kalibrace na modelu Soutok a ustálená kalibrace na modelu Praha-Město, jednalo pouze o finální ověření výsledků předchozích kalibrací. Výstupní hydrogram v profilu Roztoky sloužil jako horní okrajová podmínka pro dynamické rekonstrukce povodně 6/2013 na modelu Klecany-Mělník a jako porovnávací hydrogram pro výsledky simulací v rámci Etapy D - analýzy změn průchodu povodně vyvolaných výstavbou protipovodňových opatření. Výsledky dynamického ověření ukazuje graf v *Příloze 1 technické zprávy*. Při použití okrajových podmínek, odvozených během výpočtu na výsekovém modelu Praha-Město (z grafu je patrné, že okrajové podmínky mají o něco vyšší kulminační průtok, než jsou oficiální hodnoty uváděné ČHMÚ), je výsledný kulminační průtok v profilu Praha – Chuchle 3183 m³/s, kulminační průtok v profilu Roztoky pak 3211 m³/s. Z tohoto výsledku je vidět, že transformační efekt úseku Chuchle - Roztoky je zanedbatelný, vyšší kulminační průtok v profilu Roztoky je pak způsoben přítoky z Botiče a Rokytky. Z průběhů hladin v grafu pro profily Chuchle, Zbraslav a Radotín je patrná dobrá shoda na vzestupné větvě povodně, u počítané části sestupné větve je pak patrná nadále výborná shoda v profilu Radotín, u profilů Chuchle a Zbraslav je patrný mírně vyšší průběh hladin, který naznačuje, že na sestupné věti hydrogramu Vrané byl pokles průtoku nepatrně rychlejší než vyhodnocený. Protože pro účely této studie není dokonalé vystižení průběhu sestupné větve povodně pomocí dlouhých a časově náročných dynamických výpočtů zapotřebí, byla v této fázi rekonstrukce povodně 6/2013 na modelu Praha ukončena.



Obr. 5.2 – Kalibrace modelu Praha v úseku Berounka - průběh hladin podél zaměřených značek

5.2.5 Úpravy modelu pro jednotlivé etapy studie

Zkalibrovaný model byl v rámci aktuálně zpracovávané studie (pro potřeby jednotlivých etap) upravován – především bylo vytvořeno několik verzí modelu s různou niveletou dna koryta Vltavy:

- **model s tzv. „minimální úrovni dna“** (podrobnější vysvětlení viz kap. 5.1). Tento model byl použit pro kalibraci na všechny tři povodňové epizody, dále při posuzování účinnosti dosavadních opatření (etapa A), při posouzení návrhů změn vyplývajících z nového VH řešení Vltavské kaskády a manipulací za povodní na ochranu území pod Vltavskou kaskádou (etapa B) a při analýze změn hladin, rozsahu rozливů a objemu vyvolaných výstavbou PPO (etapa D)
- **model s tzv. „návrhovým dnem“** (vychází ze zaměření dna Vltavy 2014 a po povodni z června 2013 + s již realizovanými prohrábkami plavební dráhy a podjezí ve všech zdržích) Tento model byl použit při posouzení možnosti zvýšení neškodného průtoku pod Vltavskou kaskádou (etapa C)

Co se týče **hydraulických odporů inundačního území**, byly simulace pro všechny etapy studie (s výjimkou kalibrace modelu na skutečné povodňové epizody) – prováděny pro **nejnepříznivější stav inundačního území z hlediska hydraulických odporů** (bujné vegetace na vrcholu vegetačního období), tj. prakticky vycházejí ze závěrů kalibrace modelu na povodňovou epizodu z června 2013.

5.3 Model „Klecany – Mělník“

Pro předmět díla specifikovaný ve smlouvě o dílo na dolní Vltavě v úseku pod Prahou až po ústí Vltavy do Labe byl použit model 2D matematický model úseku Vltavy od profilu Klecany (Roztoky-Brnky, ř.km 38,98) po ústí Vltavy do Labe; na Labi je schematizován úsek od mostu silnice I./9 (Na Štěpánu, ř.km 845,296) po most silnice I./16 v Mělníku (ř.km 835,745). Tento model byl sestaven a zkalibrován v rámci projektu „Zpracování map povodňového nebezpečí a povodňových rizik; Vltava v úseku ř.km 0,0 až 69,8“ [3].

5.3.1 Topologická data

Při přípravě výše uvedeného původního modelu vznikl nový digitální model terénu (DMT) zájmového území sloučením šesti základních zdrojů topologických dat – zaměření koryta Vltavy, zaměření koryta Labe, DMR 5G a nový DMT území hl. města Prahy dodaný ÚRM MHMP, který pokrývá i část úseku Klecany - Mělník až pod meandr Řež a přičné profily starého koryta Vltavy od Vraňan po soutok. Dále byly použity dodané výkresy a zaměření objektů na toku z TPE (technicko provozní evidence) správce toku, projekty nedávno provedených úprav koryta a projekty nebo dokumentace skutečného provedení protipovodňových opatření obcí na toku.

K sestavení modelu terénu byly použity následující podklady:

- DMT inundačních území – DMR 5G (ČZÚK, a.s., 2011-2012)
- DMT území hl. města Prahy (ÚRM MHMP, Povodí Vltavy, státní podnik, DHI, a.s. 2009-2011, aktualizovaný o data GEODIS, spol. s.r.o., 2011)
- zaměření koryta Vltavy vyměřovací lodí Valentýna (Povodí Vltavy, státní podnik, r. 2012.) – v úseku Vraňany – Klecany
- zaměření koryta Labe vyměřovací lodí Střekov (Povodí Labe, státní podnik, r. 2012) – v úseku Mělník – Obříství
- přičné profily koryta staré Vltavy (87 profilů, GEODIS Brno, spol. s.r.o, 2013)
- projekty úprav koryta Vltavy pro lokality: Chvatěruby, Miřejovice, Ouholice
- manipulační řády a výkresy objektů všech zdymadel na Vltavě: VD Vraňany – Hořín, VD Miřejovice, VD Dolany – Dolánky, VD Klecany – Roztoky (Povodí Vltavy, státní podnik, 2006 - 2010)
- ZABAGED - rastrové mapy v digitální podobě (Povodí Vltavy, státní podnik, 2012)
- ORTOFOTO v digitální podobě (ÚRM MHMP, Povodí Vltavy, státní podnik, 2012)
- fotodokumentace a odborné poznatky z terénního šetření (DHI, a.s., 2012 a 2013)
- PPO – projektové dokumentace pro lokalitu Veltrusy (Protipovodňová ochrana města Veltrusy, Vodní cesty a.s., 2012), Zálezlice (Protipovodňová ochrana obce Zálezlice HYDROPROJEKT CZ, 2012), Hořín (Protipovodňová ochrana obce Hořín, OHL ŽS, a.s. 2010) plavební kanál (Protipovodňový uzávěr plavebního kanálu Vraňany – Hořín, Pöyry Environment a.s., 2006).
- zaměření skutečného provedení hrází pro stavby: Protipovodňová hráz Roztoky u Prahy; Ochranná hráz Veltrusy – pravý břeh; Ochranná hráz Všestudy – Dušníky; Protipovodňová hráz k.ú. Křivousy, Bukol, Zálezlice; Protipovodňová hráz k.ú. Zálezlice, Úpor; Ochranná hráz Lužec nad Vltavou; Ochranná hráz Zelčín; Ochranná hráz Vrbno; Protipovodňová hráz Hořín (Hausmanova hráz); Protipovodňová hráz k.ú. Hořín.

Pro potřeby současně zpracovávané studie dodal zadavatel následující podklady:

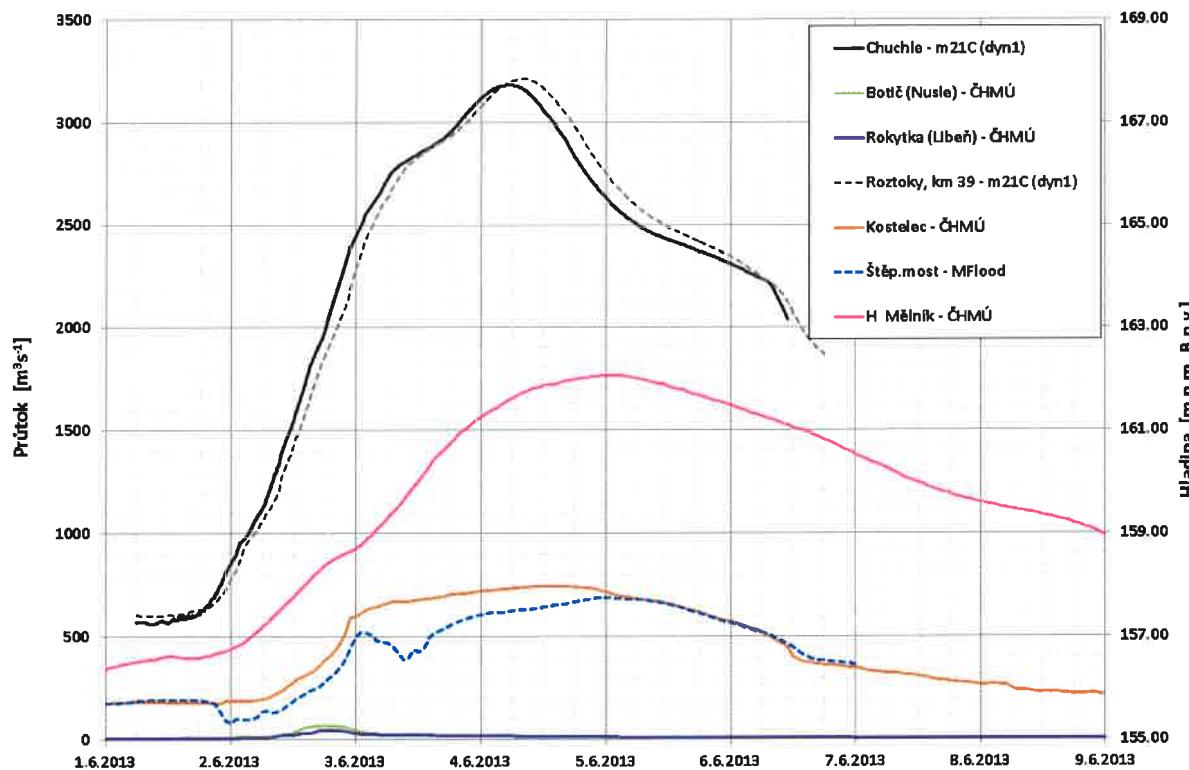
- zaměření dna Vltavy (včetně koryta tzv. Staré Vltavy od Vraňan po ústí Vltavy do Labe) z období 2002 až 2014
- dokumentaci pro provedení prohrábek v plavební dráze ve všech zdržích na Vltavě pod Prahou a dokumentaci pro provedení prohrábek (odstranění nánosů) pod jezy
- dokumentaci pro odstranění nánosů v korytě Staré Vltavy v úseku Vraňany – Mělník „PŠ Vltava, ř.km 0,0 - 11,3 Vraňany - soutok Mělník, nánosy a oprava opevnění“. HG Partner, spol. s r.o., červenec 2014
- geodetické zaměření tvaru Vraňansko-hořinského plavebního kanálu včetně přilehlých hrází. Geodetická kancelář Zlatnická, prosinec 2013
- projektovou dokumentaci pro rekonstrukci „Laterálního kanálu Vraňany – Hořín“. Valbek, spol. s r.o., duben 2015

5.3.2 Schematizace území, aplikace modelu

Z dostupných podkladů (viz kap. 5.3.1) byl nejprve sestaven digitální model terénu v modelu ATLAS DMT. Dále byla vygenerována křivočárová (vnitřně ortogonální) síť o rozměru 3639 x 852 bodů, která vymezila oblast modelu. Promítnutím této sítě na DMT jsme získali geometrický (batymetrický) model terénu ve **výpočetní síti modelu MIKE 21C o rozměru 3638 x 851 bodů**. Hustota sítě (vzdálenost mezi výpočetními body) je proměnlivá - ve městech a v úsecích, kde se nacházejí objekty na toku (mosty, plavební stupně) je výpočetní síť hustší, ve volných říčních tratích a v širokém záplavovém území je výpočetní síť řidší. Míra schematizace zájmového území je dostatečná pro podrobný popis podstatných prostorových jevů proudění v oblasti. Pilíře mostů a rovněž jezové pilíře a přelivné hrany jezů jsou v geometrickém modelu reprezentovány zvýšeným terénem v místě jejich polohy. Domy a bloky domů byly modelovány pomocí podstatně vyvýšeného terénu (nepřelitelné překážky); ploty a jiné překážky podobného charakteru byly simulovány pruhy zvýšené drsnosti.

Okrajové podmínky pro výpočty metodou neustáleného proudění byly zadávány jako **časové řady průtoků** – na horních okrajových podmírkách, definovaných jako přítok z Vltavy, resp. Labe a jako **časové řady úrovní hladin** – na dolní okrajové podmínce v profilu silničního mostu I./16 v Mělníku (příklad pro simulaci povodňové vlny z června 2013 uveden v obr. 5.3):

- Vltava: Klecany (Roztoky-Brnky) ř.km 38,98 – hydrogram průtoku vypočten 2D matematickým modelem „Praha“ s uvážením přítoků z Botiče a Rokytky
- Labe: Štěpánský most (ř.km 845,296) – hydrogram průtoku vypočtený modelem MIKE 21C z hydrogramu ČHMÚ ve stanici Brandýs nad Labem (8/2002) v rámci studie [6], resp. modelem MIKE Flood z hydrogramu ČHMÚ ve stanici Kostelec nad Labem (6/2013) v rámci studie [8]
- Hladina Labe - silniční most I./16 v Mělníku (ř.km 835,745) – časová řada odvozena ze záznamu průběhu hladin ve stanici ČHMÚ Mělník (Labe)



Obr. 5.3 – Definice okrajových podmínek modelu pro výpočty metodou neustáleného proudění – povodeň z června 2013

Okrajové podmínky pro výpočty metodou ustáleného proudění (resp. pro výpočty povodňových vln se zjednodušenými okrajovými podmínkami na přítocích – průchod teoretické povodňové vlny, vliv nového VH řešení Vltavské kaskády na ochranu území, apod.) byly zadávány stejnými veličinami a ve stejných profilech, ale jako neměnné v čase.

V průběhu výpočtu byly simulovány (úpravami řídícího souboru „Batymetrie“) i neočekávané jevy, ke kterým během povodně došlo – např. protržení PB hráze u Veltrus, protržení hráze Hořínského plavebního kanálu a následné umělé prokopání hráze kanálu v blízkosti plavební komory Hořín v případě povodně z června 2013.

5.3.3 Kalibrace modelu, hydraulické drsnosti

Model, původně sestavený a zkalirovaný v rámci studie „Zpracování map povodňového nebezpečí a povodňových rizik; Vltava v úseku ř.km 0,0 až 69,8“ [3], byl pro potřeby aktuálně zpracovávané studie nově zkalirovaný na povodňové epizody ze srpna 2002, dubna 2006 a června 2013. V případě povodně z dubna 2006 byl výpočet proveden metodou ustáleného proudění na kulminační průtok ve Vltavě $Q_{max} = 1430 \text{ m}^3/\text{s}$ (prakticky konstantní neškodný odtok v Praze a pod Prahou). V případě povodní ze srpna 2002 a června 2013 se jednalo o co nejvěrnější rekonstrukce skutečných povodňových vln metodou neustáleného proudění, přičemž hydrogram průtoku povodně z června 2013 ve stanici Praha – Chuchle byl modifikován dle poznatků získaných simulacemi na modelu „Praha“ – viz kap. 5.2, použité okrajové podmínky – viz obr. 5.3.

Při této (dosud poslední) kalibraci modelu jsme při opakování kalibračních výpočtech dospěli k hypotéze „minimální úrovni dna“ při průchodu významné povodňové vlny – viz výše v kap. 5.1. Finální kalibrační výpočty byly proto provedeny s batymetrií reprezentující minimální úroveň dna v korytě Vltavy ze všech dostupných zaměření z let 2002 až 2014. Schematizace inundačního území má u všech kalibračních epizod shodný základ – DMR 5G (2011); tento reliéf terénu byl však s ohledem na období povodňové epizody upravován – např. stav hrází odpovídající té době, úpravy břehů, ostrovů, apod.

Hydraulická drsnost a místní zvýšené odpory proudění jsou pro model MIKE 21C zadávány pro každý bod výpočetní sítě. Základní „mapa drsnosti“ byla vytvořena zpracováním podrobných ortofotomap modelové oblasti; hodnoty Manningova součinitele drsnosti ukazuje tab. 5.2.

Tab. 5.2 – Manningovy součinitely drsnosti pro model „Klecany – Mělník“

| Popis povrchu | M | n |
|--|--------------|----------------|
| Hladké plochy, ulice, volná prostranství | 33,3 | 0,030 |
| Nízká tráva | 23,8 | 0,042 |
| Vysší tráva | 17,4 | 0,058 |
| Řidší lesní porost | 15,6 | 0,064 |
| Hustý lesní porost | 10,3 | 0,097 |
| Technické stavby | 14,3 až 10,0 | 0,070 až 0,100 |
| Ploty | 8,1 až 4,8 | 0,123 až 0,211 |
| Keřovitý porost | 8,4 | 0,120 |
| Řeka | 9,5 | 0,105 |
| Řeka - kamení | 20,0 | 0,050 |
| Domy, zahrádky | 5,4 | 0,187 |
| Labe: | | |
| Minimální drsnost | 42,0 | 0,024 |
| Maximální drsnost | 37,7 | 0,027 |
| Vltava: | | |
| Minimální drsnost | 38,5 | 0,026 |
| Maximální drsnost | 28,5 | 0,035 |

Kalibrace modelu byla provedena pomocí série kalibračních výpočtů, při kterých byly upravovány hodnoty součinitelů drsnosti v jednotlivých úsecích koryta a oblastech inundačního území (dle způsobu využití území, převažující vegetace a vegetačního období té které povodně) a další kalibrační parametry (turbulentní viskozita) tak, aby při kulminačních průtocích bylo dosaženo uspokojivé shody mezi vypočtenými průběhy hladin a zaměřenými značkami pozorované kulminační hladiny.

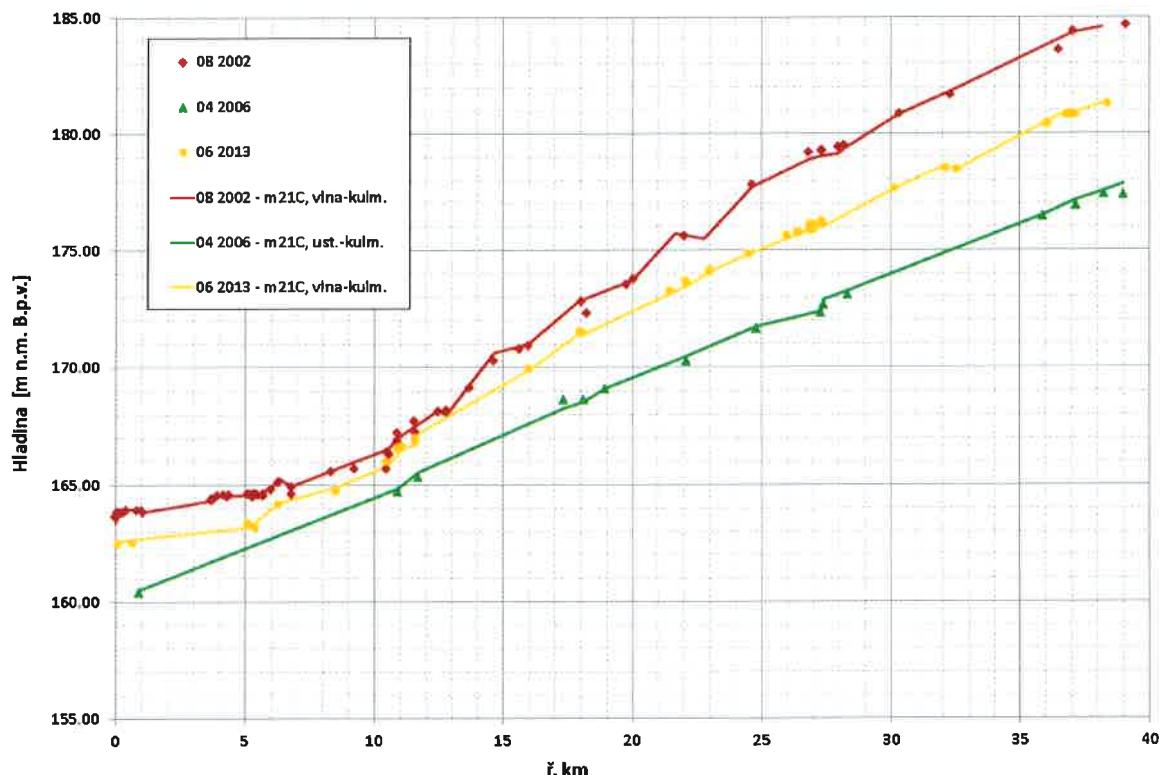
U všech tří povodňových epizod se pro stejné využití území a pro stejný typ plodin vycházelo z totožných Manningových součinitelů drsnosti – vzhledem k rozdílným vegetačním obdobím všech tří kalibračních povodní však byly tyto hodnoty postupně upravovány. Vycházel jsme především ze zkušeností, získaných při řešení studie [8], která prokázala, jak relativně velký hydraulický odpor může klást svěží vegetace s pevnými lodyhami na začátku léta (prakticky neprůtočná pole řepky a podobných plodin při povodni v červnu 2013). Vegetace v polovině srpna 2002 (na polích již často sklizená) kladla hydraulický odpor o poznání nižší a povodeň z dubna 2006 (začátek jara) je charakteristická relativně nízkými hydraulickými odpory inundačního území i břehové vegetace.

Přestože finální kalibrační výpočty pro všechny 3 povodňové epizody byly provedeny s totožnou batymetrií dna Vltavy (tzv. hypotéza „minimální úrovni říčního dna“ při středních a velkých povodních – viz výše), nejsou definice hydraulických drsností dna Vltavy pro všechny tři kalibrační epizody shodné. Zkušenosti z mnoha předchozích projektů (simulaci velkých historických povodní – z července 1997 na Moravě, resp. ze srpna 2002, dubna 2006 a června 2013 v české kotlině) prokázaly, že pro takové povodně je třeba zvýšit součinitele drsností, a to jak v korytě, tak v inundačním území. Jsou pro to následující fyzikální důvody:

- v říčním korytě nastává při velkých povodních pohyb dnových splavenin, v určité vrstvě u dna se pohybuje dvoufázová směs vody a sedimentu, vytvářejí se proměnlivé dnové útvary (makrodrsnost); navíc významně roste vnitřní turbulence rychlého proudu v korytě ... to všechno zvyšuje hydraulické odpory proudění, které lze víceméně vyjádřit jen zvýšením drsnosti
- v inundačním území se za velkých povodní pohybuje spousta spláví – seno, větve, celé kmeny, chaty, které se zachycuje na vegetaci (čím hustší vegetace, tím lépe se zachycuje) ... a kde zvýšené hydraulické odpory proudění. Opět je vyjadřujeme zvýšením drsnosti.

Jestliže přisoudíme definičnímu popisu drsností v korytě Vltavy, který je výsledkem kalibrace na epizodu s nejnižším průtokem (z dubna 2006), 100 %, pak pro epizodu z června 2013 vychází zvýšení drsností koryta cca o 4 až 7 % a pro povodeň ze srpna 2002 zvýšení drsností koryta až o 8 až 11 % (v porovnání s povodní 4/2006). V případě epizody ze srpna 2002 byly navíc dodatečně zvýšeny hydraulické drsnosti v inundačním území o 5 % - z důvodu nadměrného množství spláví, které tato povodeň nesla.

Při vyhodnocení kalibračních výpočtů byly použity všechny povodňové značky, shromážděné a doměřené ve spolupráci DHI a.s. a Povodí Vltavy, státní podnik. Výsledek kalibrace modelu (průběh hladin podél zaměřených značek) pro všechny 3 kalibrační epizody je vykreslen na obr. 5.4. Z grafu je patrná dobrá shoda vypočtených úrovní hladin s vyhodnocenou niveletou značek kulminační hladiny – většina rozdílů mezi vypočtenými a pozorovanými hodnotami se pohybuje v rozmezí ± 10 cm, jen v několika ojedinělých případech se vyskytuje odchylka až 20 cm – např. ve zdrži Klecany pro povodeň z dubna 2006 nebo v okolí jezu Dolany při povodni ze srpna 2002. Přesto můžeme konstatovat dobrou shodu ve vypočtených hladinách, a to zejména s uvázením skutečnosti, že byl model úspěšně zkalibrován pro relativně velký rozsah povodňových průtoků – cca 1400 – 5000 m³/s – při použití jednotných součinitelů drsností pro stejné využití území, byť s procentuálními korekcemi – viz výše.



Obr. 5.4 – Kalibrace modelu v úseku Klecany – Mělník – průběh hladin podél zaměřených značek

V naší studii je zároveň podstatné, zda a jak se výsledky modelu shodují s realitou také v hydrologických parametrech, jako jsou postupivost a transformace povodňové vlny – měl by být tedy zkalibrován nejen na průběh hladin, ale současně také na postupivost vlny a velikost kulminačního průtoku – což je obecně velmi obtížné, často nesplnitelné.

V tomto zájmovém úseku jsou důležitými limnigrafickými stanicemi Vraňany (Vltava; ČHMÚ) a Mělník (Labe, ČHMÚ). Vypočtené časové řady průtoků a vodních stavů (úrovní hladin) a jejich porovnání s měřenými/vyhodnocenými hodnotami jsou vykresleny na samostatných grafických přílohách 2 a 3 etapy A.

V profilu LGS Vraňany bylo při kalibraci na povodeň 6/2013 dosaženo dobré shody v postupivosti povodňové vlny (naprostá shoda v čase kulminace), model však vypočetl vyšší kulminační průtok $3192 \text{ m}^3/\text{s}$ než vyhodnotil ČHMÚ ($Q_{\max} = 3049 \text{ m}^3/\text{s}$) – způsobeno vyšším odtokem z Prahy, což je jeden z výsledků tohoto projektu (viz kap. 5.2). Časový průběh hladiny ve stanici odpovídá během vzestupné větve povodňové vlny velmi dobře, na sestupné věti jsou vypočtené hladiny vyšší než pozorované. V případě povodně 8/2002 nelze hydrogramy porovnat – během povodně došlo k poškození limnigrafické stanice ČHMÚ – záznam časového průběhu není k dispozici. Vypočtený kulminační průtok $Q_{\max} = 5136 \text{ m}^3/\text{s}$ je jen o $56 \text{ m}^3/\text{s}$ vyšší než hodnota kulminačního průtoku vyhodnocená ČHMÚ.

Ve stanici Mělník se časový průběh vypočteného hydrogramu velmi dobře shoduje s hydrogramem vyhodnoceným ČHMÚ – je v kulminační fázi povodně jsou vypočtené průtoky poněkud nižší. Matematický model vypočetl kulminaci průtoku cca o 5 hodin dříve, než byla vyhodnocena – to ovšem může být reálný výsledek, neboť kulminace průtoku by měla předcházet kulminaci hladiny. Hydrogram průtoku ČHMÚ je odvozen přímo z časového průběhu vodních stavů – neuvažuje tedy žádnou hysterese konzumční křivky. Vypočtený kulminační průtok $Q_{\max} = 3701 \text{ m}^3/\text{s}$ je jen o $42 \text{ m}^3/\text{s}$ nižší než průtok vyhodnocený ČHMÚ. Vypočtený průběh hydrogramu povodně 8/2002 časově předbíhá hydrogram ČHMÚ; vypočtený hydrogram vykazuje dva vrcholy (s odstupem cca 8 hodin), přičemž druhý vrchol předbíhá vyhodnocený čas kulminace cca o 6 hodin. Vypočtený kulminační průtok v obou vrcholech dosahuje hodnoty těsně pod $4900 \text{ m}^3/\text{s}$, zatímco ČHMÚ uvádí $Q_{\max} = 5300 \text{ m}^3/\text{s}$. Kromě velkého rozdílu v hodnotě kulminačního průtoku si můžeme povšimnout, že vypočtený hydrogram znázorňuje celkově menší objem vody v povodňové vlně než hydrogram vyhodnocený. Oba rozdíly mohou být ovlivněny skutečností, že v úseku Praha – Mělník není uvažován žádný přítok z mezipovodí a též nepřesnou transformací vyhodnoceného hydrogramu ze stanice Brandýs nad Labem do profilu Stěpánský most (Labe). Přesto však výsledek kalibračního výpočtu pro povodňovou epizodu ze srpna 2002 svádí k domněnce, že je hydrogram průtoku ve stanici Mělník celkově nadhodnocen.

5.3.4 Úpravy modelu pro jednotlivé etapy studie

Zkalibrovaný model byl v rámci aktuálně zpracovávané studie (pro potřeby jednotlivých etap) upravován – především bylo vytvořeno několik verzí modelu s různou niveletou dna koryta Vltavy:

- **model s tzv. „minimální úrovni dna“** (podrobnější vysvětlení viz kap. 5.1).
Tento model byl použit pro kalibraci na všechny tři povodňové epizody, dále při posuzování účinnosti dosavadních opatření (etapa A), při posouzení návrhů změn vyplývajících z nového VH řešení Vltavské kaskády a manipulací za povodní na ochranu území pod Vltavskou kaskádou (etapa B) a při analýze změn hladin, rozsahu rozливů a objemů vyvolaných výstavbou PPO (etapa D)
- **model s tzv. „návrhovým dnem“** (vychází ze zaměření dna Vltavy po povodni z června 2013 + s již realizovanými prohrábkami plavební dráhy a podjezí ve všech zdržích a rovněž prohrábkami koryta Staré Vltavy od Vraňan po Mělník)
Tento model byl použit při posouzení možnosti zvýšení neškodného průtoku pod Vltavskou kaskádou (etapa C)
- **model s tzv. „návrhovým dnem“** (viz výše), avšak **s nánosy po povodni 6/2013 ve Staré Vltavě od Vraňan po Mělník**, tj. bez prohrábek a dalších navrhovaných úprav v této části koryta
Tento model byl použit rovněž v etapě C – pro ověření, nakolik nánosy a neupravené koryto Staré Vltavy po povodni 6/2013 ovlivňují charakteristiky proudění v tomto úseku řeky.

Co se týče **hydraulických odporů** inundačního území, byly simulace pro **všechny etapy studie** (s výjimkou kalibrace modelu na skutečné povodňové epizody) – prováděny pro **nejnepříznivější stav inundačního území z hlediska hydraulických odporů** (bujné vegetace na vrcholu vegetačního období), tj. prakticky vycházejí ze závěrů kalibrace modelu na povodňovou epizodu z června 2013.

6 Etapa A - Posouzení účinnosti dosavadních opatření pro různé návrhové N-leté průtoky

Úloha posouzení účinnosti dosavadních opatření ke zmírnění následků povodní (protipovodňových opatření, regulačních hrází, atd.) byla řešena několika způsoby, které vyplýnuly jednak z charakteru posuzovaných úseků, jednak z faktu, že charakter jednotlivých opatření je velmi různorodý: zatímco v úseku Praha je většina opatření plně protipovodňová, nová a navíc v drtivé většině s tzv. absolutním stupněm ochrany na nejvyšší zaznamenanou povodeň 8/2002, v úseku Klecany-Mělník je většina hrází historická a jejich účel není nutně plně protipovodňový, některé slouží jako koncentrační hráze (ochrana proti dynamickým účinkům povodně jako je třeba smyv půdy z polí při větších rychlostech proudění). Zatímco v úseku Praha byl účel této etapy hlavně ve skutečném ověření stupně ochrany jednotlivých etap protipovodňové ochrany, v úseku Klecany – Mělník šlo v první řadě o ověření, zda a do jaké míry jsou jednotlivé hráze schopny plnit protipovodňovou funkci, zjistit mechanismus zaplavování prostoru za hrázemi a ověření jejich funkce a účinnosti za současného stavu. Základní metodikou pro oba úseky bylo přelití opatření pomocí teoretické vlny, přičemž v úseku Klecany-Mělník k tomuto stačila vlna zkonztruovaná z vzestupných větví povodní 2002 a 2013, v úseku Praha pak bylo nutno použít tuto vlnu prodlouženou na vzestupné věti až na průtok přes $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Protože model ukládá výsledky v určitých časových intervalech a navíc pracuje pro zajištění numerické stability s tzv. zatápěcí hloubkou (elementy se zatápějí s mírným zpožděním po dosažení hloubky, nastavitelné podle typu a stability modelu v rámci několika cm), pro přesné stanovení okamžiku přelití koruny hrází či PPO byly vytvořeny Q-H křivky jako vztah úrovně hladiny před hrází a celkového průtoku v daném profilu, ukazující graficky průnikem s kótou hráze přesný průtok v okamžiku přelití. V soutokových oblastech byla tato metoda doplněna metodou ověření vlivu průtoku z druhé řeky pomocí vypočtených ustálených stavů pro různé kombinace průtoků z obou řek.

6.1 Ověření stupně ochrany protipovodňových opatření v rámci modelu Praha

Z důvodů odlišné metodiky řešení je model pro stanovení okamžiku překonání jednotlivých opatření rozdělen na dvě části: na část Praha Město, obsahující úsek od profilu LGS Praha – Chuchle po spodní okrajovou podmínu nad Klecany a Roztoky, a na soutok Vltavy s Berounkou, sahající od obou horních okrajových podmínek modelu, (na Vltavě pod obcí Vrané, na Berounce od obce Černošice) po profil spodní okrajové podmínky v ř.km 58,2 pod Barrandovským mostem.

V části **Praha-Město** byl stupeň ochrany PPO (v drtivé většině projektovaný na Q_{2002}) zkoumán pomocí teoretické povodňové umělé vlny, vytvořené kombinací vzestupných větví hydrogramů povodní 2013 a 2002 ve stanici Praha – Chuchle, prodloužené na vzestupné věti až na kulminační průtok $6160 \text{ m}^3/\text{s}$. Jedinou výjimkou bylo zkoumání stupně ochrany protipovodňové hráze okolo ZOO Praha. Toto opatření s nejnižším návrhovým průtokem a jediné opatření přelité při povodni 2013 bylo zkoumáno pomocí dynamické rekonstrukce povodně 2013, ovšem za použití současného terénu 2014.

Teoretická povodňová vlna pro analýzu zbytku protipovodňových opatření pak byla použita pro dva typy dynamických simulací, s odlišnou schematizací jezů a odporu mostních konstrukcí: první simulace pokrývá pásmo nižších průtoků, druhá průtoky okolo Q_{2002} a výše. První simulace byla použita pro posouzení stupně ochrany mobilní „předsunuté“ stěny na nábřeží Kampy, druhá pak pro všechna PPO s návrhovým průtokem Q_{2002} . Místa přelití vlnou 2013 a teoretickou vlnou v úseku Praha-Město, spolu s průtokem odpovídajícím okamžiku přelití, jsou uvedeny v tabulce „**Místa přelití PPO na území hl. města Prahy pod soutokem Vltavy a Berounky, zkoumaná pomocí teoretické povodňové vlny**“. Tato tabulka, spolu s grafy Q-H křivek, ukazujících přesný okamžik přelití protipovodňové ochrany a s vyznačením místa jejího přelití jsou obsaženy v **přílohách etapy A**.

Pro opatření v části **Soutok** (se spodní okrajovou podmínkou ř.km 58,2 pod Barrandovským mostem) bylo dohodnuto se zadavatelem na výrobních výborech, že vzhledem k ovlivnění průtoky z obou řek na soutoku se určí definitivně stupeň ochrany formou diagramů ovlivněných Q-H křivek v rámci Etapy D. Pro určení přibližných průtoků a jednotlivých míst přelití byla v rámci etapy A simulována teoretická vlna, pro niž byly jako horní okrajová podmínka použity vzestupné věte hydrogramů povodně 2002 v profilech Vrané a Kazín, prodloužené tak, aby výsledný průtok pod soutokem došel na hodnotu okolo $6160 \text{ m}^3/\text{s}$. Pomocí této vlny se stanovila místa přelití PPO s tím, že průtok (resp. kombinace průtoků) v okamžiku při jejich přelití bude dále předmětem podrobného zkoumání pomocí ustálených simulací kombinací průtoků z Vltavy a Berounky a popsán Q-H diagramem ukazujícím ovlivnění průtokem z druhé řeky.

Mista přelití PPO v úseku soutok s porovnáním výsledků analýzy okamžiku jejich přelití metodou teoretické vlny a metodou kombinací ustálených průtoků z Vltavy a Berounky jsou uvedena v tabulce „**Mista přelití PPO v oblasti soutoku Vltavy a Berounky, posuzovaná dynamickými simulacemi povodně 2013 a teoretických vln**“ - , Q-H ovlivněné diagramy, ukazující kombinaci průtoků v okamžiku přelití jsou obsaženy v grafických **přílohách etapy E**.

6.2 Ověření stupně ochrany protipovodňových opatření v rámci modelu Klecany – Mělník

V rámci tohoto úkolu byla fakticky posuzována účinnost a funkčnost stávajících hrází v úseku Klecany – Mělník, a to jak protipovodňových hrází, tak i původních koncentračních hrází, jejichž hlavním cílem je ochránit zájmové inundační území nikoliv před zatopením, ale před soustředěným proudem, vytékajícím z koryta Vltavy, případně vnosem sedimentů. Seznam všech posuzovaných úseků hrází je uveden v tabelární příloze „**Přelití hrází v úseku Klecany – Mělník**“ v sešitu příloh etapy A.

Charakteristiky proudění a funkčnost hrází byly posuzovány při průchodu **teoretické povodňové vlny na Vltavě**, která byla sestavena složením a spasováním vzestupných větví povodňových vln z června 2013 a srpna 2002 a po dosažení průtoku cca $5100 \text{ m}^3/\text{s}$ stoupal průtok v teoretické povodňové vlně s konstantním přírůstkem $20 \text{ m}^3/\text{s}$ za hodinu. Přítok z Labe byl během teoretické povodňové vlny konstantní $Q_a = 104 \text{ m}^3/\text{s}$ (střední roční průtok ve stanici Kostelec nad Labem).

Hlavním výstupem této etapy řešení jsou konzumční křivky sestavené pro jednotlivé hráze v místech, kde dojde k prvnímu přelití hráze – jako vztah úrovně hladiny před hrází a celkového průtoku v daném údolním profilu. Na soutoku Labe s Vltavou, kde je úroveň hladiny ovlivňována velikostí průtoku v obou řekách, byla míra ochrany posouzena též s využitím výsledků výpočtu ustáleného proudění při různých kombinacích průtoků ve Vltavě a v Labi. Rozsah simulovaných průtoků ve Vltavě a Labi, řešené kombinace průtoků s uvedením celkového průtoku v Labi pod soutokem (LGS Mělník) udává tab. 6.1.

Tab. 6.1 – Kombinace ustálených průtoků – pro posouzení stupně ochrany hrázi

| | | Labe $Q [\text{m}^3/\text{s}]$ | | | | | |
|----------------------------------|-------------|--------------------------------|-------|---------|----------|-------------|------|
| | | Q_a | Q_1 | $> Q_5$ | Q_{50} | $> Q_{500}$ | |
| | | 104 | 452 | 800 | 1260 | 2000 | |
| Vltava $Q [\text{m}^3/\text{s}]$ | < Q_a | 104 | | 556 | 904 | 1364 | 2104 |
| | < Q_1 | 800 | 904 | 1252 | 1600 | 2060 | 2800 |
| | < Q_{10} | 2000 | 2104 | 2452 | 2800 | 3260 | 4000 |
| | > Q_{50} | 3548 | 3652 | 4000 | 4348 | 4808 | 5548 |
| | > Q_{500} | 5444 | 5548 | | | | |

Vypočtené úrovně hladin při různých kombinacích ustálených průtoků ve Vltavě a v Labi byly vyneseny do grafů konzumčních křivek jednotlivých hrází – a dávají tak představu o ovlivnění přelití hráze průtokem v Labi. **Konzumční křivky jednotlivých hrází** jsou samostatnými přílohami závěrečné zprávy a jsou diskutovány v popisech charakteristik proudění u jednotlivých hrází. Celkový průtok v daném údolním profilu, při kterém došlo k přelití hráze při průchodu teoretické povodňové vlny, je uveden v tabelární příloze „**Přelití hrází v úseku Klecany – Mělník**“.

Jak ukázaly výsledky simulace teoretické povodňové vlny, řada hrází dříve obteče, event. se téměř zaplní vodou prostor za hrází dříve, než dojde k přelití vlastní koruny hráze. Charakteristiky proudění v prostoru jednotlivých hrází resp. linii hrázi, které tvoří funkční celek (tj. postupné zatápění prostoru za hrází a v okamžiku přelití jednotlivých hrází) jsou dokumentovány na mapách hloubek a hladin v rozhodujících okamžicích teoretické povodňové vlny. Z těchto map je rovněž možné odvodit rozsah území, které jednotlivé hráze (nebo jejich linie tvořící funkční celky) chrání až do okamžiku svého přelití. Mapy hloubek a hladin, sestavené z výsledků všech kombinací ustálených průtoků z Vltavy a Labe, ilustrují ovlivnění funkčnosti hrází (zatečením za hráze, event.

zaplavením směrem od Labe a přelití hrázi) zpětným vzdutím od Labe. Obě sady map hloubek a hladin – jak v rozhodujících okamžicích povodňové vlny, tak z výsledků kombinací ustálených průtoků z Vltavy a Labe, jsou přílohou závěrečné zprávy (v sekci příloh pro etapu A) – na konkrétní mapy se odkazuje následující popis charakteristik proudění u jednotlivých hrázi.

Legenda:

V názvu příloh je používán zástupný znak „???. Vždy značí, že na tomto místě mohou být různé symboly (např. na začátku názvu „Hlad“ – pro mapu hladin, resp. „Hlb“ – pro mapu hloubek) nebo různé hodnoty průtoků ve Vltavě (??V), resp. v Labi (??L). Název přílohy, který obsahuje „???" tak odkazuje vždy na více příloh a umístění „???" vyznačuje, které parametry mohou nabývat více významů/hodnot.

úsek hrází „Pod Vrbnem – Hausmanova – Hořín“ (LB, ř.km 0,0 – 3,7)

Tato linie hrází tvoří fakticky funkční celek – a to jak z hlediska ochrany území, tak z hlediska funkčnosti – po přetečení nejnižší hráze Hořín zateče voda za obě zbyvající hráze, resp. při vyšších průtocích v Labi za celou linii hráze zateče voda dříve, než dojde k jejímu přelití.

Při nízkých průtocích v Labi přeteče jako první hráz Hořín, a to cca v ř.km 1,4, při celkovém průtoku v tomto profilu cca 1080 m³/s (viz příloha „Konzumční křivka hráze Hořín“). Po jejím přelití, resp. při nižším průtoku ve Vltavě, avšak v kombinaci s vysokými povodňovými průtoky v Labi, dojde k zatečení vody za celou liniu „Pod Vrbnem – Hausmanova – Hořín“ – viz přílohy „Hlb_ust_???V_800L_D“ a „Hlad_ust_???V_800L_D“ (pro průtok v Labi vyšší než Q₅), event. přílohy „Hlb_ust_???V_1260L_D“ a „Hlad_ust_???V_1260L_D“ (pro průtok v Labi odpovídající Q₅₀).

Rozsah ochráněného území celou liniu vyplývá z přílohy „??_vlna_1080V_104L_beZH_D“ zobrazující rozsah zaplaveného území pro případ, kdy byla hráz Pod Vrbnem odstraněna, a v okamžiku prvního přelití této linie (je-li kompletní). Nejvyšší z celé této linie je hráz Pod Vrbnem, jejíž přelití nastává (při průchodu teoretické povodňové vlny) až při průtoku ve Vltavě Q = 3170 m³/s; situaci v chráněném území při tomto průtoku zachycuje příloha „??_vlna_3170V_104L_D“ – celé chráněné území je v okamžiku přelití hráze Pod Vrbnem již zaplaveno.

Linie hrází se nachází blízko soutoku Labe s Vltavou – hladina podél hrází tedy značně závisí na průtoku v Labi, resp. na součtu průtoku v obou řekách. Změna průtoku v Labi od středního ročního průtoku až po Q₅₀₀ může ovlivnit úroveň hladiny v tomto území až o 3 m (při srovnatelných průtocích ve Vltavě) – viz přílohy „Konzumční křivka hráze Hořín“, „Konzumční křivka hráze Hausmanova“ a „Konzumční křivka hráze Pod Vrbnem“.

hráz „Zelčín – Vrbno“ (LB, ř.km 3,9 – 5,4)

Hráz Zelčín – Vrbno můžeme posuzovat samostatně, neboť až do okamžiku jejího přelití chrání uzavřené území oddělené od ostatního zahrádzového území zvýšeným terénem. Do chráněného území tedy voda nezateče za hrází při žádné kombinaci průtoků ve Vltavě a Labi, vždy se do něj dostane až přelitím vlastní hráze.

Při průchodu teoretické povodňové vlny nastane přelití hráze při průtoku ve Vltavě Q = 2880 m³/s. Rozsah ochráněného území do okamžiku přelití hráze vyplývá z přílohy „??_vlna_2880V_104L_beZH_D“ zobrazující rozsah zaplaveného území pro případ, kdy byla hráz Zelčín – Vrbno odstraněna a v okamžiku přelití této hráze. Stejnou situaci zachycuje pro srovnání příloha „??_vlna_2880V_104L_D“, avšak se schematicovanou hrází Zelčín – Vrbno dle skutečnosti.

Průběh hladiny podél hráze je již méně ovlivněn průtokem v Labi, než tomu bylo v případě linie hrází „Pod Vrbnem – Hausmanova – Hořín“. Změna průtoku v Labi od středního ročního průtoku až po Q₅₀₀ ovlivňuje úroveň hladiny u hráze max. o 1,5 m, ale např. při průtoku v Labi Q = 2000 m³/s dojde k přelití hráze již při Q = 1500 m³/s ve Vltavě – viz příloha „Konzumční křivka hráze Zelčín – Vrbno“.

úsek hrází „Pod Lužcem – Tůmova“ (LB, ř.km 6,8 – 7,6)

Obě hráze tvoří funkční celek – hráz Tůmova vybíhá z hráze Pod Lužcem směrem na východ (ve směru toku Vltavy) a její niveleta se poměrně rychle snižuje až na úroveň terénu. Díky tomu hráz Tůmova obteče na

východním konci již při $Q = 920 \text{ m}^3/\text{s}$, k přelití jejího východního konce (nízko nad terénem) dojde při průtoku jen o málo vyšším.

Přelití hráze Pod Lužcem nastane (při průchodu teoretické povodňové vlny) při Q cca $1650 \text{ m}^3/\text{s}$. Již při nižších průtocích ve Vltavě však dochází k zatečení za hráz (postupnému zaplavování ochráněného území) starým ramenem přes Zelčinskou tůň, Zelčín a Chramostek – stav zaplavení inundačního území bezprostředně před přelitím hráze Pod Lužcem zachycuje přílohy „???.vlna_1650V_104L_D“. K zatékání za hráze dochází i při kombinaci nižších průtoků ve Vltavě s vysokými povodňovými průtoky v Labi – viz přílohy „Hlb_ust_???.V_1260L_D“ a „Hlad_ust_???.V_1260L_D“ (pro průtok v Labi odpovídající Q_{50}), resp. přílohy „Hlb_ust_???.V_2000L_D“ a „Hlad_ust_???.V_2000L_D“ (pro průtok v Labi vyšší než Q_{500}).

Změna průtoku v Labi od středního ročního průtoku až po Q_{500} ovlivňuje úroveň hladiny u hráze max. o 0,8 m.

hráz „Nad Lužcem“ (LB, ř.km 8,3 – 8,6)

Hráz Nad Lužcem můžeme posuzovat samostatně, neboť až do okamžiku jejího přelití chrání uzavřené území oddělené od ostatního zahrádzového území zvýšeným terénem. Do chráněného území tedy voda nezateče za hrází při žádné kombinaci průtoků ve Vltavě a Labi, vždy se do něj dostane až přelitím vlastní hráze.

Při průchodu teoretické povodňové vlny nastane přelití hráze při průtoku ve Vltavě $Q = 2240 \text{ m}^3/\text{s}$. Rozsah ochráněného území do okamžiku přelití hráze vyplývá z přílohy „???.vlna_2240V_104L_bezH_D“ zobrazující rozsah zaplaveného území pro případ, kdy byla hráz Nad Lužcem odstraněna a v okamžiku přelití této hráze. Stejnou situaci zachycuje pro srovnání příloha „???.vlna_2240V_104L_D“, avšak se schematizovanou hrází Nad Lužcem dle skutečnosti.

Průběh hladiny podél hráze je ovlivněn průtokem v Labi jen velmi málo. Změna průtoku v Labi od středního ročního průtoku až po Q_{500} ovlivňuje úroveň hladiny u hráze max. o 0,3 m – viz příloha „Konzumční křivka hráze Nad Lužcem“.

hráz „Kozárovice - Úpor“ (PB, ř.km 3,4 – 5,8)

Relativně nízká, de facto koncentrační hráz, jejíž přelití nastane (při průchodu teoretické povodňové vlny) již při Q cca $970 \text{ m}^3/\text{s}$. Hráz Kozárovice - Úpor je poslední pravobřežní hrází Vltavy (ve směru po proudu) – inundační území jí chráněné je tak zároveň levobřežním inundačním územím Labe. Z tohoto důvodu je zatékání za hráz, resp. zaplavení chráněného území od Labe značně ovlivňováno průtokem v Labi – viz příloha „Konzumční křivka hráze Kozárovice - Úpor“.

I při velmi nízkých průtocích ve Vltavě může být chráněné území zaplaveno od Labe – např. při Q_{50} na Labi dosahuje záplavové území Labe až k tělesu hráze – viz přílohy „???.ust_104V_1260L_D“ Rozsah zaplavení chráněného území při různých kombinacích průtoků ve Vltavě a v Labi zobrazují přílohy „Hlb_ust_???.V_???.L_D“ a „Hlad_ust_???.V_???.L_D“.

úsek hrází „Dědibaby – Bukol – Kozárovice“ (PB, ř.km 5,7 – 12,0)

Dlouhá linie pravobřežních hrází tvoří funkční celek. Za tuto linii voda prakticky nemůže zatéci – jen při vzácné kombinaci průtoku ve Vltavě cca 1200 až 1500 m^3/s s extrémním průtokem v Labi ($Q > Q_{100}$) může voda proniknout do chráněného území přelitím horního úseku hráze Kozárovice - Úpor (s niveletou 162,25 m n.m.). Ve všech ostatních případech pronikne voda do chráněného území přelitím vlastní hráze.

K prvnímu přelití hráze (při průchodu teoretické povodňové vlny) dojde SZ od obce Bukol při Q cca $1610 \text{ m}^3/\text{s}$. V tomto profilu (cca ř.km. 9,0) je průběh hladin podél hráze ovlivněn průtokem v Labi již minimálně – v rozsahu od středního ročního průtoku až po Q_{500} max. o 0,2 m – viz „Konzumční křivka hráze Dědibaby – Bukol – Kozárovice (profil Bukol)“. Rozsah ochráněného území do okamžiku přelití hráze vyplývá z přílohy „???.vlna_1610V_104L_bezH_H“ zobrazující rozsah zaplaveného území pro případ, kdy byla celá hráz Dědibaby – Bukol – Kozárovice odstraněna a v okamžiku přelití této hráze. Stejnou situaci zachycuje pro srovnání příloha „???.vlna_1610V_104L_H“, avšak se schematizovanou hrází Dědibaby – Bukol – Kozárovice dle skutečnosti.

Druhým kritickým místem této relativně dlouhé hráze z hlediska přelití (a možného ovlivnění průtokem v Labi) je uzávěr u Kozárovických túní (cca ř.km 5,7). V tomto profilu dojde k přelití hráze (při průchodu teoretické povodňové vlny) při průtoku cca $1770 \text{ m}^3/\text{s}$. Zde je však průběh hladin ovlivněn průtokem v Labi významněji – v rozsahu od středního ročního průtoku až po Q_{500} až o 1,1 m a např. při průtoku v Labi $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ nastane přelití uzávěru Kozárovických túní již při průtoku cca $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ve Vltavě – viz příloha „Konzumční křivka hráze Dědibaby – Bukol – Kozárovice (pf Kozárovické túně)“. Při této kombinaci průtoků ve Vltavě a Labi však bude chráněné území hrází Dědibaby – Bukol – Kozárovice zaplaveno již dříve – a to přelitím horního konce hráze Kozárovice – Úpor – viz výše. Rozsah zaplavení chráněného území při různých kombinacích průtoků ve Vltavě a v Labi zobrazují přílohy „Hlb_ust_???V_???L_H“ a „Hlad_ust_???V_???L_H“.

hráz „Zálezlice“ (PB, ř.km 5,2 – 5,6)

Hráz Zálezlice se nachází v pravobřežním inundačním území Vltavy relativně daleko od koryta Vltavy. Niveleta koruny hráze na 164,60 m n.m. dostatečně chrání hráz před přelitím ze strany záplavového území Vltavy i Labe až do vysokých povodňových průtoků – při průchodu teoretické povodňové vlny nastane skutečné přelití hráze (na straně Vltavy – v místě zavázání hráze do terénu) až při průtoku ve Vltavě $Q = 5300 \text{ m}^3/\text{s}$ – viz příloha „Konzumční křivka hráze Zálezlice“.

Při průchodu teoretické povodňové vlny však dojde k zaplavení Zálezlic již při nižším průtoku – proniknutím vody od západu průlehem v terénu. Toto proniknutí nastane při průtoku cca $4790 \text{ m}^3/\text{s}$ (průtok vyhodnocen v profilu odkud se průleh v terénu zaplavuje) – viz příloha „???_vlna_4790V_104L_D“. Při vysokých povodňových průtocích v Labi (kdy je hladina ovlivněna vzdutím) dochází k pronikání vody průlehem od západu již při nižších průtocích ve Vltavě – viz přílohy „???_ust_3548V_1260L_D“, resp. může dojít jak k zatečení vody od západu, tak i k přelití hráze – viz přílohy „???_ust_3548V_2000L_D“.

hráz „Dušníky – Dědibaby“ (PB, ř.km 12,0 – 12,9)

Hráz Dušníky – Dědibaby je vsazena mezi hráze Všestudy – Dušníky a Dědibaby – Bukol – Kozárovice. Hráz Dušníky – Dědibaby přeteče (při průchodu teoretické povodňové vlny) při průtoku ve Vltavě cca $2380 \text{ m}^3/\text{s}$ – viz „Konzumční křivka hráze Dušníky – Dědibaby“. Navazující hráz Dědibaby – Bukol – Kozárovice však přeteče při průtoku nižším (viz odstavec o hrázi „Dědibaby – Bukol – Kozárovice“) a od Dědibab voda zatéká zpět do prostoru chráněného hrázi Dušníky – Dědibaby – situaci před okamžikem přelití hráze Dušníky – Dědibaby ilustrují přílohy „???_vlna_2380V_104L_H“.

V tomto profilu (cca ř.km. 9,0) není průběh hladin podél hráze průtokem v Labi prakticky již vůbec ovlivněn – v rozsahu od středního ročního průtoku až po Q_{500} se liší jen o jednotlivé cm, což je pod hranicí přesnosti (rozlišitelnosti) výstupů matematického modelu.

hráz „Všestudy – Dušníky“ (PB, ř.km 12,9 – 14,6)

Hráz Všestudy – Dušníky je na protiproudém konci zavázána do tělesa náspu dálnice D8. Při stoupajícím povodňovém průtoku ve Vltavě je chráněné území za touto hrází nejprve zaplaveno zatečením vody od přelitých hrázi Dědibaby – Bukol – Kozárovice a Dušníky – Dědibaby; těsně před přelitím hráze Všestudy – Dušníky zateče voda za hráz i z důvodu přelití ochranné zídky v inundačním mostním poli dálnice D8.

Hráz Všestudy – Dušníky přeteče při průtoku ve Vltavě $Q = 2990 \text{ m}^3/\text{s}$, a to v prostoru zavázání hráze do náspu dálnice D8 – situaci před okamžikem přelití hráze ilustruje příloha „???_vlna_2990V_104L_H“. Rozsah území, ochráněného do okamžiku přelití hráze, vyplývá z porovnání s vypočteným rozsahem zaplaveného území pro případ, kdy byla hráz Všestudy – Dušníky z modelu odstraněna a v okamžiku přelití této hráze – viz přílohy „???_vlna_2990V_104L_bezH_H“.

hráz „Veltrusy“ (PB, ř.km 15,0 – 17,6)

Hráz Veltrusy je na protiproudém konci zavázána do tělesa náspu silnice II./608, zatímco poproudni konec postupně klesá až na úroveň terénu na konci Přírodního parku Veltrusy. Niveleta hráze je takto navržena záměrně, aby při stoupajícím povodňovém průtoku ve Vltavě voda postupně zatékala za hráz a zavzdouvala se proti proudu Mlýnského potoka, aby v okamžiku přelití hráze Veltrusy na horním konci bylo chráněné území

(fakticky obora a park zámku Veltrusy) již prakticky zaplněno a nebylo destruováno náhlým proudem o vysoké rychlosti.

Hráz Veltrusy finálně přeteče na svém horním konci při průtoku ve Vltavě $Q = 3020 \text{ m}^3/\text{s}$ – viz „Konzumční křivka hráze Veltrusy“. Rozsah ochráněného území do okamžiku přelití hráze (fakticky již značně zaplaveného) vyplývá z přílohy „??_vlna_3020V_104L_beZH_V“ zobrazující rozsah zaplaveného území pro případ, kdy byla celá hráz Veltrusy odstraněna a v okamžiku přelití této hráze. Stejnou situaci zachycuje pro srovnání příloha „??_vlna_3020V_104L_V“, avšak se schematizovanou hrází Veltrusy dle skutečnosti.

hráz „Veltrusy – nová zed“ (PB, ř.km 17,8 – 18,8)

Hráz Veltrusy – nová zed' chrání pravobřežní předpolí jezu Miřejovice. V ř.km 18,5 je niveleta nábřežní zdi snížena pro řízené zaplavování chráněného území při průtoku výšim než cca Q_{20} .

Hráz Veltrusy – nová zed' přeteče (ve sníženém úseku nábřežní zdi) při průtoku ve Vltavě $Q = 2750 \text{ m}^3/\text{s}$ – viz „Konzumční křivka hráze Veltrusy – nová zed“. Rozsah ochráněného území do okamžiku přelití hráze vyplývá z přílohy „??_vlna_2750V_104L_beZH_V“ zobrazující rozsah zaplaveného území pro případ, kdy byla celá hráz Veltrusy – nová zed' odstraněna a v okamžiku přelití této hráze. Stejnou situaci zachycuje pro srovnání příloha „??_vlna_2750V_104L_V“, avšak se schematizovanou hrází Veltrusy – nová zed' dle skutečnosti.

hráz „Roztoky“ (LB, ř.km 37,6 – 38,5)

Přelití hráze Roztoky nastane při průtoku ve Vltavě $Q = 4130 \text{ m}^3/\text{s}$ – viz „Konzumční křivka hráze Roztoky“. Nejprve přeteče ochranná zed' odvodňovací strouhy železniční trati (s niveletou horní hrany zdi 182,50 m n.m. B.p.v.), vlastní hráz přeteče prakticky při totožném průtoku v ř.km 37,7. Rozsah ochráněného území do okamžiku přelití hráze vyplývá z přílohy „??_vlna_4130V_104L_beZH_R“ zobrazující rozsah zaplaveného území pro případ, kdy byla celá hráz Roztoky odstraněna a v okamžiku přelití této hráze. Stejnou situaci zachycuje pro srovnání příloha „??_vlna_4130V_104L_R“, avšak se schematizovanou hrází Roztoky dle skutečnosti.

hráze plavebního kanálu „Vraňany – Hořín“ (LB)

K prvnímu přelití jižní hráze plavebního kanálu Vraňany – Hořín (směrem k Vltavě) při průchodu teoretické povodňové vlny dojde SZ od obce Lužec nad Vltavou (ř.km 8,4) při Q cca $3610 \text{ m}^3/\text{s}$ – viz „Konzumční křivka Hořinský plavební kanál (přelití do kanálu od Vltavy)“ – místo je příloze „Hlad_vlna_1_104L_Horin“ vyznačeno „černou elipsou“. Dalšími kritickými místy jižní hráze je úsek v ř.km 8,7 – zde se hráz přelije až při průtoku cca $4810 \text{ m}^3/\text{s}$ (vyznačeno „žlutou elipsou“) a dva úseky v oblasti obratiště lodí u Zelčina (v ř.km 5,8, resp. ř.km 5,2) při $Q = 4850 \text{ m}^3/\text{s}$ v tomto profilu – obě místa vyznačena „fialovými elipsami“. Poznámka: Příloha „Hlad_vlna_1_104L_Horin“ zachycuje průběh hladin v okamžiku přelití hráze v oblasti obratiště lodí u Zelčina (v LGS Vraňany je v tom okamžiku $Q = 5090 \text{ m}^3/\text{s}$) – cílem přílohy je identifikace všech kritických míst přelití jižní hráze v jediné příloze.

V profilu prvního přelití hráze u Lužce nad Vltavou je průběh hladin podél hráze ovlivněn průtokem v Labi – v rozsahu od středního ročního průtoku až po Q_{500} – až o cca 0,4 m – viz „Konzumční křivka Hořinský plavební kanál (přelití do kanálu od Vltavy)“. To znamená, že např. při průtoku v Labi $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ dojde k přelití jižní hráze Hořinského kanálu již při průtoku ve Vltavě cca $3300 \text{ m}^3/\text{s}$. Průběh hladin podél jižní hráze plavebního kanálu Vraňany – Hořín při různých kombinacích průtoků ve Vltavě a v Labi zobrazují přílohy „Hlad_ust_??_V_??_L_D“ a „Hlad_ust_??_V_??_L_H“.

Přelití horního uzávěru plavebního kanálu Vraňany – Hořín nastane při průtoku v profilu uzávěru $Q = 3920 \text{ m}^3/\text{s}$ – viz „Konzumční křivka Hořinský plavební kanál (přelití horního uzávěru)“. Úroveň hladiny u uzávěru kanálu není průtokem z Labe již ovlivňována.

Hodnotu průtoku pro přelití severní hráze plavebního kanálu nelze fakticky stanovit – závisí především na počáteční úrovni hladiny v kanálu během povodňové epizody. Při simulaci teoretické povodňové vlny byl plavební kanál zadán do výpočtu jako prázdný – a začal se plnit až po přelití jižní hráze u Lužce nad Vltavou. Následně se začal plnit i přetokem horního uzávěru. Po dostatečném naplnění plavebního kanálu došlo k přelití severní hráze u Zelčina při průtoku $Q = 4520 \text{ m}^3/\text{s}$ v tomto profilu. Je třeba si však uvědomit, že pokud bude plavební kanál na

začátku povodňové epizody zcela plný, dojde k přelití severní hráze prakticky ihned po přelití jižní hráze, tj. již při průtoku cca $3610 \text{ m}^3/\text{s}$. Místa, kde dochází k přelití severní hráze nejdříve, jsou vyznačena elipsami v příloze „Hlad_vlna_2_104L_Horin“.

6.3 Ověření konzumčních křivek hlavních profilů

6.3.1 Analýza křivky LGS Praha – Chuchle + zvážení přesunu měření vysokých průtoků na jiný pražský vodočet

Pro analýzu měrné křivky **limnigrafické stanice Praha – Chuchle** byly použity dynamické rekonstrukce, provedené v rámci Etapy A, a jejich srovnání se současnou měrnou křivkou a jejím vývojem z posledních let. Vývoj oficiální měrné křivky je markantní zejména po povodni 2013, kdy ČHMÚ zvedl celý průběh křivky od průtoku cca $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ tak, aby odpovídal stanovenému kulminačnímu průtoku povodně. Ve vyšších průtocích tak současná křivka vykazuje podstatně vyšší hladinu než křivky předchozí a při průtoku $5160 \text{ m}^3/\text{s}$ je nyní hladina dle křivky o 30 cm výše, než je naměřená hodnota z roku 2002. Dynamické výpočty rekonstrukce povodně 2013 a teoretické povodňové vlny pro přelití PPO v Praze souhlasí velmi dobře se stávající měrnou křivkou do průtoku cca $2500 \text{ m}^3/\text{s}$, potom však v souladu s upraveným průtokem v Chuchli, korigovaným DHI na cca $3180 \text{ m}^3/\text{s}$, ukazují tendenci k většímu klesání konzumpční křivky postupně až ke kótě hladiny, zaměřené při povodni 2002. Dynamická rekonstrukce povodně 2013 ukazuje na mírou hysterezi křivky, která nepřesahuje na konci zkoumané sestupné větve (sestupná větev byla zkoumána pouze do průtoku cca $2500 \text{ m}^3/\text{s}$) rozdíl v hladině cca 10 cm. Poslední dynamickou simulaci, použitou k analýze křivky stanice Praha – Chuchle, byla dynamická rekonstrukce povodně 2013, při které však bylo použito místo minimálního dna vybraného z dostupných zaměření naopak dno maximální, tedy dno vytvořené z obálky naměřených maxim z let 2002 – 2014. Zpracovatel upozornil, že rozdíl mezi minimálním a maximálním dnem je v úseku okolo profilu LGS Praha – Chuchle největší v celém měřeném rozsahu a dosahuje hodnot až 1,5-2 m. Q-H křivka simulace s maximálním dnem je ve zkoumaném rozsahu $1000 - 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ o 20-40 cm výše v hladinách. Relevantní je ale samozřejmě jen úsek okolo $1300 - 2000 \text{ m}^3/\text{s}$, kdy dochází pravděpodobně k počátku pohybu dna. V tomto intervalu průtoků činí rozdíl v hladině cca 20 cm, hloubka může tedy cca o 20 cm kolísat, což může způsobit nepřesnost až $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Při vyšších průtocích je rozdíl ještě vyšší, avšak od průtoku cca $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ výše již lze považovat fakt, že dno je ve vznosu a k této diskrepanci tedy nedojde, za téměř jistý. Na tomto místě dále upozorňujeme, že rozdíl v hladině může být v případě LGS Praha – Chuchle ještě o něco výraznější, neboť v úseku kolem ostrova u ledáren (zbytku ohrazení bývalého přístavu ledáren) neprobíhají v části koryta mezi ostrovem a pravým břehem pravidelná měření, tudíž jsou zde použity jednotné hloubky. Tato část řeky tvoří v daném úseku bezprostředně pod LGS profilem takřka 1/3 šířky koryta a její vliv by tudíž mohl přispět ještě k většímu rozdílu hladin mezi maximálním a minimálním dnem. Analýza křivky LGS Praha – Chuchle ukazuje grafická příloha „Analýza Q-H křivky LGS Praha – Chuchle“, jež je součástí příloh Etapy A.

Druhou částí analýzy bylo prověření možnosti přenést limnigrafický profil buď na některý jiný z pražských vodočtů, nebo do zcela nového profilu. V úvahu přicházely stávající historické vodočty Na Františku a Výtoň. Vodočet na Františku byl z úvah vyřazen pro přílišné ovlivnění manipulovatelným jezem v plavebním rameni VD Štvanice. Ze stávajících vodočtů byl tedy prověřován pouze profil Výtoň a k posouzení byl přidán profil pod Barrandovským mostem v ř. km 58,2, u kterého ukazovala zaměření menší pohyb dna než v profilu Chuchle, a který byl také použit jako spodní okrajová podmínka pro výpočty v rámci posouzení stupně ochrany PPO v oblasti soutoku Vltavy s Berounkou.

Analýza potenciálního profilu v ř.km 58,2 pod Barrandovským mostem byla provedena pomocí stejných dynamických simulací jako analýza LGS Praha – Chuchle, tedy simulace povodně 2013 při současném stavu terénu a teoretické povodňové vlny pro přelití PPO v Praze. Q-H křivky dynamických výpočtů v tomto profilu ukázaly sice minimální hysterezi křivky, nepřesahující na konci simulované sestupné větve povodňové vlny 2013 (při průtoku cca $2500 \text{ m}^3/\text{s}$) hodnotu 4-5 cm, avšak stále výrazné ovlivnění hladiny pohybem dna v rozsahu $15 - 30 \text{ cm}$, (v relevantním intervalu průtoků cca $1300 - 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 17–23 cm) pravděpodobně způsobené větší koncentrací průtoku do koryta s minimálními bermami. Analýzu Q-H křivky profilu ř.km 58,2 pod Barrandovským mostem ukazuje grafická příloha „Q-H křivka v profilu ř.km 58,2 pod Barrandovským mostem - konstrukce na základě dynamických výpočtů“, jež je součástí příloh Etapy A.

V profilu LGS Výtoň tytéž dynamické výpočty ukázaly podstatně nulovou hysterezi Q-H křivky (v případě simulace povodňové vlny 2013) a velmi malý rozdíl v hladinách mezi simulacemi s maximálním a minimálním dnem. Rozdíl hladin činí nejvýše 20 cm, v relevantním intervalu průtoků cca $1300 - 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ pak již zcela zanedbatelný rozdíl hladin v řádu jednotlivých cm. Tento fakt je zřejmě způsoben stabilizačním efektem dlouhé

přelivné hrany relativně blízkého pevného Štítkovského jezu, který ještě při průtoku okolo 1500 – 2000 m³/s není zcela zatopen a vliv změn dna téměř neutralizuje. Tento efekt však pravděpodobně může také způsobit minimální rozdíly hladin při normálních (nepovodňových) průtocích, což může ovlivnit přesnost jejich měření. Zpracovatel proto dává k uvážení použití obou vodočtů s připadným přesunem referenčního měření na vodočet Výtoň při zvyšujícím se průtoku po dosažení určitého stanoveného limitu. Analýzu Q-H křivky profilu LGS Výtoň ukazuje grafická příloha „Q-H křivka v profilu LGS Výtoň - konstrukce na základě dynamických výpočtů“, jež je součástí příloh Etapy A.

Jako pozitivum, týkající se všech pražských vodočtů, je třeba zmínit jejich nízkou citlivost na vegetační období, která může hrát naopak značnou roli u vodočtů v otevřené krajině, např. u dále posuzovaného vodočtu Vraňany.

6.3.2 Analýza křivky LGS Mělník

Při analýze konzumční křivky stanice ČHMÚ Mělník byly využity výsledky simulací/rekonstrukcí skutečných povodňových vln z června 2013 a srpna 2002. Pro konstrukci konzumční křivky byly z těchto výsledků vytaženy vypočtené vztahy Q/H, a to jak z modelu Klecany – Mělník (LGS Mělník se nachází blízko dolní okrajové podmínky – ta je však definována dle skutečně pozorovaných vodních stavů), tak i z modelu úseku Labe od soutoku Labe s Vltavou po jez Střekov (úroveň hladiny v LGS Mělník je vypočtena modelem na základě zkalibrovaných parametrů). Výsledky simulací 2D matematickým modelem byly porovnány s dvěma křivkami ČHMÚ.

Analýza ukázala, že konzumční křivka ČHMÚ č. 505 odpovídá výsledkům simulací až do průtoku cca 3200 m³/s. Při vyšších hodnotách průtoku křivka ČHMÚ č. 505 lineárně stoupá, zatímco výsledky simulací naznačují určité zakřivení křivky, tj. se stoupajícím průtokem se nárůst hladiny postupně zmenšuje. Ze simulace 2D matematickým modelem rovněž vychází poněkud vyšší kulminační průtok povodně z června 2013, a to $Q_{max} = 3720 \text{ m}^3/\text{s}$, což je o 80 m³/s více než údaj ČHMÚ. Tento rozdíl však představuje jen cca 2 % kulminačního průtoku a pohybuje se pod mezí přesnosti jak vstupních dat, reálně očekávaných výsledků studií založených na matematickém modelování proudění v otevřených korytech, ale především pod mezí dosažitelné přesnosti vyhodnocení kulminačního povodňového průtoku.

Na druhou stranu, kulminační průtok povodně ze srpna 2002, udávaný ČHMÚ ve stanici Mělník $Q_{max} = 5300 \text{ m}^3/\text{s}$, neleží na konzumční křivce vzniklé analýzou výsledků simulací. Z výsledků simulací 2D matematického modelu vyplývá Q_{max} cca 4900 m³/s. Tato hodnota vychází za předpokladu Q_{max} (Praha – Chuchle) = 5160 m³/s a může být ovlivněna skutečností, že v úseku Praha – Mělník není uvažován žádný přítok z mezipovodí a též nepřesnou transformaci vyhodnoceného hydrogramu ze stanice Brandýs nad Labem do profilu Štěpánský most (Labe) – viz úvaha v kap. 5.2.3 o kalibraci modelu. Přesto však rozdíl více než 400 m³/s indikuje, že by vyhodnocený kulminační průtok ve stanici Mělník $Q_{max} = 5300 \text{ m}^3/\text{s}$ mohl být nadhodnocen.

6.3.3 Analýza křivky LGS Vraňany (+ ověření zpětného vzdutí od Labe)

Při analýze konzumční křivky stanice ČHMÚ Vraňany byly využity výsledky simulací/rekonstrukcí skutečných povodňových vln z června 2013 a srpna 2002, a to vypočtené vztahy Q/H ukládané s časovým krokem 2 hodiny. Výsledky simulací 2D matematickým modelem byly porovnány s křivkou ČHMÚ a dále s Q/H hodnotami z vyhodnocených vodních stavů a průtoku ČHMÚ z povodně v červnu 2013.

Analýza ukázala, že konzumční křivka ČHMÚ č. 584 i data ČHMÚ z povodně 6/2013 odpovídají výsledkům simulací při nízkých povodňových průtocích 600 až 800 m³/s a dále pak v rozsahu průtoků cca 2800 až 3800 m³/s. V rozsahu průtoků 800 až 2800 m³/s indikují výsledky 2D matematického modelu vyšší úrovňě hladin při srovnatelných průtocích, a to až o 30 cm, přičemž výsledky simulací/rekonstrukcí obou velkých povodní (6/2013 a 8/2002) generují fakticky identickou konzumční křivku (přestože jsou použity odlišné popisy prostorové distribuce hydraulických odporek – zohledňuje jinou vegetaci na březích a v inundačním území během obou povodní). Každopádně je možné konstatovat, že konzumční křivka odvozená z výsledků 2D matematických modelů platí pro letní období s vyššími hydraulickými odpory břehové vegetace i porostů v inundačním území.

Hodnoty kulminačních hladin a přiřazených kulminačních průtoků ČHMÚ obou velkých povodní odpovídají velmi dobře konzumční křivce sestrojené z výsledků simulací 2D matematického modelu. Je však třeba uvést, že simulovaný kulminační průtok povodně 6/2013 je o cca 120 m³/s vyšší než vyhodnocený ČHMÚ (důvodem je především vyšší odtok z Prahy), avšak při vyšší simulované kulminační hladině o 4 cm. V případě povodně

8/2002 je rozdíl v kulminačním průtoku cca 50 m³/s a 2D matematický model vypočetl ve stanici Vraňany úroveň hladiny o 5 cm vyšší, než byla vyhodnocená. Rozdíly jsou opět pod mezí dosažitelné přesnosti vyhodnocení kulminačního povodňového průtoku.

U stanice Vraňany byl vyhodnocen i vliv zpětného vzdutí od Labe při vysokých povodňových průtocích na Labi. Výsledky simulací kombinací různých ustálených průtoku ve Vltavě a Labi jsou vyneseny jednotlivými body do grafu konzumční křivky. Ukazují, při nízkém průtoku ve Vltavě může extrémní průtok v Labi ($> Q_{500}$) zvýšit hladinu v LGS Vraňany až o 1 m. V oblasti středních povodňových průtoků z Vltavy je vliv průtoku v Labi relativně malý, zatímco při velkých povodňových průtocích ve Vltavě opět roste. Z grafu je zároveň patrný vliv metody, jak byla konzumční křivka zkonztruována. Pokud je tvořena z výsledků simulací ustáleného proudění, vycházejí úrovně hladin při velkých průtocích z Vltavy výše, než když je tvořena z rekonstrukcí povodňových vln. Důvodem je skutečnost, že při výpočtu metodou ustáleného proudění je k dispozici nerealisticky dlouhý čas k většímu a rozsáhlejšímu zaplavení (a tedy zvýšení hladiny) v soutokovém území Labe s Vltavou.

7 Etapa B - Posouzení návrhů změn vyplývajících z nového VH řešení Vltavské kaskády a manipulací za povodní na ochranu území pod Vltavskou kaskádou

Nové vodohospodářské řešení bylo zpracovateli dodáno v podobě hydrogramů pro LGS Praha – Chuchle (výsledek studie FSv ČVUT [10]). Tyto hydrogramy představují možné využití retenčního objemu a manipulace na Vltavské kaskádě pro případ povodně z června 2013, a to variantně bez předpovědi průtoků a s předpovědí. Na výrobních výborech projektu bylo rozhodnuto, že bude posouzeno celkem 7 variant vodohospodářského řešení, tj. varianty 0, 1, 4 a 5 bez předpovědi a varianty 0, 1 a 4 s předpovědí.

Výše uvedených 7 hydrogramů bylo použito jako horní okrajová podmínka k 7 simulacím neustáleného proudění (průchodu povodňové vlny) 2D matematickým modelem přes Prahu a navazujícím modelem v úseku Klecany – Mělník. Zpracované varianty hydrogramů pro LGS Praha – Chuchle neodpovídají časově skutečnému průběhu povodňové vlny ve stanici Praha – Chuchle, bylo proto rozhodnuto, že přítok z Labe bude konstantní a bude odpovídat kulminační hodnotě transformovaného průtoku do profilu Štěpánský most, tj. $Q = 688 \text{ m}^3/\text{s}$.

Výsledkem jsou hydrogramy v důležitých profilech – LGS Praha – Chuchle, předávací okrajová podmínka Klecany, LGS Vraňany a LGS Mělník, které dávají představu o postupivosti povodňové vlny, její možné transformaci a též době, po kterou je možné udržet/prodloužit neškodný průtok na Vltavě. Rozsah záplavových území v úseku Klecany - Mělník při jednotlivých variantách vodohospodářského řešení je zřejmý ze zpracovaných záplavových čar, které jsou ve formě listů A3 v měřítku 1:10 000. Výsledné hydrogramy a mapy záplavových čar jsou obsahem složky příloh Etapy B. Úsek Praha se vzhledem k zadaným horním okrajovým podmínkám v profilu LGS Praha – Chuchle redukuje na úsek vnitřního města Malá Chuchle – Roztoky, který je celý chráněn systémem městské PPO, záplavové čáry v tomto úseku proto po dohodě se zadavatelem nebyly generovány.

8 Etapa C - Posouzení možnosti zvýšení neškodného průtoku pod Vltavskou kaskádou

Dle dohody na výrobních výborech byly posuzovány základní varianty neškodných průtoků z Vltavské kaskády 1500 m³/s (současný stav), 1700 m³/s a 2000 m³/s. Tyto hodnoty průtoků jsou vztaženy k profilu LGS Praha – Chuchle, tedy pod soutokem s Berounkou, bylo proto nutno nejprve pro výpočet rozsahu záplavy na území Prahy stanovit podíl průtoků z Vltavy a z Berounky – jak byly po dohodě se zadavatelem stanoveny, uvádí tab. 8.1.

Tab. 8.1 – Posouzení neškodného průtoku – hodnoty průtoků ve významných profilech

| | Q [m ³ /s] | | |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Vltava (Vrané) | 1170 | 1370 | 1512 |
| Berounka | 330 (2.SPA Beroun) | 330 (2.SPA Beroun) | 488 (3.SPA Beroun) |
| Vltava (LGS Praha – Chuchle) | 1500 | 1700 | 2000 |
| Labe (Štěpánský most) | 104 a 772 | 772 | 772 |
| Labe (LGS Mělník) | 1604 a 2272 | 2472 | 2772 |

V rámci modelu Praha (úseku Vrané (Černošice) – Roztoky) byly vyhodnoceny pouze tyto tři průtokové varianty. V rámci kritického (z hlediska neškodného průtoku) úseku Klecany Mělník bylo zkoumáno variant více: protože na soutoku s Labem je ovlivnění hladiny a rozsahu záplavy průtokem z Labe výrazné, byl současný neškodný průtok ve Vltavě Q = 1500 m³/s kombinován se dvěma průtoky v Labi Q_a = 104 m³/s a Q₅ = 772 m³/s, tyto výpočty byly pak provedeny pro dvě varianty dna: variantu s aplikovaným „návrhovým dnem“ (dnem ze zaměření po povodni 2013 s vloženými prohrábkami zanesených úseků dle projektů) a variantu též s aplikovaným návrhovým dnem + přidanými nánosy v korytě Vltavy v úseku Vraňany – Mělník, jež byly nebo jsou odstraňovány po povodni 6/2013. Důvodem pro použití návrhového dna byl fakt, že neškodný průtok je již blízko hodnotám průtoku, které zpracovatel odhaduje jako limit počátku pohybu dna, tudíž bylo pro neškodný průtok zvoleno řešení na straně bezpečnosti. Varianta s přidanými námosy v úseku Vraňany - Mělník pak měla prověřit diskutovaný vliv těchto námosů na charakteristiky proudění (především úroveň hladiny a rozsah záplavového území) při neškodném průtoku.

Z úvodních simulací pro průtok 1500 m³/s vyplývá, že vliv průtoku v Labi (posuzován ve dvou scénářích – ustálený přítok z Labe Q_a = 104 m³/s a Q₅ = 772 m³/s), zřejmý z rozsahu záplavového území na soutoku Labe s Vltavou, sahá až ke Kozárovickým tůněm, výše proti proudu již není zřetelný. Vliv neodstraněných námosů v úseku Vraňany-Soutok je pak při průtoku 1500 m³/s zcela zanedbatelný.

Po kontrole zadavatelem a následné diskuzi byly dále prověrovány průtoky 1700 m³/s a 2000 m³/s z Vltavy v kombinaci s průtokem Q₅ = 772 m³/s z Labe (pouze varianta s návrhovým dnem, tedy s odstraněnými námosy a provedenými úpravami Staré Vltavy po povodni z června 2013).

Jako výstup pro posuzování míry neškodnosti průtoku bylo provedeno GIS vyhodnocení- zkreslení záplavových čar všech variant do dvou map (pro úsek Klecany Mělník a pro úsek Praha), jež je dodáno v digitální formě jednak jako projekt v programu ArcGIS vyexportovaný pro volný prohlížeč ArcReader, a pak jako *.pdf sestava mapových listů 1:10 000, které jsou součástí tištěné formy studie, části přílohy Etapy C.

Z podrobnějšího pohledu na zpracované záplavové čary vyplývá, že v úseku od Klecany až Libčice je rozsah záplavového území při průtoku 1500 až 2000 m³/s ve Vltavě obdobný. Při průtoku zvyšujícím se nad hodnotu 1500 m³/s dochází k větším rozlivům na levém břehu jezu Dolany (při průtoku 2000 m³/s je již nedostupný velín jezu) včetně zaplavení několika domů. V Kralupech nad Vltavou není zásadnějšího rozdílu v rozsahu záplavového území mezi posuzovanými průtoky. V okoli jezu Miřejovice a Nových Ouholic má zvyšování průtoku na 1700 m³/s, resp. 2000 m³/s za následek zaplavenování dalších polí, lesů, delší zpětné vzdutí na Mlýnském potoce a vždy navíc nějaké chaty, zahrady domů i domy.

V posledním úseku – pod jezem Vraňany – se zvýšení „neškodného průtoku“ projeví především rozsáhlejším zaplavením zemědělských pozemků na pravém břehu Vltavy a v soutokovém území Vltavy s Labem, ale také zaplavením několika zahrad a domů, především v obcích Dědibaby a Kozárovice.

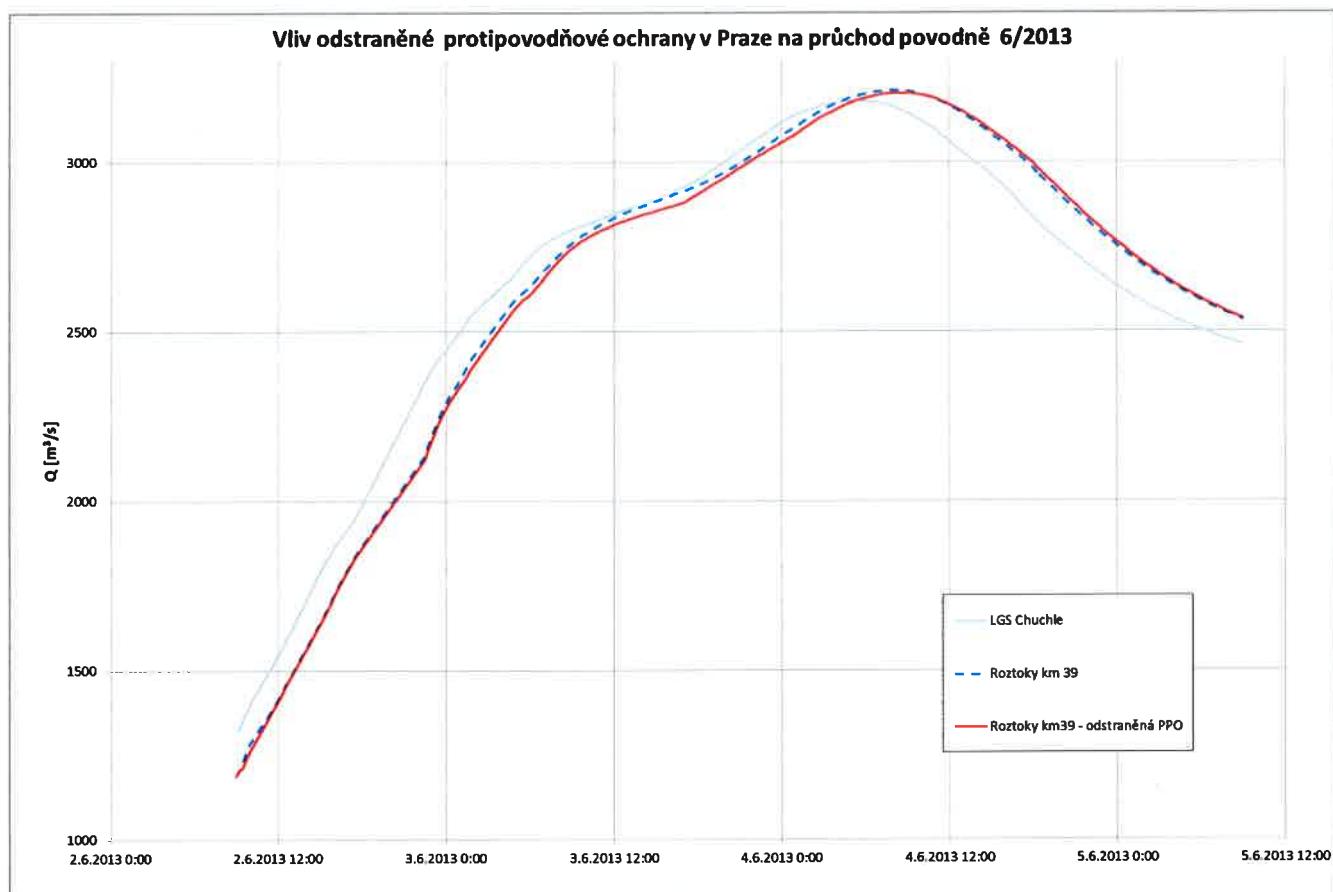
Detailní rozdíly v rozsahu zaplaveného území jsou zřejmé z grafických příloh etapy C „Posouzení neškodného průtoku v úseku Klecany – Mělník“, zpracovaných na podkladu ortofotomap v měřítku 1:10 000.

9 Etapa D- Analýza změn hladin, rozsahu rozливů a objemů vyvolaných výstavbou PPO

Účelem etapy D bylo zmapovat vliv protipovodňových opatření, nově vybudovaných na úseku dolní Vltavy, na transformační schopnost záplavového území – schopnost zpomalit postup povodňové vlny a snížit její kulminační průtok. Tato úloha byla zadavatelem formulována tak, aby dala odpověď na často pokládanou otázku, jak nově vybudovaná protipovodňová opatření ovlivnila průběh povodně 6/2013. V první fázi byla odstraněna veškerá nová protipovodňová opatření na území Prahy a na modelu Praha s takto upraveným terénem byla provedena dynamická simulace povodňové vlny 6/2013. Výsledný hydrogramu v profilu Roztoky/Klecany byl použit jako horní okrajová podmínka modelu Klecany-Mělník, ve kterém byla odstraněna nově vybudovaná PPO (Zálezlice a Veltrusy – nová zed) a simulaci neustáleného proudění byl zkoumán součtový vliv odstraněných PPO (v Praze i v úseku Praha – Mělník) na charakteristiky povodňové vlny.

Simulace na modelu Praha s odstraněnými protipovodňovými opatřeními ukázala, že vliv těchto opatření na průběh povodně je velmi malý až zanedbatelný – kulminace je cca o 30 min. opožděna a kulminační průtok snížen o 7 m³/s. Důvodem je hlavně fakt, že většina oblastí, které se mohou na transformaci povodňové vlny podílet (oblasti schopných zadržet větší objem vody, který by byl schopen ovlivnit průběh povodně) zůstane při povodni této velikosti ještě nezatopena. Jediné objemově významnější oblasti, zaplavené povodňovou vlnou 2013, jsou Stromovka a Troja. Transformačně nejvýznamnější chráněná oblast v Praze, kotlina Karlína, zůstává nezaplavena a zaplavila by se zřejmě až při výrazně vyšší povodni. Vzhledem k tomu, že se jedná o území obývané více než 10 000 obyvateli, je ale úvaha, že by zrovna tato oblast plnila funkci jakéhosi suchého poldru, zjevně irrelevantní.

Grafické porovnání hydrogramů rekonstrukce povodně 2013 a dynamické simulace téže povodně s odstraněnou protipovodňovou ochranou Prahy ukazuje graf na obr. 9.1.



Obr. 9.1 – vliv odstraněné protipovodňové ochrany na průchod povodně 6/2013 v Praze

Výstupní hydrogram v profilu Klecany (Roztoky km 39) byl použit jako horní okrajová podmínka modelu Klecany – Mělník a postup této minimálně transformované (ovlivněné) povodňové vlny byl simulován až na soutok Vltavy s Labem – výsledky jsou vykresleny v příloze „Hydrogramy povodně 6/2013 – skutečné (rekonstruované) a při odstranění PPO“, která zachycuje časové řady průtoků ve významných profilech: LGS Praha – Chuchle, předávací okrajová podmínka Klecany/Roztoky, LGS Vraňany a LGS Mělník a časovou řadu vypočtených úrovní hladin v LGS Vraňany (v zájmovém území, prakticky na konci posuzovaného úseku odstraněných PPO).

Z podrobné analýzy vykreslených křivek vyplývá:

- v profilu Klecany/Roztoky se odstranění PPO projevilo snížením kulminačního průtoku o $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (již uvedeno výše). Během nástupu povodně můžeme zaznamenat snížení průtoku až o $33 \text{ m}^3/\text{s}$, ale i tato hodnota je vzhledem k aktuálnímu celkovému průtoku ($2870 \text{ m}^3/\text{s}$) fakticky zanedbatelná.
- V LGS Vraňany se odstranění PPO projevilo snížením kulminačního průtoku rovněž o $7 \text{ m}^3/\text{s}$ a kulminace průtoku nastala cca o hodinu později (při $Q = 3185 \text{ m}^3/\text{s}$); je nutné však uvést, že o hodinu dříve je hodnota průtoku $3184 \text{ m}^3/\text{s}$. Během nástupu povodně došlo ke snížení průtoku až o $39 \text{ m}^3/\text{s}$, vzhledem k aktuálnímu celkovému průtoku ($2420 \text{ m}^3/\text{s}$) rovněž zanedbatelné.
V LGS Vraňany byl porovnán i časový průběh hladin skutečné (rekonstruované) povodňové vlny 6/2013 s průběhem hladin při odstraněných PPO – stanice leží prakticky na konci posuzovaného úseku a vliv odstraněných PPO by měl být v tomto profilu zřetelný (je-li významný). Z porovnání obou časových řad však vyplývá, že úrovně hladiny se v průběhu celé povodňové vlny liší max. o $2,5 \text{ cm}$, kulminační hladiny jsou v obou případech (s PPO i bez PPO) totožné.
- v LGS Mělník se kulminační průtoky nelíší; během nástupu povodně došlo ke snížení průtoku až o $39 \text{ m}^3/\text{s}$ – podobně jako ve stanici Vraňany.

Celkově můžeme hodnotit vliv odstranění PPO na průchod povodňové vlny z června 2013 (na kvantifikovatelné parametry – transformace povodňové vlny, snížení kulminačního průtoku, zpozdění postupu) jako nepodstatný až zanedbatelný. Důvodem jsou především velmi malé objemy prostorů (které vzniknou odstraněním PPO), a které tato povodňová vlna skutečně zaplaví, vzhledem k objemu vody v povodňové vlně a její charakteristice – vzestupná větev povodňové vlny představuje 2,5 dne. Je to tedy typická povodňová vlna dolního toku, jejíž charakteristiky je možné ovlivnit pouze nádržemi či velkými poldry.

10 Etapa E - Sestavení ovlivněných Q-H křivek na soutoku Vltavy s Berounkou

Náplní této etapy měla být vlastně aktualizace systému ustálených simulací různých kombinací průtoků z Vltavy a Berounky, použitého v rámci studie „Doplnění operačních map rozlivu Vltavy a Berounky o nižší povodňové průtoky 2011“. Metodika je použita pro vytvoření ovlivněných Q-H diagramů pro zájmové body ležící v prostoru soutoku v oblasti vlivu vzdutí, kde je výše hladiny (kromě průtoku v příslušné řece, při které toto místo leží) ovlivňována také výši přítoku z řeky druhé. Zatímco zájmovými body byly ve zmíněné studii (kromě obou vodočtů, ležících ve vlivu vzdutí od soutoku - LGS Zbraslav a LGS Radotín) většinou nejnižší body prahů mobilního hrazení protipovodňové ochrany a ovlivněné diagramy měly pomoci rozhodování Odboru krizového řízení MHMP kdy začít se stavbou dotyčných mobilních opatření, nyní je kromě celkové modernizace systému a aktualizace Q-H křivek- diagramů vodočtů Zbraslav a Radotín primárním účelem v rámci této studie určení stupně ochrany PPO v soutokové oblasti. Systém pak bude dodatečně možno využít pro stanovení ovlivněných Q-H diagramů pro jakýkoli bod v soutokové oblasti pro různé účely.

Základním úkolem bylo aktualizovat celý systém ustálených simulací pomocí nového systému plynulé změny hydraulických parametrů na základě kalibrace pomocí reálných povodní, a na základě předchozích zkušeností a zadání této studie upravit a rozšířit matici počítaných průtoků tak, aby pokud možno plynule pokryvala interval hladin v zájmovém území a také aby svým rozsahem umožnila určit okamžik přelití jednotlivých PPO a kombinace průtoků z Vltavy a Berounky, které mohou přelití způsobit.

Použitý systém zahrnuje 25 simulací kombinací 5 průtoků z Vltavy a 5 průtoků z Berounky. Simulace byly prováděny na modelu se spodní okrajovou podmínkou v profilu ř.km 58,2 pod Barrandovským mostem, pro který byla vytvořena z výsledků dynamických simulací v rámci etapy A Q-H křivka, ze které byly stanoveny spodní hladinové okrajové podmínky pro jednotlivé simulace. Protože je u některých kombinací výše průtoků vzhledem ke kalibračním průtokům dramaticky odlišná mezi oběma řekami, byl model rozdělen na úseky Vltava, Berounka (nad soutokem) a Vltava pod soutokem a podle průtoku v jednotlivých úsecích jim byla přidělen Manningův součinitel drsnosti (plynule měněný interpolací podle výše průtoku). Pro úseky Vltavy, kde je k dispozici série zaměření dna a byla použita teorie minimálního dna, je přiřazeno odpovídající dno koryta (minimální při průtocích, při kterých se předpokládá dno již v pohybu, dno zaměřené 2014 při průtocích nižších), a odpovídající součinitel náhradní hodnoty turbulentní viskozity. Hodnota Manningova součinitele drsnosti koryta pro mezilehlé průtoky byla plynule interpolována po jednotlivých úsecích.

Pro sestrojení ovlivněných Q-H křivek byl sestaven systém kombinací průtoků z obou řek tak, aby pro každý průtok z jedné řeky bylo spočítáno pět průtoků z řeky druhé a naopak. Bylo tak získáno vždy pět hladin pro pět průtoků, ovlivněných přítokem z druhé řeky, a tudiž (v optimálním případě) 5 bodů pro konstrukci Q-H křivky (v některých případech diagramů pro přelití PPO, kdy prostor před linií PPO zůstává dlouho suchý, vychází bodů pro některé křivky méně).

Kombinace průtoků z obou řek a jejich přibližnou hodnotu vzhledem k hodnotám n-letých průtoků ukazuje tab. 10.1.

Tab. 10.1 Kombinace průtoků z Vltavy a Berounky a jejich a přibližné n-letosti.

| Kombinace Q | | Q Berounka [m^3/s] | | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | < Q ₁ 200 | < Q ₅ 600 | > Q ₂₀ 1000 | > Q ₁₀₀ 1750 | > Q ₅₀₀ 2500 |
| Q Vltava [m^3/s] | < Q _a 100 | 300 | 700 | 1100 | 1850 | 2600 |
| | Q ₁ 650 | 850 | 1250 | 1650 | 2400 | 3150 |
| | < Q ₁₀ 1300 | 1500 | 1900 | 2300 | 3050 | 3800 |
| | > Q ₅₀ 2000 | 2200 | 2600 | 3000 | 3750 | 4500 |
| | > Q ₅₀₀ 3500 | 3700 | 4100 | 4500 | 5250 | 6000 |

Jak již bylo uvedeno, počet průtoků na každé řece byl zvolen tak, aby se z nich dala sestavit rozumně reprezentativní závislost pro křivku v celém rozsahu průtoků, výše průtoků pak byla stanovena tak, aby pokryla všechny potenciálně nebezpečné kombinace průtoků – protože Vltava je do jisté výše průtoku (a hlavně objemu

povodňové vlny) regulována Vltavskou kaskádou, byl zvolen její nejnižší průtok 100 m³/s nízký, tak aby i při výrazné regulaci průtoku z Vltavské kaskády bylo možno říci, jak vysoký průtok z Berounky způsobí zaplavení ohrožených míst resp. přelití PPO nad soutokem na Vltavě (proto také nejvyšší průtok z Berounky 2500 m³/s) a neopakovalo se překvapení ze situace podobná povodni 8/2002, kdy byly nečekaně vysokým povodňovým průtokem z Vltavy zaplaveny oblasti na Labi poměrně vysoko nad soutokem.

Všechny výpočetní stavby, jejich okrajové podmínky a hydraulické parametry popisuje tab. 10.2.

Tab. 10.2 – Tabulka výpočetních stavů

| č. simulace | Q [m ³ /s] | | | Spodní OP [m n.m.] | Klapka Modřany | Vrata PK Modřany | Drsnosti koryta | | | Dno | | | Eddy Viscosity | | |
|-------------|-----------------------|----------|----------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-------|-----------|------|------|-----------|----------------|------|-----------|
| | Vltava | Berounka | Vlt. pod sout. | | | | Vlt. | Ber. | Pod sout. | Vlt. | Ber. | Pod sout. | Vlt. | Ber. | Pod sout. |
| 1 | 100 | 200 | 300 | 187.48 | Zved. | Zved. | malé | malé | malé | 2014 | 2014 | 2014 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 2 | 100 | 600 | 700 | 188.14 | Sklop. | Zved. | malé | 41% | malé | 2014 | min | 2014 | 0.4 | 0.5 | 0.4 |
| 3 | 100 | 1000 | 1100 | 188.78 | Sklop. | Sklop. | malé | velké | malé | 2014 | min | 2014 | 0.4 | 0.6 | 0.4 |
| 4 | 100 | 1750 | 1850 | 189.83 | Sklop. | Sklop. | malé | velké | 21% | 2014 | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.4 |
| 5 | 100 | 2500 | 2600 | 190.71 | Sklop. | Sklop. | malé | velké | 65% | 2014 | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.5 |
| 6 | 650 | 200 | 850 | 188.39 | Sklop. | Sklop. | malé | malé | malé | 2014 | 2014 | 2014 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 7 | 650 | 600 | 1250 | 189.00 | Sklop. | Sklop. | malé | 41% | malé | 2014 | min | 2014 | 0.4 | 0.5 | 0.4 |
| 8 | 650 | 1000 | 1650 | 189.57 | Sklop. | Sklop. | malé | velké | 9% | 2014 | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.4 |
| 9 | 650 | 1750 | 2400 | 190.48 | Sklop. | Sklop. | malé | velké | 53% | 2014 | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.5 |
| 10 | 650 | 2500 | 3150 | 191.28 | Sklop. | Sklop. | malé | velké | velké | 2014 | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| 11 | 1300 | 200 | 1500 | 189.36 | Sklop. | Sklop. | 6% | malé | malé | min | 2014 | min | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 12 | 1300 | 600 | 1900 | 189.89 | Sklop. | Sklop. | 6% | 41% | 24% | min | min | min | 0.4 | 0.5 | 0.4 |
| 13 | 1300 | 1000 | 2300 | 190.37 | Sklop. | Sklop. | 6% | velké | velké | min | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.5 |
| 14 | 1300 | 1750 | 3050 | 191.18 | Sklop. | Sklop. | 6% | velké | velké | min | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| 15 | 1300 | 2500 | 3800 | 191.94 | Sklop. | Sklop. | 6% | velké | velké | min | min | min | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| 16 | 2000 | 200 | 2200 | 190.26 | Sklop. | Sklop. | 83% | malé | 41% | min | 2014 | min | 0.5 | 0.4 | 0.5 |
| 17 | 2000 | 600 | 2600 | 190.71 | Sklop. | Sklop. | 83% | 41% | 65% | min | min | min | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 18 | 2000 | 1000 | 3000 | 191.13 | Sklop. | Sklop. | 83% | 88% | 88% | min | min | min | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| 19 | 2000 | 1750 | 3750 | 191.89 | Sklop. | Sklop. | 83% | velké | velké | min | min | min | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| 20 | 2000 | 2500 | 4500 | 192.67 | Sklop. | Sklop. | 83% | velké | velké | min | min | min | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| 21 | 3500 | 200 | 3700 | 191.84 | Sklop. | Sklop. | velké | malé | velké | min | 2014 | min | 0.6 | 0.4 | 0.6 |
| 22 | 3500 | 600 | 4100 | 192.24 | Sklop. | Sklop. | velké | 41% | velké | min | min | min | 0.6 | 0.5 | 0.6 |
| 23 | 3500 | 1000 | 4500 | 192.67 | Sklop. | Sklop. | velké | velké | velké | min | min | min | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 24 | 3500 | 1750 | 5250 | 193.48 | Sklop. | Sklop. | velké | velké | velké | min | min | min | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 25 | 3500 | 2500 | 5000 | 194.27 | Sklop. | Sklop. | velké | velké | velké | min | min | min | 0.6 | 0.6 | 0.6 |

Systém plynulé změny hydraulických drsností, změn použitého dna a manipulací na PK Modřany je následující:

Součinitele hydraulických drsností - z kalibrace modelu vyšel poznatek, že se zvyšujícím průtokem by se měl zvyšovat Manningův součinitel hydraulické drsnosti (nahrazení jevů provázejících velké povodně, které ostatní parametry modelu popsat nemohou-zvýšená turbulence, obsah splavenin ve vodě nebo jen pohyb dna, který nedokáže eliminovat metoda minimálního dna). Kalibrace ukázala, že drsnost koryta by se měla zvyšovat mezi průtokem, odpovídajícím povodni 2006 a průtokem odpovídajícím povodni 2013, pro další zvyšování průtoku na průtok odpovídající povodni 2002 již nebylo nutné v oblasti soutoku hydraulické drsnosti zvyšovat. Byly proto stanoveny drsnosti koryta pro malé průtoky (< Q₂₀₀₆) a pro velké průtoky (> Q₂₀₁₃) a mezilehlé hodnoty byly interpolovány jako procenta rozdílu

Dno – podle teorie minimálního dna, kdy se předpokládá, že se dno dá do pohybu zhruba při průtoku, rovném povodni 2006, bylo pro průtoky nižší než Q₂₀₀₆ na jednotlivých úsecích zaměněno minimální dno za dno ze zaměření 2014.

Eddy Viscosity – součinitel turbulentní viskozity, pomáhající spolu se zvýšenou drsností koryta nahradit zvýšenou turbulenci při vysokých povodňových průtocích, kterou jinak 2D model používající výpočetní elementy v rádu metrů neumí popsat.

Klapka Modřany – klapkový jez Modřany se zcela skládí při průtoku cca 650 m³/s, do té doby se plynule skládí tak, aby udržel hladinu ve zdrži předepsanou manipulačním rádem na 189,30 m n.m. s tolerancí +20 cm, – 0 cm.

Vrata PK Modřany – horní klapková vrata PK Modřany se používají pro převádění vody při průtocích vyšších než 800 m³/s.

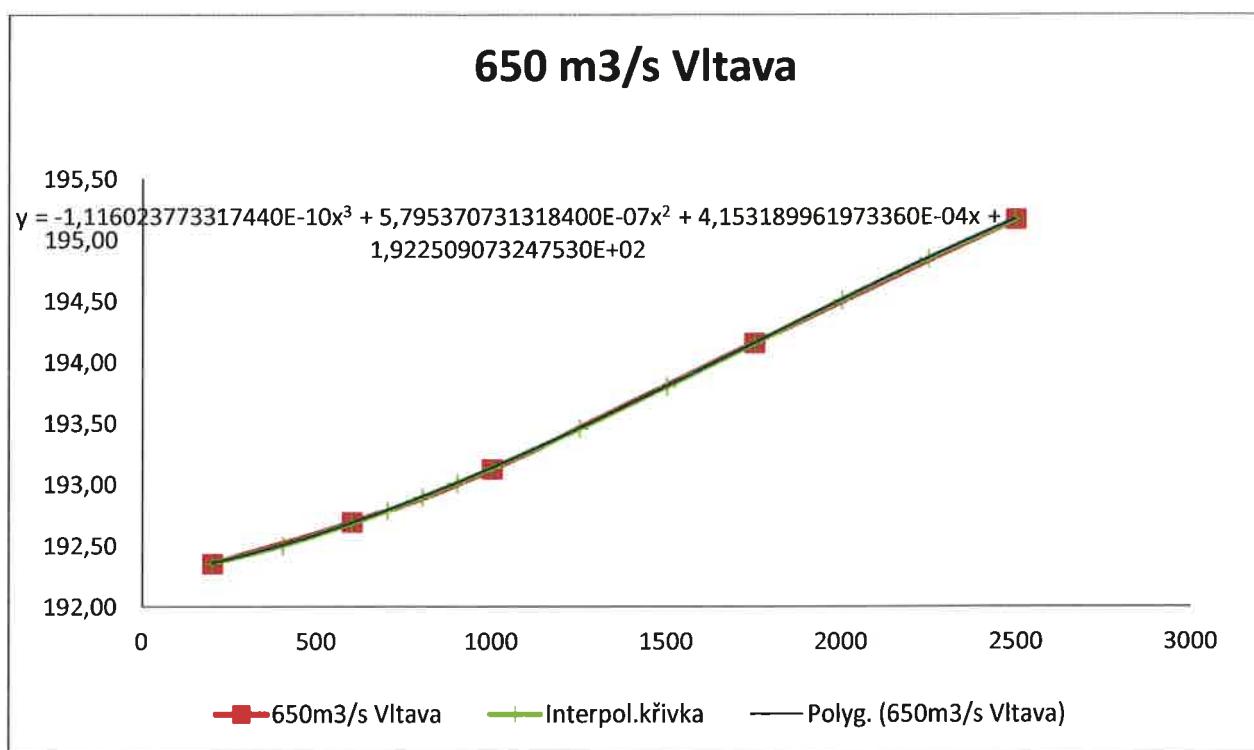
Finálním výstupem tohoto systému simulací jsou diagramy sestav Q-H křivek pro vybraná místa – vodočty a místa přelití PPO, stanovená pomocí teoretické vlny. Výše popisovaným systémem vzniklo pro každou lokalitu vždy 5 Q-H křivek, vykreslených z výsledků výpočtu, a pro rychlé určení hladiny při známých průtocích byly dointerpolovány mezilehlé Q-H křivky ve zvolených vhodných intervalech. Protože závislost hladiny při stálém

průtoku na průtoku ovlivňujícím z druhé řeky není vždy lineární, byla použita metoda trendových křivek v programu MS Excel, kterou se interpolovaly mezilehlé kóty hladiny ve spočítaných bodech na ose x (průtokové) grafu, a z těchto kót se potom konstruovaly mezilehlé Q-H křivky.

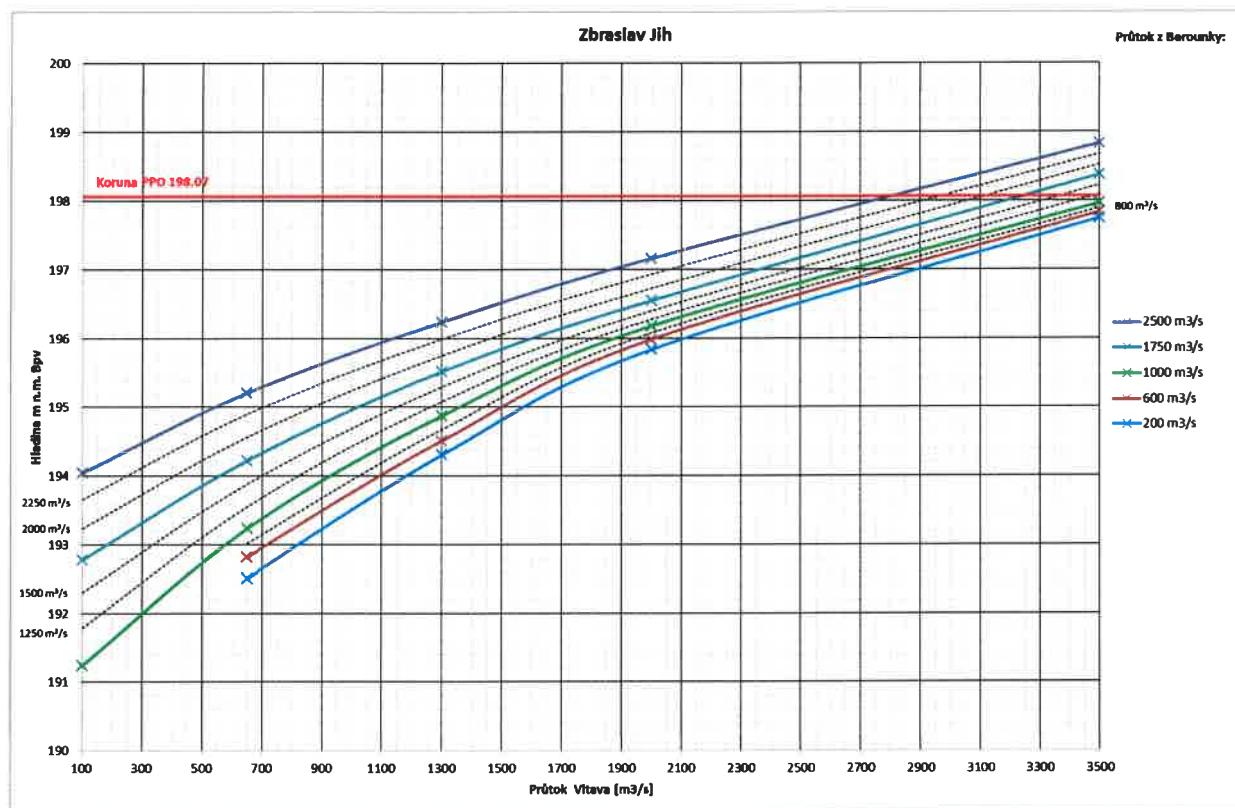
Na následujících obrázcích je ukázán postup interpolace: v tab 10.3 jsou šedě zvýrazněny vypočtené hodnoty, na následujícím grafu (obr. 10.1) je pak ukázána konstrukce interpolace pomocí trendové křivky, mezilehlé hodnoty pro odpovídající průtok jsou pak doplněny do tabulky a z ní je zkonstruována výsledná sestava Q-H křivek (obr.10.2).

Tab. 10.3 - tabulka interpolací pomocí trendových křivek

| Q [m ³ /s] | Vltava | | | | | |
|-----------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 100 | 650 | 1300 | 2000 | 3500 | |
| Berounka | 200 | 189.82 | 192.36 | 194.05 | 195.51 | 197.24 |
| | 400 | 189.98 | 192.50 | 194.15 | 195.59 | 197.28 |
| | 600 | 190.27 | 192.68 | 194.29 | 195.68 | 197.34 |
| | 700 | 190.46 | 192.79 | 194.37 | 195.73 | 197.37 |
| | 800 | 190.69 | 192.90 | 194.47 | 195.79 | 197.41 |
| | 900 | 190.94 | 193.01 | 194.57 | 195.84 | 197.46 |
| | 1000 | 191.23 | 193.13 | 194.69 | 195.90 | 197.50 |
| | 1250 | 191.78 | 193.46 | 194.91 | 196.04 | 197.64 |
| | 1500 | 192.29 | 193.80 | 195.14 | 196.19 | 197.80 |
| | 1750 | 192.78 | 194.15 | 195.38 | 196.37 | 197.96 |
| | 2000 | 193.23 | 194.51 | 195.62 | 196.55 | 198.13 |
| | 2250 | 193.65 | 194.85 | 195.88 | 196.76 | 198.31 |
| | 2500 | 194.04 | 195.17 | 196.14 | 196.98 | 198.48 |



Obr.10.1 – konstrukce mezilehlých bodů pomocí trendové křivky



Obr. 10.2 – Výsledný Q-H diagram pro vybrané místo porušení

11 Závěry a doporučení

Studie je unikátní svým rozsahem a komplexností zadání, se kterou daný úsek Vltavy zkoumá. Tato komplexnost umožnila do značné míry objasnit procesy, které v daném úseku při povodni probíhají; kalibrace pomocí rekonstrukce povodňových vln 2002, 2006 a 2013 pak napovídely, kde mohou být problémy jak v bilančním vyhodnocování průtoků v této oblasti, tak i ve vyhodnocení hydrogramů ve významných profilech a jak lze tyto úlohy, přesahující možnosti bilančních metod, vhodně řešit s využitím hydrodynamických modelů. Díky mnoha aspektům, které byly při řešení úlohy zvažovány, vystaly nové zajímavé skutečnosti, které vylákaly nutnost neobvyklých postupů (použití „minimálního dna“), ale také naznačily nové nejistoty (až překvapivě velký vliv vegetačního období na průběh hladin při určitých průtocích a konfiguracích terénu).

Studie dala odpověď na některá, zvláště po povodni 2013 hojně diskutovaná, téma. Zde je jejich stručné shrnutí:

Etapa A: Byla provedena analýza stupně ochrany jednotlivých protipovodňových opatření i koncentračních historických hrází v celém zájmovém úseku, bylo zkoumáno jejich vzájemné spolupůsobení a stanovována území, která jednotlivé hráze chrání. Pro jednotlivé linie hrází byly sestaveny konzumční křivky (pro profil prvního přelití), ze kterých vyplývají průtoky, do kterých hráze plní ochrannou funkci. Na soutoku Vltavy s Labem byla mimořádná pozornost věnována ovlivnění průtoků, při kterých dochází k přelití hrází, velikosti průtoku v Labi.

Analýza LGS profilů ukázala intervaly průtoků, ve kterých jsou měrné křivky pravděpodobně nepřesné a navrhla jejich korekci. Dále prokázala, že hojně diskutovaný malý rozdíl hladin mezi povodní 2002 a 2013 v úseku Vraňany-soutok s Labem je reálný a je způsobený zčásti odlišným vegetačním obdobím povodňových episod v červnu 2013 a srpnu 2002, zčásti konfigurací území, jeho využitím a vegetačním krytem. S využitím porovnání rekonstrukcí povodňových episod 2002, 2006 a 2013 a kalibrací jednotlivých modelů na ně byly korigovány kulminační průtoky v některých měrných profilech tak, aby nebyly mezi sebou v rozporu. Dále byly vyšetřeny dva potenciální nové měrné profily na území hl. m. Prahy.

Etapa B: S využitím výsledků studie [10] „Prověření strategického řízení Vltavské kaskády – parametry manipulačního řádu (FSV ČVUT, Praha, prosinec 2014)“ byly dynamickými simulacemi prověřeny postupivost a transformace výsledných hydrogramů studie [10] a dopad jednotlivých navrhovaných variant na rozsah zaplaveného území v úseku Klecany-Mělník.

Etapa C: Dle požadavků zadavatele byly na modelech simulovány varianty neškodného průtoku, vypouštěného z Vltavské kaskády 1500, 1700 a 2000 m³/s. Z výsledků byly vygenerovány záplavové čáry a nad ortofotomapami určené k dalšímu posouzení míry potenciálních škod v jimi zaplaveném území.

Etapa D: Dynamickou simulací na obou modelech s odstraněnými protipovodňovými opatřeními byl zkoumán vliv těchto opatření na průchod povodně 6/2013. Bylo prokázáno, že vliv těchto opatření na transformaci povodňové vlny je zanedbatelný, prakticky nulový.

Etapa E: Byl aktualizován a modernizován systém výpočtů ustálených kombinací průtoků z Vltavy a Berounky, s jehož použitím je možno pro jakýkoli bod v oblasti soutoku stanovit míru vlivu průtoku z obou řek a určit jednotlivé kombinace, při kterých hladina dosáhne kritické kóty. Tento systém byl využit pro sestavení diagramů ovlivněných Q-H křivek pro přelití jednotlivých protipovodňových opatření v oblasti soutoku Vltavy a Berounky a k vytvoření diagramu ovlivněných Q-H křivek pro měrné profily Zbraslav a Radotín. Systém je připraven pro další použití.

Modelová schematizace, kalibrace a korigování dat byly časově naprostě dominující složkou celého projektu, jehož výsledkem vznikl systém dvou navazujících modelů s nadstandardně vysokou spolehlivostí kalibrace v celém pásmu povodňových průtoků, připravený k řešení dalších konkrétních úkolů.

Většina výsledků je určena k podrobnému posouzení a další práci ze strany zadavatele, na podkladě zkušeností získaných při zpracování modelu však může řešitelský tým formulovat tato obecná doporučení:

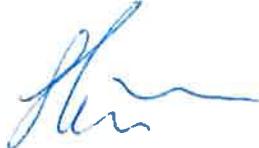
- Studie prokázala výrazný vliv pohybu dna při velkých povodních na charakteristiky proudění (průběh hladin) a po přijetí hypotézy pohyblivého dna došlo k výraznému zpřesnění výsledků kalibrace modelu a snížení závislosti součinitelů hydraulických drsností na velikosti povodňových průtoků. Minimální dno je vytvořeno z dostupných zaměření, která se však pravidelně provádějí pouze v plavební dráze splavných úseků. V některých nesplavných úsecích, jakkoli důležitých, je k dispozici někdy i pouze jediné alespoň

trochu spolehlivé zaměření. Pro důslednou aplikaci této teorie by bylo žádoucí provádět pravidelná měření dna důsledně ve všech úsecích. Pro případné další analýzy pohybu dna by potom bylo vhodné provést odběr a analýzu dnových sedimentů.

- Při měření průtoků v měrných profilech a používání výsledků vzešlých z této studie je třeba mít na paměti fakt, že veškeré výpočty byly prováděny pro drsnosti odpovídající nejneprživnějšímu vegetačnímu období, měly by být tedy na straně bezpečnosti. Proto se nyní vypočtené hladiny někdy mohou lišit od dříve používaných a rovněž stanovování průtoků v některých měrných profilech může vykazovat rozdíly, způsobené tímto faktem.
- Pro měření povodňových průtoků by bylo vhodné začít používat jako další referenční profil LGS Výtoň, který je pro vyšší průtoky velmi málo citlivý na pohyb dna i na vegetační období.
- Analýzu měrných profilů pomocí rekonstrukce historických povodni v úseku Vrané – Mělník by bylo vhodné rozšířit dále po proudu – se zahrnutím profilů Ústí n. Labem a Děčín. Takové analýzy by mohly potvrdit správnost výstupů této studie (korigované hydrogramy průtoků v limnografických stanicích, zpřesněné konzumční křivky, atd.) a rovně ověřit hypotézu „minimálního dna“ během středních a větších povodní v dalších úsecích.
- Studie pracovala s dostupnými terénními daty. V případě, že se některé výsledky při analýze rozliví či okamžiku přelití hrázi či PPO jeví jako neočekávané či dokonce nepravděpodobné, bude nutné nechat provést ověřovací zaměření terénu v dotyčném místě. Polohopisná i výškopisná přesnost použitých digitálních modelů terénu je omezena a u historických hrázi bylo často obtížné přesně zkonstruovat průběh celé linie hráze (včetně jejího zavázání do terénu) a nivelety její koruny.

V Praze dne 30.9.2015

Ing. Petr Sklenář


Ing. Petr Sklenář

Ing. Petr Jiřinec



DHI a.s.



Na Vrších 1490/5, 100 00 Praha 10
IČO 64 94 82 00, DIČ CZ64948200 ©

LITERATURA

- [1] Operační mapy rozlivu Vltavy a Berounky na území hl. města Prahy pro různé povodňové průtoky 2009. DHI a.s., Praha, březen 2010
- [2] Podklad pro aktualizaci záplavových území hl. města Prahy 2010. DHI a.s., Praha, květen 2010
- [3] Zpracování map povodňového nebezpečí a povodňových rizik; Vltava v úseku ř.km 0,0 až 69,8. DHI a.s., Praha, duben 2013
- [4] Tvorba map povodňového nebezpečí a povodňových rizik v oblasti povodí horního a středního Labe a uceleného úseku dolního Labe. DHI a.s., Praha, prosinec 2012
- [5] Matematický model pro simulaci hydrologických podmínek na Labi – povodňové průtoky. DHI a.s., Praha, prosinec 2011
- [6] Vyhodnocení povodně 8/2002. Povodňový model soutoku Labe a Vltavy. DHI Hydroinform a.s., Praha, říjen 2003
- [7] Vyhodnocení povodní 2013; závěrečná souhrnná zpráva. ČHMÚ, Praha, červen 2014
- [8] Posouzení vlivu inundačních území na soutocích významných toků na transformaci povodňové vlny v červnu 2013. DHI a.s., Praha, prosinec 2013
- [9] Doplnění Operačních map rozlivu Vltavy a Berounky na území hl. města Prahy o nižší povodňové průtoky 2011. DHI a.s., Praha, prosinec 2011
- [10] Prověření strategického řízení Vltavské kaskády – parametry manipulačního rádu. FSv ČVUT, Praha, prosinec 2014