

## 2 Pracovní postupy k vyhodnocení průtočných množství

Průtokový hydrogram povodňové vlny je klíčovým podkladem pro veškerá hodnocení, bilanční i statistické výpočty. Jeho správná konstrukce je však v případě extrémních povodní úlohou mnohdy složitější než všechny další navazující práce.

Od skončení povodňové situace probíhaly na všech pobočkách ČHMÚ, jejichž území bylo zasaženo povodní, intenzivní práce spojené s vyhodnocením povodňových průtoků. Jejich odvození bylo mimořádně obtížné, neboť na mnoha místech vodní stavy na tocích dosáhly maximálních hodnot za období pozorování, což bylo spojeno jednak s rozlivy toků doprovázenými často širokými záplavami, jednak významnými změnami morfologie řečišť i inundací. Navíc na několika místech došlo k totálnímu zničení vodoměrných stanic, a tím i ke zničení záznamů o vodních stavech, příp. v příznivějších případech chybí část záznamu. Ale i ve stanicích, kde je k dispozici průběh vodního stavu, bylo nutné ověřit hodnotu kulminačního stavu, protože k toku nebyl za povodně přístup a instalovaný přístroj mohl vykazovat v měření i významnou odchylku.

Dalším obecným problémem při vyhodnocování extrémní povodňové situace je, že obvykle nebývá k dispozici měrná křivka průtoků věrohodně extrapolovaná do oblastí vysokých vodních stavů na podkladě hydrometrických měření. Vzhledem k vysokým rychlostem, unášeným předmětům a často i nepřístupnosti měrného profilu za povodně nelze tato měření v mnoha případech vůbec provést. Měrnou křivku je proto za takové situace nutné extrapolovat pomocí jiných (složitějších) metod.

Aby bylo možné přistoupit k průtokovému vyhodnocení hydrogramu povodně ve vodoměrné stanici, bylo předtím nezbytné provést následující práce:

- ověřit kulminační vodní stav geodetickým zaměřením stop po maximální hladině,
- zkontrolovat záznam vodních stavů, popř. podle dostupných podkladů rekonstruovat hydrogram povodně ve vodních stavech,
- ověřit a případně extrapolovat měrnou křivku průtoků na základě zaměření příčných profilů a následného hydraulického posouzení.

Určitou komplikaci při sestrojování nových měrných křivek a následně i vyhodnocení průtoků srpnové povodně způsobil fakt, že prakticky celý podzim 2002 byly v tocích zvětšené průtoky, takže bylo obtížné provádět geodetická zaměření řečišť toků, a tudíž výsledky extrapolací měrných křivek z hydraulického modelování byly často dodávány s poměrně velkým zpožděním, což samozřejmě opozdilo i následné práce. Jinou komplikací jsou změny měrných křivek v profilech vodoměrných stanic v důsledku změn koryta způsobených průchodem povodně. Vlivem zmíněných trvalých vysokých vodních stavů nebylo proto možné tyto křivky proměřit v oblasti malých průtoků.

### 2.1 Terénní měření za povodně

Mezi základní činnosti hydrologů měřících v terénu za povodně patří úplná či neúplná měření průtoků hydrometrickou vrtulí (tj. standardní měření), měření povrchových rychlostí plováky a fixace maximální hladiny pomocí značek. Všechny tyto zmíněné činnosti hydrologové v ČHMÚ za povodně v srpnu 2002 zabezpečovali.

#### *Měření průtoků hydrometrickou vrtulí*

Jedná se standardní činnost ČHMÚ, která slouží k následné konstrukci či ověření měrné křivky průtoků. V době velkých povodní je často velice obtížné měření uskutečnit, a to

z důvodu velkých rychlostí proudění vody a zejména unášených předmětů, kdy přinejmenším hrozí ztráta měřicího zařízení. Většinou se proto měří na poklesových větvích povodňových vln, kdy řekou neplave již tolik splávy a větších předmětů. ČHMÚ je vybaven dvěma měřicími vozy (v Praze a v Brně), za jejichž využití je měření o něco snadnější. Tyto vozy byly v době povodně plně využity i pro měření mimo území poboček Praha a Brno.

V době od 7. do 23. srpna 2002 se na území poboček České Budějovice, Plzeň, Praha, Ústí nad Labem a Brno uskutečnilo celkem 130 měření průtoku hydrometrickou vrtulí, z toho bylo 128 úplných a 2 neúplná, kdy byly změřeny pouze povrchové rychlosti nebo jen část měrného profilu. Z těchto měření nutno upozornit zejména na měření Labe v Děčíně dne 19. srpna, kdy bylo za vodního stavu 743 cm naměřeno  $2\,180\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , což je s největší pravděpodobností historicky největší změřený průtok hydrometrickou vrtulí na území ČR. V několika profilech se podařilo změřit průtoky na úrovni 50–100letých vod (Římov na Malši, Heřmaň na Blanici, Frahelž na Lužnici, Vranov na Dyji, Znojmo na Dyji). Výsledky některých významných měření jsou uvedeny v tab. 2.1 a k nim příslušná dokumentace je archivována na pobočkách ČHMÚ.

Pro dodatečné ověření měrných křivek průtoků pro potřeby Projektu bude využit měřicí systém ADCP, který pracuje na principu ultrazvuku (Dopplerův efekt) a umožňuje provádět spolehlivá měření průtoku i v době povodní. Během srpnové povodně byl tento systém úspěšně využit např. na Labi v Drážďanech německou hydrologickou službou.

#### *Měření povrchových rychlostí plováky*

Jedná se o doplňkovou metodu, která se používá za situace, kdy nelze provést standardní měření průtoku hydrometrickou vrtulí. Princip spočívá v tom, že na trati o známé délce měříme čas, za který unášený předmět danou vzdálenost překoná. Bylo provedeno několik měření tohoto typu (např. ve Zbraslavi na Vltavě, na Berounce v Berouně).

Klíčová měření byla uskutečněna na Vltavě v Praze mezi Palackého a Jiráskovým mostem, a sice celkem čtyři měření ve dnech 14.–17. srpna 2002. Měření dne 14. srpna bylo provedeno těsně po kulminaci Vltavy v Praze, tzn., že bylo z hlediska vyhodnocení velikosti kulminačního průtoku Prahou asi nejvýznamnější. Tento den byla měřena rychlost již plovoucích předmětů v řece, v dalších dnech bylo využito připravených PET lahví zcela zaplněných vodou. Povrchová rychlost byla měřena celkem v pěti drahách (14. srpna ve třech drahách), takže lze konstatovat, že vždy bylo získáno určité rychlostní pole. V každé dráze bylo měřeno 2–6 předmětů a z vypočítaných hodnot byl v každé z drah odvozen průměr.

Příčné profily Vltavy z uvedené měrné trati byly získány z povodňového modelu Prahy, úroveň maximální hladiny zaměřili pracovníci ČHMÚ. Koeficient přepočtu mezi střední povrchovou a střední profilovou rychlostí byl získán ze standardního měření průtoku, které bylo uskutečněno na Jiráskově mostě dne 18. srpna a jeho hodnota 0,9 byla použita pro přepočtení střední povrchové rychlosti u všech čtyř provedených měření.

V tab. 2.2 jsou uvedeny výsledky všech měření mezi Palackého a Jiráskovým mostem na Vltavě v Praze ve dnech 14.–18. srpna 2002. Pomocí těchto údajů bylo možné extrapolovat měrnou křivku v profilu Praha-Chuchle až do kulminačního stavu povodně. Graf měrné křivky platné před povodní a nově zkonstruované křivky společně s výsledky měření je znázorněn na obr. 2.1.

#### *Fixace maximálních hladin povodně*

Fixace maximální hladiny povodně v různých profilech a její následné geodetické zaměření je velmi důležitou součástí vyhodnocení povodně. Slouží především k:

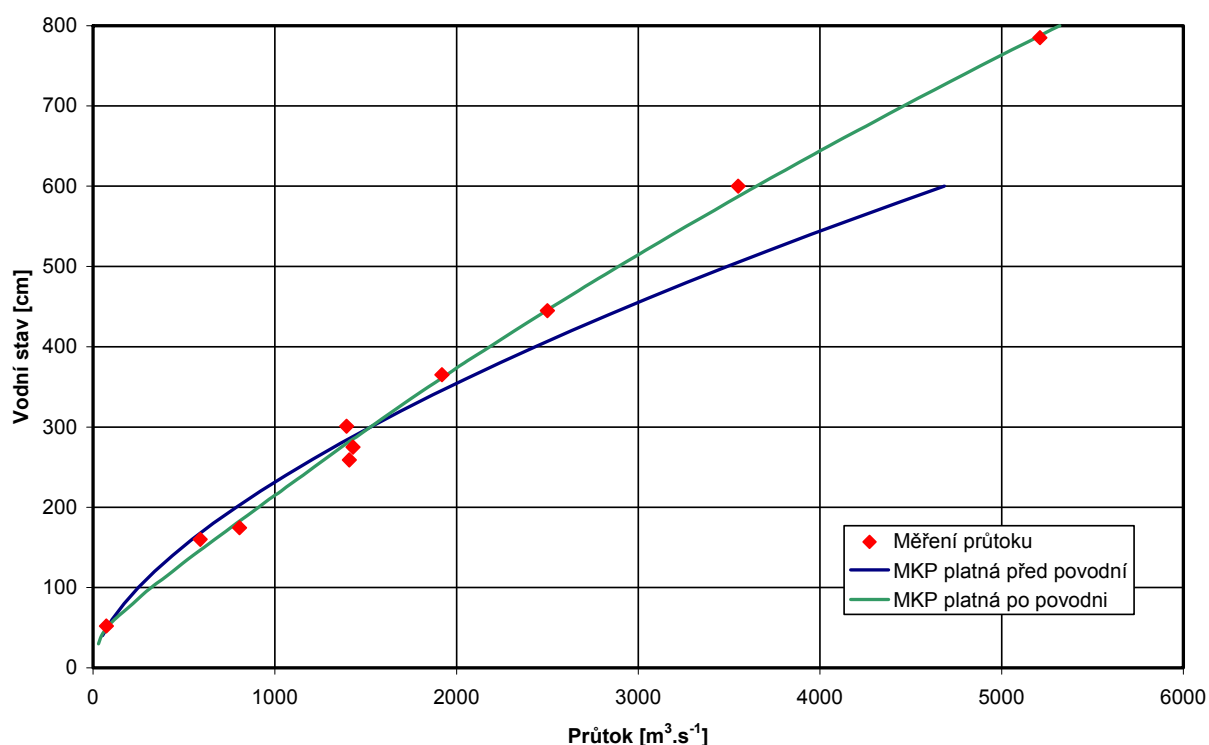
Tab. 2.1 Výsledky vybraných měření průtoku hydrometrickou vrtulí v srpnu 2002.

Datum	Stanice	Tok	Stav [cm]	Průtok [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Střední profilová rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]	Maximální profilová rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]
7. 8.	Líčov	Černá	217	39.8	1.79	2.64
7. 8.	Hracholusky	Zlatý potok	162	17.8	1.16	1.94
7. 8.	Kaplice	Malše	143	28.9	1.38	2.50
8. 8.	Nemětice	Volyňka	209	55.2	1.46	2.96
8. 8.	Římov	Malše	341	337	2.95	4.03
8. 8.	Podhradí	Dyje	318	161	1.37	2.01
9. 8.	Písek	Otava	454	394	1.75	2.66
9. 8.	Heřmaň	Blanice	244	152	1.71	2.75
9. 8.	Pilař	Lužnice	323	102	1.36	2.17
9. 8.	Mláka	Nové řeky	283	58.7	1.58	2.68
9. 8.	České Budějovice	Vltava	354	270	2.96	3.42
9. 8.	Praha – Libeňský most	Vltava	301	1395	1.72	2.41
10. 8.	Klenovice	Lužnice	268	129	1.09	2.13
10. 8.	Bechyně	Lužnice	285	121	1.42	1.85
10. 8.	České Budějovice	Malše	255	87	1.26	1.99
10. 8.	Heřmaň	Blanice	188	85.3	1.10	2.03
11. 8.	Klenovice	Lužnice	277	143	1.20	1.93
11. 8.	Ústí nad Labem	Labe	602	1391	1.81	2.27
12. 8.	Děčín	Labe	536	988	1.44	2.07
13. 8.	Hořovice	Červený potok	83	17.3	1.77	2.89
13. 8.	Vranov-Hamry	Dyje	226	152	1.20	1.75
13. 8.	Čenkov – Jince	Litavka	113	40.2	1.62	2.88
14. 8.	Zruč nad Sázavou	Sázava	400	177	1.44	2.28
14. 8.	Světlá nad Sázavou	Sázava	380	178	1.20	1.85
14. 8.	Josefodol	Sázavka	220	24.8	2.12	2.74
14. 8.	Vranov-Hamry	Dyje	373	356	2.01	3.51
14. 8.	Ptáčov	Jihlava	365	84.4	1.59	2.51
15. 8.	České Budějovice	Vltava	400	442	1.89	3.05
15. 8.	České Budějovice	Malše	349	153	1.30	2.16
15. 8.	Týnec nad Sázavou	Sázava	468	326	1.40	2.74
15. 8.	Znojmo	Dyje	334	191	1.40	2.21
15. 8.	Ladná	Dyje	407	316	1.11	2.09
15. 8.	České Údolí	Radbuza	235	55	1.42	1.82
15. 8.	Štěnovice	Úhlava	258	82	1.50	2.14
16. 8.	Vyšší Brod	Vltava	260	127	1.11	2.13
16. 8.	Týnec nad Sázavou	Sázava	322	212	1.38	2.26
16. 8.	Trávní Dvůr	Dyje	494	166	0.81	1.69
16. 8.	Stříbro	Mže	135	29.3	0.59	0.85
17. 8.	Liblín	Berounka	217	208	1.17	2.21
18. 8.	Hracholusky	Mže	212	51.3	1.43	1.87
18. 8.	Praha – Jiráskův most	Vltava	259	1410	1.25	1.62
19. 8.	České Budějovice	Vltava	213	136	1.62	2.82
19. 8.	Děčín	Labe	743	2180	2.09	2.96
20. 8.	Bechyně	Lužnice	337	175	1.58	2.10
20. 8.	Klenovice	Lužnice	298	180	1.04	1.96
22. 8.	Frahelž	Lužnice	79	81.7	1.67	2.69

Tab. 2.2 Výsledky měření na Vltavě mezi Palackého a Jiráskovým mostem. (1) vodní stav vztahený k vodočtu Praha-Chuchle, (2) maximální změřená povrchová rychlost, (3) střední povrchová rychlost, (4) střední profilová rychlost, (5) vodní stav a průtočná plocha vztahená k maximálnímu vodnímu stavu 785 cm ve 12:00, v době měření byl vodní stav na vodočtu v Praze-Chuchli cca 774 cm, (6) výsledná hodnota kulminačního průtoku v Praze-Chuchli  $5\,160\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  je dána matematickou optimalizací průběhu měrné křivky.

Datum	Čas [h]	$h^{(1)}$ [cm]	$v_{pmax}^{(2)}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$v_{ps}^{(3)}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$v_s^{(4)}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	S [m <sup>2</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Poznámka
14. 8.	15:30–16:30	785 <sup>(5)</sup>	3.28	2.73	2.46	2114 <sup>(5)</sup>	5210 <sup>(6)</sup>	plovoucí předměty
15. 8.	11:30–12:30	600	2.75	2.30	2.07	1720	3550	plováky
16. 8.	11:10–12:10	445	2.22	1.88	1.69	1480	2500	plováky
17. 8.	9:15–10:30	365	1.87	1.58	1.42	1350	1920	plováky
18. 8.	13:45–15:30	259	1.62	1.39	1.25	1124	1410	standardní měření

- dokumentaci maximální hladiny a jejímu porovnání se značkami historických povodní,
- stanovení rozlivu povodně a dokumentaci hloubek v záplavovém území při povodni,
- výpočtu podélného sklonu hladiny a následnému vyhodnocení průtoku pomocí hydraulického modelu,
- kontrole či rekonstrukci záznamu vodního stavu ve vodoměrných stanicích,
- odvození maximálních průtoků, zvláště v nepozorovaných profilech.



Obr. 2.1 Měrná křivka v profilu Praha-Chuchle platná před a po povodni a výsledky vybraných měření průtoku.

Během povodně i v době po skončení povodně prováděli pracovníci ČHMÚ fixaci maximální hladiny na mnoha místech v okolí vodoměrných stanic. Poloha maximální hladiny byla velmi důležitým (v některých případech i jediným) zdrojem informace pro následné vyhodnocení průtoků. Na fixaci a zaměřování stop povodně participovaly státní podniky Povodí a další organizace.

## **2.2 Zaměřování příčných profilů, rekonstrukce hydrogramů ve vodních stavech**

Po opadnutí vody v korytech bylo nutné fixované značky maximální hladiny zaměřit geodeticky, aby je bylo možné výškově mezi sebou porovnávat a stanovit např. podélný sklon hladiny pro pozdější uplatnění hydraulických výpočtů. Zaměřovány byly celé říční úseky, vždy s několika příčnými profily toku. Složitější postupy byly zadány externím geodetickým firmám a firmám zabývajícím se hydraulickým modelováním, jednodušší měření zabezpečil ČHMÚ.

Vzhledem k zaplavení několika vodoměrných stanic došlo k poruchám přístrojů, takže chybějící části hydrogramů bylo nutné rekonstruovat. Zaměření maximální hladiny často posloužilo právě k rekonstrukci vrcholové části hydrogramu povodně a doplňování dalších jeho segmentů ve fázích, kdy záznam automatického přístroje vykazoval odchylky od čtení na vodočetné lati.

## **2.3 Využití hydraulických modelů pro vyhodnocení kulminačních průtoků**

Hydraulické modelování poskytuje velmi cenné informace při vyhodnocení průtoků, neboť dává kvalifikovaný první odhad extrapolace měrné křivky za předpokladu, že není k dispozici přímé měření průtoků. Sofistikovanější dvojrozměrné modely mohou, za předpokladu kvalitních vstupů o výškách hladiny a kvalitního digitálního modelu terénu, poskytnout i další důležité informace, jako je přesnější odhad velikosti transformace povodně v inundaci, vzduť hladiny překážkou apod.

Pro účely vyhodnocení průtoků srpnové povodně bylo využito několik hydraulických modelů, od těch nejjednodušších, které využívají rutinně hydrologové v ČHMÚ, až po ty složitější, se kterými operují renomované firmy a instituce.

Pro odhad velikosti kulminačního průtoku a extrapolace měrné křivky průtoku ve vodoměrných stanicích na dolním Labi (Ústí nad Labem, Děčín, Hřensko) byl využit dvojrozměrný model MIKE21. Vzhledem k časově náročnému výpočtu bylo možné simulovat průchod jen částí vlny v oblasti maximálních průtoků. Zatím nebyl průtokově vyhodnocen úsek Labe z Mělníka do Ústí nad Labem, neboť v profilu limnigrafické stanice Mělník pro velkou složitost proudění (široké rozlivy, zpětné vzduť) nebylo možné vyhodnotit hydrogram v průtocích. Odvodit hydrogram povodně v tomto důležitém profilu bude možné po sestavení modelu soutokového uzlu Labe a Vltavy.

V dalších zhruba třiceti profilech vodoměrných stanic byly využity jednorozměrné modely (MIKE11, Hydrocheck, HEC-RAS).

## **2.4 Hydrologické přístupy pro sestavení výsledné měrné křivky průtoku**

Průtoky ve vodoměrných stanicích lze v naprosté většině případů zjišťovat jen nepřímou, prostřednictvím vztahu mezi výškou hladiny a odpovídajícím množstvím vody, které při určitém stavu měrným profilem protéká. V laboratorních podmínkách při ustáleném proudění bychom mohli tento vztah považovat za nelineární funkci. Vodoměrné stanice jsou však vybudovány v prostředí přirozených, více či méně upravených říčních koryt a proudění vody při průchodu povodňových vln není ustálené. Skutečný vztah mezi stavem a průtokem v daném profilu je tedy statistickou nelineární závislostí s určitou náhodnou složkou. V příslušném časově omezeném období bývá vyjádřena prostřednictvím měrné křivky profilu.

Konstrukce křivky spočívá v nalezení jejího optimálního tvaru a polohy v soustavě bodů, které reprezentují výsledky přímých měření průtoků. Tato měření jsou periodicky prováděna specializovanými pracovníky hydrologických oddělení ČHMÚ.

Z prostého důvodu převažujícího trvání normálních situací nad situacemi extrémními je největší počet měření proveden pro průtoky častěji se vyskytující, se zvyšující se extremitou průtoků počet měření rychle klesá. Měření ve velmi extrémních povodňových situacích je navíc mnohdy neproveditelné z důvodu nepřístupnosti měrného profilu nebo ohrožení bezpečnosti měřičů. Opěrných bodů v podobě změřených povodňových průtoků má tedy zpracovatel velmi málo a prakticky v každém profilu stojí před problémem extrapolace křivky mimo oblast měření. Aby se snížila nejistota extrapolace je nutné využít všech dalších dostupných relevantních informací.

Jelikož v kapitole 2.3 zmiňované hydraulické postupy při extrapolaci měrné křivky jsou obvykle zatíženy nejistotou vyplývající z nemožnosti exaktního určení některých parametrů modelu (zejména koeficientu drsnosti), je třeba takto získané měrné křivky dále ověřovat a upřesňovat pomocí bilance proteklého množství, srážkoodtokovými vztahy, vztahy mezi specifickým odtokem a plochou povodí, atd.

Optimální, ale velmi pracný postup je souběžné vyhodnocování průtoků v soustavě vodoměrných stanic, a to kombinací hydraulických postupů a podrobným bilančním zpracováním hydrogramů povodňových vln.

#### *2.4.1 Popis používaných přístupů*

Hydraulickými postupy je zde míněna nejen klasická konstrukce měrné křivky včetně její extrapolace, ale také nezávislé simulace proudění prostřednictvím hydraulických modelů nebo i prosté hydraulické výpočty průtoků, např. mostními otvory, které by správnost extrapolací měly potvrdit, nebo naopak zpochybnit.

Bilanční zpracování zjišťuje časovou bilanci mezi množstvím srážkové vody vypadlé na jednotlivá povodí vymezená vodoměrnými stanicemi a množstvím vody odtoklé z těchto povodí. Její podrobné řešení spočívá v časovém bilancování celé soustavy, tzn. všech dílčích povodí i mezipovodí odtokově kontrolovaných vodoměrnými stanicemi. Rozdílová čára hydrogramů z úseku toku vymezeného dvěma stanicemi představuje hydrogram přítoku z mezipovodí. Obdobně součtová čára hydrogramů dvou toků nad jejich soutokem a z mezipovodí by měla odpovídat hydrogramu stanice pod soutokem. Takto odvozené hydrogramy jsou kontrolním prvkem správnosti základních hydrogramů ve stanicích, protože i jejich tvar a velikost musí odpovídat reálné srážce a odtokové ztrátě pro odpovídající mezipovodí. Příklad takového srážkoodtokového vztahu pro vybraná povodí přítoků Vltavy nad VD Orlík je znázorněn na obr. 3.4 a komentován v kapitole 3.2.

Kombinace několika souběžně použitých metod zjištění průtoků nabývá na významu tím více, čím větší je odlehlost kulminační hladiny od největšího průtoků zjištěného přímým měřením, jinými slovy, čím větší je nejistota v extrapolaci měrné křivky. Právě extrémní povodně v srpnu 2002 jsou markantním případem, kdy takováto neurčitost měrné křivky průtoků existovala u většiny vodoměrných stanic v zasaženém území. Jejím zdrojem přitom byla nejen extrémní výška kulminačních vodních stavů v měrných profilech, ale i řada dalších okolností.

#### *2.4.2 Problémy a nejistoty při zpracování měrné křivky*

Závažným problémem, provázejícím průtokové vyhodnocení povodňových vln, je proměnlivost vztahu stav – průtok v čase, obecně známý jako nestabilita měrné křivky. Tento jev je obecnou vlastností měrných křivek u řady vodoměrných stanic i při normální vodnosti. Většinou se však nejedná o velké změny a významná není ani rychlost jejich vývoje. Za

povodní však tato nestabilita dosahuje podstatně větších rozměrů, a to tím více, čím je rozvodnění extrémnější. Jev má dvě základní příčiny. V první řadě je to známá, a v učebnicích popsaná, hystereze (nejednoznačnost) měrné křivky, způsobená neustálým prouděním při průchodu povodňové vlny. Při stoupání hladiny před kulminací vlny protéká voda profilem při větším sklonu hladiny než za ustáleného proudění. Větší sklon, a tedy větší energie, proudu má za následek větší průtok než ten, který by odpovídal stejnému stavu na vodočtu za ustálených podmínek. Na poklesové větvi povodňové vlny je tomu naopak. Odchyly průtoku, způsobené touto hysterezí, dosahují např. v podmínkách jihočeských toků velikosti v řádu jednotek procent ustáleného průtoku. Jejich identifikace při standardní přesnosti přímých měření je proto obtížná, až neproveditelná. Kombinací systematického vlivu hystereze a náhodné chyby měření tak dochází v konečném důsledku ke zvětšení rozptylu měření.

Podstatně horší okolností je nestabilita způsobená morfologickými změnami říčního koryta, a to nejen přímo ve vodoměrném profilu, ale i v celém úseku toku, který průtočnost měrného profilu hydraulicky ovlivňuje. Následná deformace vztahu stav – průtok se děje mnohem chaotičtěji než poměrně snadno popsatelné ovlivnění dynamickou hysterezí. Změny průtočné kapacity průchodem extrémních srpnových vln dosahovaly až desítek procent původní kapacity, a to směrem k vyšším i nižším průtokům podle toho, v jakém profilu a jakém stádiu eroze či sedimentace porovnání provádíme. K tomu je třeba připočítat ještě nahodilé vlivy, jako např. omezení průtočnosti padlými stromy, opětovné zvýšení kapacity po jejich odstranění a další eventuality. Uvedené komplikace vysvětlují, proč při vyčíslení průtoku extrémní povodňové vlny zpravidla není možné vystačit s jedinou variantou měrné křivky.

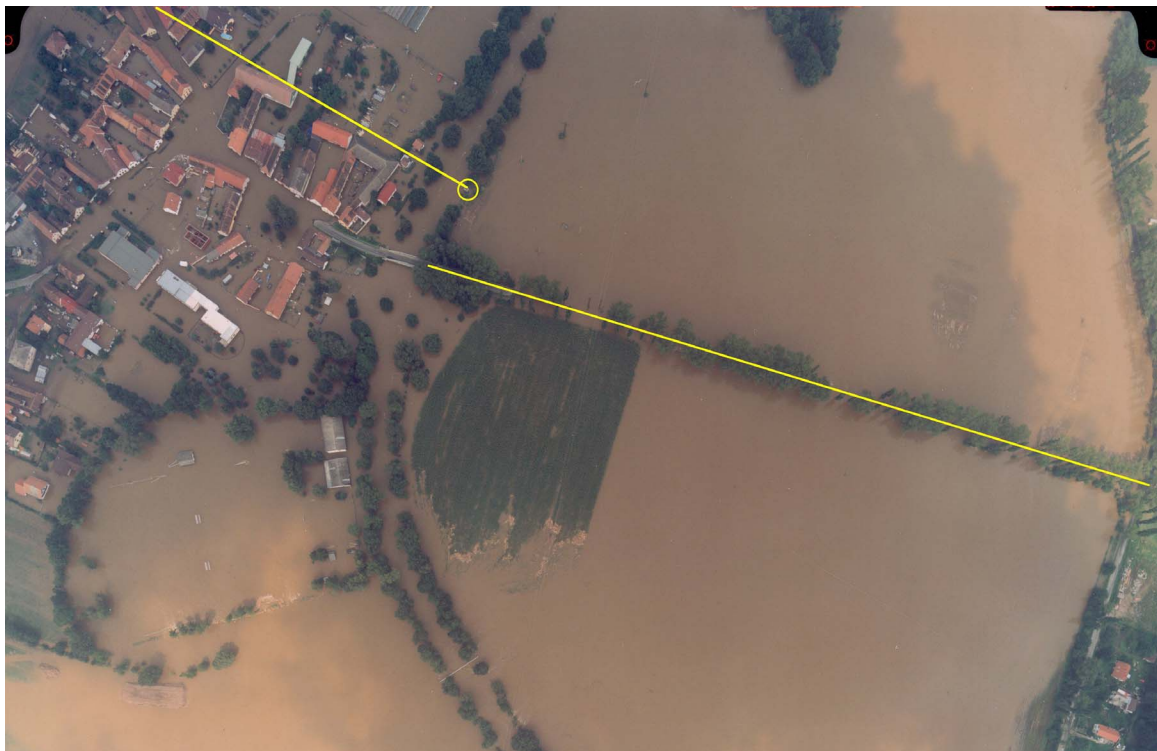
Velmi nepříjemnou komplikací pro zpracovatele měrných křivek bylo významné zpětné vzduť hladin některých úseků toků. Jednalo se hlavně o toky ústící do nádrže vodního díla Orlík, kde zpětné vzduť zasáhlo velmi výrazně dvě vodoměrné stanice – Písek na Otavě a Bechyni na Lužnici. Že tomu tak skutečně bylo, je evidentní již z pouhého porovnání kulminační kóty hladiny u hráze Orlíku s kótami vodočtů jmenovaných stanic. Kóta maximální hladiny vody v nádrži dosáhla 14. srpna v ranních hodinách úrovně 119 cm vodočtu v Písku a 102 cm vodočtu v Bechyni. Hladina Otavy v Písku kulminovala 13. srpna, ovlivnění vzduť tím tedy postihlo Písek zejména v době kolem kulminace a na sestupné větvi povodňové vlny. Jiný byl charakter povodně na dolní Lužnici, kde vlna v Bechyni kulminovala až 16. srpna, ovlivnění vzduť tím tedy projevilo zejména na její vzestupné větvi. V Písku bylo vzduť ovlivněno i vůbec nejvyšší měření průtoku v historii stanice dne 9. srpna. Extrapolaci s jeho využitím lze proto pokládat za částečně „vzduť“ měrnou křivku, vystihující zmenšení průtoku zpětným vzduť. Hydrogram povodňové vlny na sestupné větvi byl proto ještě dále upraven v souladu s vrcholícím vzduť. Obdobně byla upravena vzestupná větev hydrogramu v Bechyni. Uvedené skutečnosti budou ještě ověřovány pomocí modelu v rámci III. etapy Projektu.

Zcela samostatnou kapitolu tvoří hydraulické problémy vyvolané destrukcí bočních hrází. Nejvýraznějším příkladem je oblast kolem obce Majdalena, kde řeka Lužnice po protržení hrází v pískovných opustila původní koryto a vracela se do něj až pod vodoměrnou stanicí v Pilaři. V úseku Lužnice po odbočení jejího hlavního proudu do Nové řeky, vybudované Jakubem Krčínem pro odlehčení Rožmberku od povodňových průtoků, došlo k rozsáhlé destrukci její levostranné hráze. Veškerý povodňový průtok se pak vracel do starého koryta Lužnice, v plném rozsahu naplnil největší český rybník Rožmberk a ohrožoval stabilitu jeho hráze. Stanicí Mláka na Nové řece, díky jejímu umístění až pod místem protržení, protékala pouze menší část průtoku, stanice Frahelž pod Rožmberkem se naopak ocitla uprostřed rozsáhlé záplavy v lužním lese, takže průtokové vyhodnocení je na samé hranici možné použitelnosti. Jedná se tak o další výjimečnou komplikaci v rámci již tak výjimečné povodně.

Při návrhu měrných křivek pro takto mimořádný výškový rozsah použití se musíme vyrovnat s problémem, jakou část proudění z celého povodňového řečiště vystihují hydrometrická měření, ze kterých konstrukce měrné křivky vychází. V praxi se u většiny stanic setkáváme s příčným profilem složeným ze dvou lichoběžníků, tvořeným kynetou a bermami. Výškové pásmo, ve kterém voda vybřežuje z kynety a zaplavuje bermu, je prvním základním předělem mezi dvěma oblastmi různé strmosti měrné křivky. Je také zdrojem nestability, protože různé vegetační fáze a různá hustota vegetačního pokryvu v bermách mohou tuto přechodovou oblast různě výškově posouvat. V mnoha případech existuje i druhý předěl, a to v oblasti, kdy se voda začne rozlévat do říční nivy a proudit v ní.

Srpnová povodeň tyto problémy zpracovatelů měrných křivek ještě o řád umocnila. Šíře upravených koryt, např. u jihočeských řek, se pohybuje v řádu desítek metrů, ve vodoměrných profilech v jihočeských pánvích však došlo k rozlivům o šířkách až stovky metrů, tedy o řád vyšším. Měřítka problému nehomogenity mezi kynetou a bermami se tak stalo o řád menším, a v podstatě zanedbatelným, v porovnání s nehomogenitami přechodu z koryta řeky do volné krajiny či intravilánu měst.

Typickými příklady mohou být stanice Heřmaň na Blanici nebo Roudné na Malši, kde rozlivy dosáhly šíře bezmála 1 km (viz obr. 2.2), zatímco šíře vlastního koryta řeky (kyneta + bermu) se pohybuje kolem 50 m. Na rozdíl od řešení průtoků v bermách, které jsou pro převod velkých vod konstruovány, nabývá v řešení kapacity rozsáhlých rozlivů podstatného významu posouzení, v kterých částech voda proudí, tj. jejich průtočné aktivity. Velká část rozlivů ve volné krajině bývá průtokově pasivní, k čemuž kromě přirozeně ploché konfigurace terénu značně přispívají četné liniové stavby (železniční a silniční násypy) orientované zpravidla víceméně kolmo na údolnici a spolehlivě fungující jako vzdouvací objekty. Ve městech je příčinou pasivity rozlivů zástavba, která rozděluje protékající proud do mnoha ramen, jejichž průtočná aktivita závisí na spádových poměrech a směrové orientaci jednotlivých ulic vůči vodoměrnému profilu. Při vyhodnocování jsou pak vedle terénní rekognoskace neocenitelným zdrojem informací letecké snímky pořízené v době blízké kulminaci povodňové vlny.



*Obr. 2.2 Letecký snímek povodňové záplavy na Malši u Roudného z 8. srpna 2002, čas přibližně 12:00; kroužkem označeno umístění vodoměrné stanice. Čáry představují geodeticky zaměřený příčný profil.*

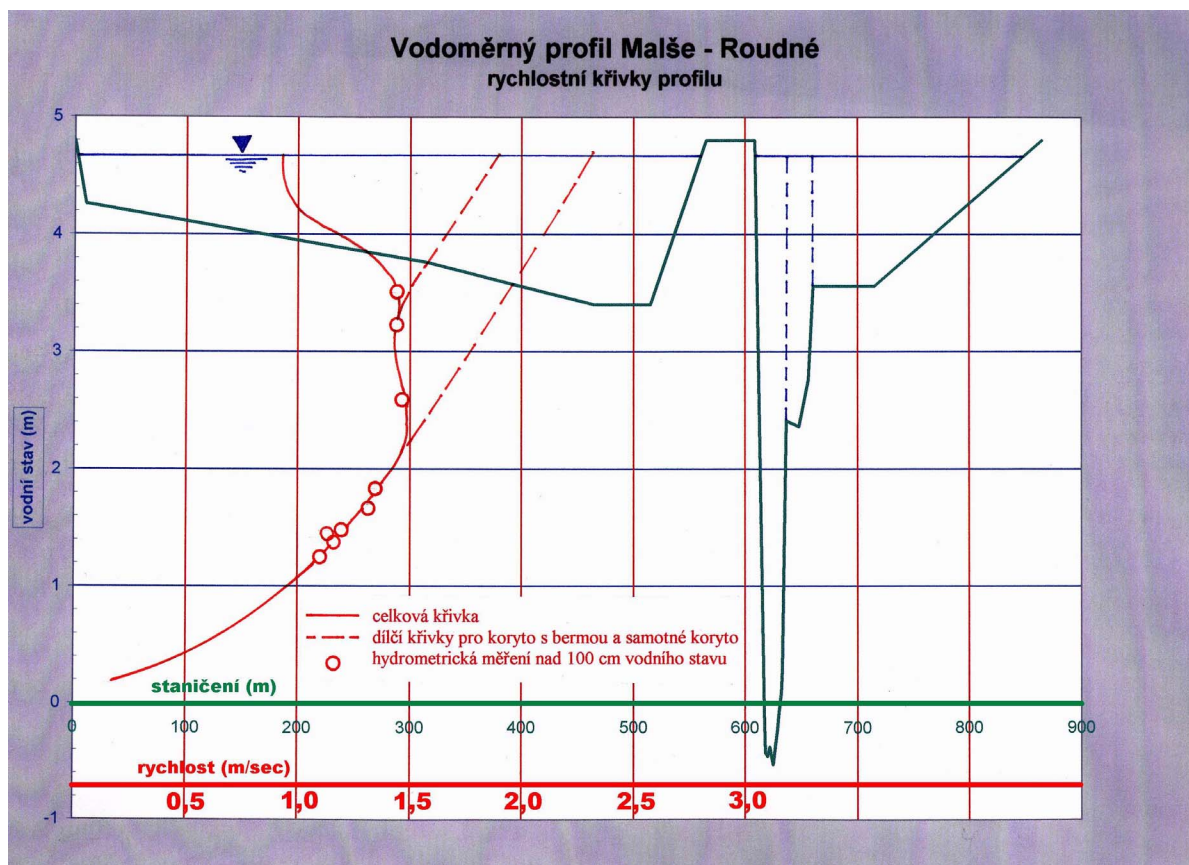


#### 2.4.3 Příklad – extrapolace měrné křivky na Malši v profilu Roudné

Příkladem složitosti řešení měrné křivky a kombinace postupů může být stanice Roudné na Malši. Jedná se o závěrovou stanici, která ve vzdálenosti cca 3 km od hranice městské zástavby monitoruje průtoky Malše nad Českými Budějovicemi a soutokem s Vltavou. Vodoměrný profil je tvořen korytem lichoběžníkového průřezu šíře 25 m a nepříliš kapacitní levostrannou bermou šíře zhruba 20 m. Vlastní koryto do stavu cca 250 cm je schopno převádět maximálně 2letý průtok, poté vybřežuje do bermy, kdy za stavu kolem 350 cm má kapacitu zhruba  $160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , což je 5letý průtok. Další zvětšování průtoků má za následek oboustranné vybřežení, na levém břehu dochází k postupnému zaplavení intravilánu obce Roudné, na pravém břehu po zaplavení pole se vytváří rozlehlé mělké jezero, jehož břeh se v době kulminace dne 13. srpna nacházel ve vzdálenosti 620 m od zaplavené limnigrafické budky.

Povodňová vlna v Roudném kulminovala dne 13. 8. za stavu 465 cm. Dva dny po kulminaci povodňové vlny bylo provedeno hydrometrické měření, kdy za stavu 348 cm byl změřen průtok  $153 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , což je maximální změřený průtok v historii pozorování vodoměrné stanice Roudné. Pouhá dvě procenta odchylky od údaje z používané měrné křivky potvrdila její platnost. Výsledek patří do skupiny měření, která charakterizují průtočnost profilu vlastního koryta, včetně levostranné bermy, avšak pod úrovní 350 cm, vymezující počátek totálního vybřežování. Operativní stanovení kulminačního průtoků v hodnotě  $527 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  vycházelo z této měrné křivky, jejíž extrapolace nad stavem 350 cm byla opřena jen o hrubý odhad průtočnosti rozlehlých inundačních prostor. Později provedené zpracování podrobné bilance povodňových vln signalizovalo, že velikost kulminačního průtoků je podceněna. Analýza leteckého snímku zátopy (obr. 2.2), rekognoskace terénu a porovnání s mapou 1:5 000 ukázaly, že příčina podcenění spočívala v poddimenzování odhadu možného rozsahu zátopy. Letecké snímky pomohly upřesnit horizontální rozsah hladiny ve velmi plochém území, terénní průzkum pak vertikální rozsah (kóta kulminační hladiny v korytě a odlehlé inundaci nebývá totožná). Nově provedená schematizace příčného profilu ve výškovém pásmu rozlivu potvrdila oprávněnost bilančního požadavku na zvýšení kulminačního průtoků, a bylo proto přikročeno k nové extrapolaci měrné křivky profilu.

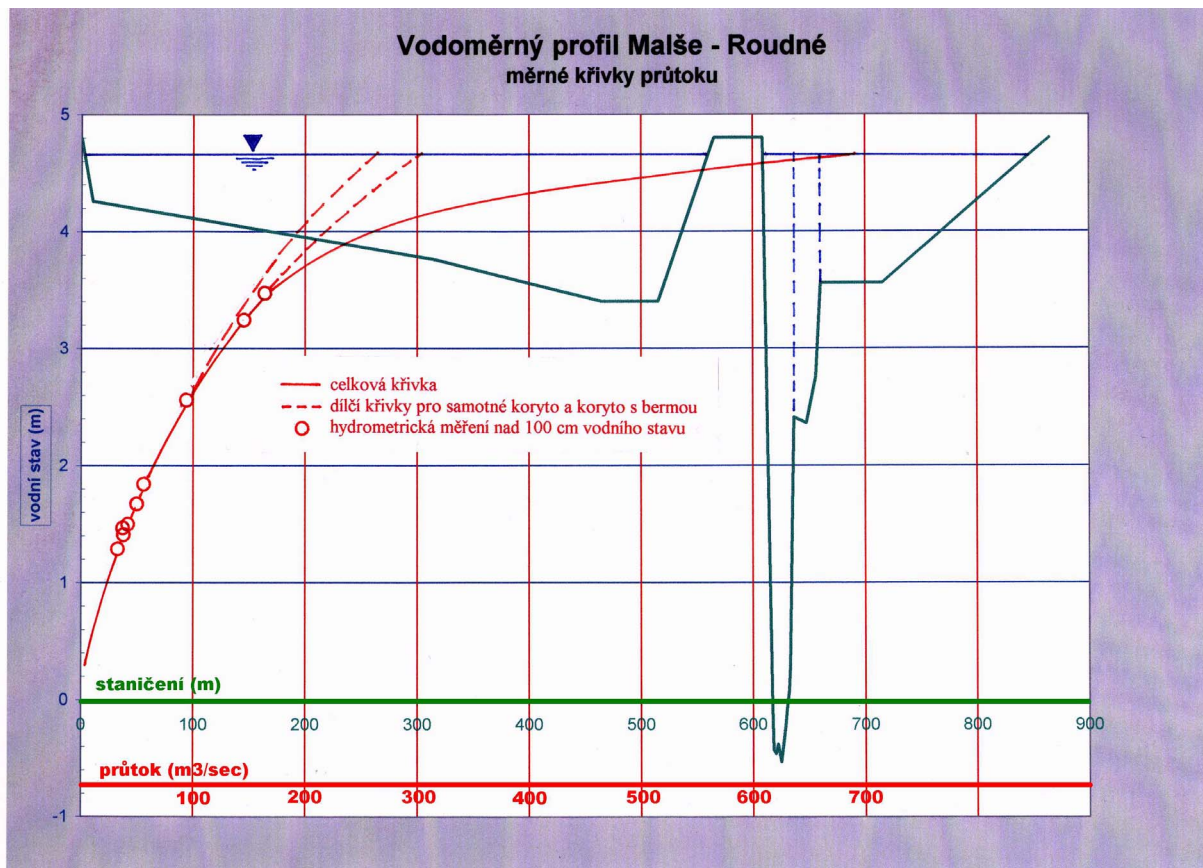
Extrapolace rychlostní křivky profilu zůstala nezměněna (viz obr. 2.3), její platnost je však vztažena pouze na část průtoků s nejvyššími rychlostmi proudu soustředěnou v koridoru kynety a levostranné bermy. V celkovém měřítku ji lze považovat za homogenní, avšak při podrobnějším pohledu lze v poli změřených bodů rozlišit nehomogenitu logicky vyplývající ze zapojení bermy, neboť tři nejvyšší měření již průtok bermou zahrnují. Poměrně spolehlivě tak bylo možné extrapolovat průměrnou profilovou rychlost pro vlastní koryto (kynetu a nad ní hypoteticky vertikálně vymezený koridor až ke kulminační hladině) v hodnotě  $2,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  v kulminaci (obr. 2.3). Extrapolace je téměř lineární, protože na rozdíl od extrapolace v reálném korytě je zde nižší tření vlivem rozhraní mezi rychleji a pomaleji proudící vodou. Z trendu třech nejvyšších měření pak byl proveden odborný odhad průměrné rychlosti pro průtočný koridor koryta rozšířený o levostrannou bermu v hodnotě  $1,90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (obr. 2.3). V tomto bodě skončila možnost dalších extrapolací, neboť žádné z hydrometrických měření neposkytovalo sebemenší informaci o možných rychlostech ve výše položených rozlivech. Byl vypočten kulminační průtok odpovídající korytu a levostranné bermě, jeho velikost byla porovnána s bilančním požadavkem a rozdíl přisouzen průtočnosti aktivní plochy rozlivů. Zpětným výpočtem pak byla zjištěna průměrná profilová rychlost v rozlivu při kulminaci v hodnotě  $0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 2.3 Příčný profil a graf průběhu středních rychlostí v profilu stanice Roudné na Malši.

Reálnost takto provedených odhadů profilových rychlostí byla následně ověřena výpočtem součinitele drsnosti z Manningovy formy Chézyho rovnice. Pro všechny výpočty byla použita jednotná velikost sklonu hladiny 1,5 promile odpovídající sklonu dna řeky v posuzovaném úseku. Manningův součinitel drsnosti pro díličí extrapolace a odhady kulminačních průtoků byl vypočten pro samotné koryto v hodnotě 0,039, pro koryto s bermou 0,042, pro celkový rozliv mimo koryto v hodnotě 0,049. Výpočet součinitele drsnosti je jen hrubým ověřením přijatelnosti postupu, jeho velikost je provázána s přesným určením odpovídajícího sklonu hladiny a je nejproblematictější veličinou hydraulických výpočtů. Hodnota pro koryto se jeví jako přijatelná, hodnota pro rozliv se zdá být nízká, odpovídá poněkud velké rychlosti neobvyklé pro rozlehlý rozliv. Lze ji však vysvětlit tím, že největší část aktivní průřezové plochy rozlivu je vymezena příčně vedenou asfaltovou silnicí na nízkém náspu, tvořícím ponořený práh s hydraulicky hladkou korunou délky 600 m, orientovaný kolmo na směr proudění. Kombinovaný postup extrapolace, odhadu a podrobné bilance dovedl zpracovatele k opravě extrapolovaného úseku měrné křivky a kulminačního průtoku, jehož konečná podoba má hodnotu  $695 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Výsledná měrná křivka průtoku v profilu Roudné je na obrázku 2.4.

Nezávisle na zpracování v ČHMÚ byla úloha zjištění kulminačního průtoku zadána ČVUT ke zpracování pomocí jednorozměrného (1D) hydraulického modelu. Pro řešení modelem byla vybrána říční trať v sevřenějším úseku trasy Malše u obce Plav, cca 7 km proti proudu nad profilem stanice Roudné. Výsledkem modelového řešení je kulminační průtok  $680 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (s rozpětím možné chyby simulace plus minus 6 procent), což je shoda s postupem ČHMÚ více než dobrá.



Obr. 2.4 Příčný profil a graf průběhu výsledné měrné křivky průtoků v profilu stanice Roudné na Malši.

Smyslem této kapitoly bylo dokumentovat složitost a náročnost stanovení průtoku v řece za extrémních povodní. Zároveň to zdůvodňuje a opodstatňuje skutečnost, že hodnoty průtoků uváděné v prvních zprávách o povodni byly vždy označovány jako „předběžné“.

