

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

Ing. Aleš Havlík, CSc.

**Metodika odhadu kulminačního průtoku při povodňových průtocích
pomocí hydraulických výpočetních postupů**

**Method of the estimating of the peak flow rate during floods using the
hydraulic calculation procedures**

Summary

The lecture gives account of the problems that we often face when evaluating important flood events and we have to determine the culmination flow rate. The work gives a list of possibilities of how to determine that flow rate using the hydraulic calculation procedures.

The simplest method of uniform flow does not provide very exact results of the estimate of the maximum flow rate, its use is recommended mainly when assessing outstanding historical floods for which we do not possess a sufficient number of trustworthy data. By means of this procedure it is possible to obtain at least the degree estimate of the size.

The use of the method of nonuniform flow allows to carry out the estimating of the peak flow rate much more precisely. Various options of application are described in the lecture.

With the methods based on the calculation of the overflow rate the cases of the high flooding by the bottom water have to be carefully considered, which is a common phenomenon at weirs during important floods.

When applying the calculation of the flow rate through the bridge we stress the issue of the cross slope of the water level near the bridge. This can substantially influence the course of the traces after the culmination water level.

The essential part of the lecture deals with the traces after the culmination water level. Without these data we usually can't succeed in estimating the culmination flow rate. There can be two types of the traces after the culmination water level – line and point ones. Great attention is paid mainly to the trustworthiness of these data.

Problems that we can encounter when evaluating are shown on the case of the faulty evaluation of the culmination flow rate of Lomnice River near the village of Ostrovec.

The concluding part of the lecture is devoted to the analysis of the individual parameters for the accuracy of determining the estimate of the culmination flow rate.

Souhrn

Přednáška přináší výčet problémů, proč při vyhodnocení významných povodňových situací často stojíme před problémem určení kulminačního průtoku. Práce ukazuje možnosti jak tento průtok stanovit s využitím hydraulických výpočetních postupů.

Nejjednodušší metoda rovnoměrného proudění nepřináší příliš přesné výsledky odhadu maximálního průtoku, její využití se doporučuje v především v případech vyhodnocení mimořádně závažných historických povodní, pro které nemáme dostatek věrohodných údajů. Pomocí tohoto postupu je možné získat alespoň řádový odhad velikosti.

Použití metody nerovnoměrného proudění dovoluje provést odhad kulminačního průtoku s podstatně větší přesností. V přednášce jsou ukázány různé možnosti aplikace.

U metod založených za výpočtu proudění přepadem je třeba věnovat zvýšenou pozornost případům vysokého stupně zatopení dolní vodou, což je za významných povodní v případě jezových objektů běžný jev.

Při aplikaci výpočtu proudění mostním objektem se zdůrazňuje problematika příčného sklonu hladiny v okolí mostních objektů. Tento jev může významným způsobem ovlivnit průběh stop po kulminační hladině.

Zásadní část přednášky se zabývá otázkou stop po kulminační hladině. Bez těchto údajů se zpravidla nepodaří odhad kulminačního průtoku provést. Stopy po kulminační hladině mohou být dvojího typu – liniové a bodové. Velká pozornost je zaměřena hlavně na otázku věrohodnosti těchto údajů.

Problémy, se kterými se při vyhodnocení můžeme setkat, jsou ukázány na příkladu chybného vyhodnocení kulminačního průtoku na řece Lomnici v okolí obce Ostrovec.

Závěrečná část přednášky je věnována rozboru jednotlivých parametrů na přesnost stanovení odhadu kulminačního průtoku.

Klíčová slova

kulminační průtok, rovnoměrné proudění, nerovnoměrné proudění

Key words

culmination flow rate, uniform flow, nonuniform flow

Obsah

1. Potřeba stanovení velikosti kulminačního průtoku při povodni	6
2. Odhad kulminačního průtoku pomocí výpočtu rovnoměrného proudění	7
3. Odhad kulminačního průtoku pomocí výpočtu nerovnoměrného proudění	8
4. Odhad kulminačního průtoku výpočtem průtoku přepadem	9
5. Odhad kulminačního průtoku výpočtem průtoku mostním objektem	10
6. Věrohodnost zaměřených stop po kulminační hladině	12
7. Použití matematických modelů	14
8. Rozbor problémů při vyhodnocování kulminačních průtoků na praktickém příkladě měrné tratě Ostrovec na Lomnici	15
9. Význam jednotlivých parametrů na přesnost odhadu	18
10. Metodická doporučení pro vyhodnocení kulminačních průtoků výpočtem nerovnoměrného proudění	19
Seznam použité literatury	21
Ing. Aleš Havlík, CSc. – životopis	23

1. Potřeba stanovení velikosti kulminačního průtoku při povodni

V posledním období zasáhla naše území celá řada mimořádně rozsáhlých povodňových situací. Praktické zkušenosti při jejich vyhodnocení ukázaly, že je potřeba se podrobně zabývat metodikou vyhodnocení kulminačních průtoků pomocí hydraulických výpočetních postupů. Důvodu je několik :

- poškození či destrukce objektu limnigrafické stanice (Obr.1),
- přerušení funkce limnigrafické stanice z různých důvodů,
- výskyt extrémní povodňové situace na toku, kde nebyla vybudována limnigrafická ani vodočetná stanice,
- překročení maximální měřitelné hladiny (hladina nad maximem vodočtu, hladina nad maximální možnou polohou plováku limnigrafu – Obr.1.),
- extrapolace měrné křivky do oblasti extrémních vodních stavů není věrohodná.



Obr.1. – Poškozené a zatopené limnigrafické stanice ČHMÚ v průběhu povodně v srpnu 2002

Při potřebě stanovení kulminačního průtoku za povodňové situace není možné pro všechny lokality nalézt jednoznačnou metodiku přístupu. Pro každý případ se hodí různé možnosti v závislosti na morfologii koryta i terénu inundace, předpokládanému či pozorovanému charakteru proudění, výskytu objektů na toku a na řadě dalších parametrů. Z hydraulického hlediska je možné využít především následujících metod či postupů :

- odhad kulminačního průtoku pomocí metody řešící rovnoměrné proudění,
- odhad kulminačního průtoku pomocí metody řešící nerovnoměrné proudění,
- odhad kulminačního průtoku pomocí výpočtu přepadu přes jezové těleso nebo přes bezpečností přelivy vodních děl,
- odhad kulminačního průtoku pomocí výpočtu proudění mostním objektem.

V další části si popíšeme, jak je možné uvedené postupy využít, jaké podklady jsou nezbytné, jaké podmínky musí být splněny a hlavně s jakou přesností můžeme počítat. Dále si popíšeme, jaká data je nutné zajistit a jakým způsobem můžeme odhad zpřesnit.

2. Odhad kulminačního průtoku pomocí výpočtu rovnoměrného proudění

Stanovení odhadu kulminačního průtoku pomocí hydraulického výpočtu rovnoměrného proudění je nejjednodušší metodou, ale také poměrně nepřesnou. Pro jistotu si zopakujme, že nutnou podmínkou rovnoměrného proudění v úseku je prizmatické koryto s konstantním sklonem dna a odpory koryta. Proudění musí být na čase nezávislé, jeho hladina musí být rovnoběžná se sklonem dna. Splnění všech těchto podmínek při hledání měrné tratě je velmi těžké. V podstatě jedinou možností jsou upravená koryta, která relativně splňují podmínku prizmatického koryta s jednotným sklonem dna i neměnnými odpory, a to pro případ, kdy byl kulminační průtok menší než návrhový. To se však při extrémních povodních zpravidla splnit nepodaří.

Výpočet vychází ze známé rovnice Chezyho respektive z jejího tvaru rozšířeného tvaru.

$$Q = C \cdot S \cdot \sqrt{R \cdot i_e}$$

Z této rovnice nám vyplývají potřebné veličiny, které musíme zajistit. Pro výpočet je nebytné zajistit podklady, abychom mohli vyčíslit velikost průtočného profilu S , Chezyho rychlostního součinitele C , hydraulického poloměru R a sklonu čáry energie i_e .

Po výběru vhodného úseku, který splňuje předchozí podmínky, stačí zaměřit příčný profil upraveného koryta, z něhož odvodíme veličiny S i R na základě zaměřené stopy po maximální hladině. K výpočtu Chezyho součinitele je nezbytné odhadnout i součinitel drsnosti n . Největší problém je se stanovením sklonu čáry energie.

Vzhledem k výrazně přesnější metodě odhadu kulminačního průtoku pomocí výpočtu průběhu hladiny nerovnoměrného proudění se její použití při vyhodnocování současných povodní nedoporučuje. Metoda však může najít uplatnění především v případě analýzy mimořádně extrémních historických povodní, jejichž průběh bývá často popsán v historických kronikách a podobných materiálech. V takovém případě může tento postup vést alespoň k přibližnému odhadu maximálního průtoku.

3. Odhad kulminačního průtoku pomocí výpočtu nerovnoměrného proudění

Aplikace této metody spočívá v nalezení vhodné měrné tratě a stop po kulminační hladině. Vlastní číselný odhad velikosti kulminačního průtoku pomocí metody nerovnoměrného proudění je možné provést 2 odlišnými způsoby :

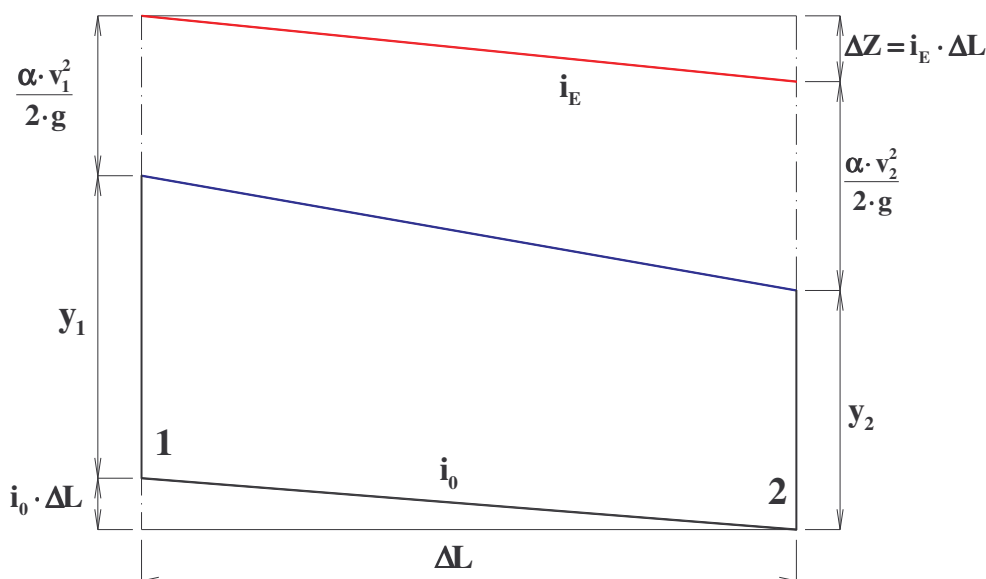
- Přímý výpočet průtoku mezi 2 sousedními profily ze zaměřených profilů a úrovní stop po kulminační hladině,
- simulace průběhu hladin v úseku měrné tratě a hledání takového průtoku, pro který průběh hladin nejlépe kopíruje průběh zaměřených stop.

Rozeberme si nyní obě metody. V případě první z metod je možné vypočítat průtok po úpravě rovnice (1.72.) za předpokladu, že se neuvažují místní ztráty.

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta y}{\left(\frac{\alpha}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} \right) + \frac{\Delta L}{K_p^2} \right)}}$$

Pro zaměřené příčné profily včetně úrovně kulminační hladiny v každém z nich je možné stanovit potřebné geometrické parametry obou profilů S_1 , O_1 , R_1 respektive S_2 , O_2 , R_2 . Na jejich základě po odhadu součinitele drsnosti úseku n není problém určit hodnotu průměrného modulu průtoku v úseku K_p a hledaný průtok je možné určit bez iteračního postupu.

Druhý postup předpokládá klasický výpočet průběhu hladiny v úseku měrné tratě v zaměřených příčných profilech dle metody po úsecích (Obr. 2), která je založena na aplikaci Bernoulliho rovnice.



Obr. 2. – Schéma podélného profilu při výpočtu nerovnoměrného proudění
Ta je popsána následující rovnicí

$$i_0 \cdot \Delta L + y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + i_E \cdot \Delta L + \zeta \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right)$$

V rovnici má i_0 význam sklonu dna, i_E sklonu čáry energie, ΔL je vzdálenost mezi profily, y_1 a y_2 hloubky proudu v horním a dolním profilu, v_1 , v_2 jsou průřezové rychlosti v horním a dolním profilu, α bezrozměrné Coriolisovo číslo a konečně ζ součinitel místní ztráty vlivem náhlého rozšíření či zúžení. Za předpokladu malých změn mezi 2 sousedními profily můžeme změny hydraulických veličin v podélném směru považovat za tak malé, že lze jejich hodnoty zprůměrovat, v takovém případě lze pro výpočet sklonu čáry energie použít rovnici pro výpočet rovnoměrného proudění.

$$i_E = \frac{Q^2}{C_p^2 \cdot S_p^2 \cdot R_p}$$

Nutnou podmínku pro zahájení řešení je znalost dolní okrajové podmínky za předpokladu říčního proudění – tou je úroveň hladiny v dolním profilu. Do průběhu vlastního výpočtu nerovnoměrného proudění nevstupují žádné hodnoty zaznamenaných stop po kulminační hladině. Výpočet průběhu hladin je potřeba postupně provést pro celou škálu průtoků. Tyto průběhy jsou následně porovnány s průběhem zaměřených stop. Za odhad kulminačního průtoku je potom vybrán takový průtok, při kterém simulovaný průběh hladiny nejpřesněji kopíruje průběh zaměřených stop.

Metodická doporučení pro výběr vhodné měrné tratě a její rozsah stejně jako přednosti obou postupů jsou uvedeny v poslední kapitole.

4. Odhad kulminačního průtoku výpočtem průtoku přepadem

Aplikace tohoto výpočtového vychází z využití rovnice průtoku přepadem

$$Q = \sigma_z \cdot m \cdot b_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_0^{1.5}$$

V rovnici má σ_z význam součinitele zatopení, m součinitele přepadu, b_0 účinné šířky přelivné hrany, h_0 energetické výšky přepadového paprsku. Použití postupu je vhodné rozdělit na 2 případy :

- výpočet průtoku přepadem přes bezpečnostní přelivy vodních děl,
- výpočet přepadu přes přelivnou hranu jezových objektů na vodních tocích.

Zatímco v prvním případě se jedná vždy o dokonalý přepad, v druhém tomu bývá zpravidla naopak. V řadě případů dokonce můžeme hovořit o velmi vysoké míře zatopení dolní vodou.

Dle prvního z případů můžeme ze všech možností, které jsou v této práci popisovány, dospět ke stanovení nejpřesnějších odhadů kulminačního průtoku. Především za mimořádně extrémních průtoků je však nutné věnovat zvýšenou pozornost následujícím skutečnostem :

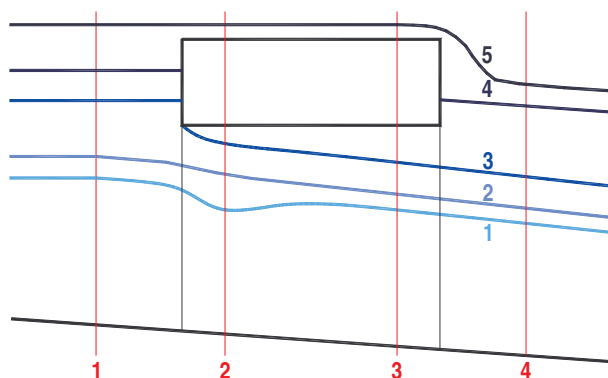
- prověření místa odečítání polohy hladiny,
- prověření platnosti konzumní křivky bezpečnostního přelivu a rozsahu její platnosti.

Při zvláště extrémních průtocích můžeme dostat výšku přepadového paprsku **h** mimořádně velkou. Potom je třeba posoudit zda umístění vodočetné latě či jiného zařízení na měření polohy hladiny se nachází minimálně ve vzdálenosti **5** násobku výšky přepadového paprsku **h**. S výškou přepadového paprsku se také může snižovat aktivní šířka přelivné hrany přepadu. Protože bývá v době povodňových situací zpravidla výrazně větrné počasí, je důležité ověřit, zda vlivem větru nemohlo dojít k vytvoření příčného sklonu hladiny. Důležité je prověření tvaru přelivné plochy, na čemž závisí hodnota součinitele přepadu.

Odhad kulminačního průtoku pomocí výpočtu průtoku přepadem přes jezové těleso prakticky nepřipadá v úvahu. Problémem je většinou vysoká míra ovlivnění přepadu dolní vodou. Díky tomu se setkáváme s poměrně malým vzdutím hladiny jezem. Při malém rozdílu hladin kolem **10 cm** znamená chyba v měření úrovně hladiny **1 cm** chybu rozdílu hladin **10 %**. S mírou zatopení rovněž klesá přesnost stanovení součinitele zatopení dolní vodou. Přesný odhad kulminačního průtoku je možné provést pouze při dokonalém přepadu nebo velmi nízkém stupni ovlivnění dolní vodou.

5. Odhad kulminačního průtoku výpočtem průtoku mostním objektem

V případě stanovení kulminačního průtoku pomocí výpočtu průtoku mostním objektem závisí na charakteru proudění mostním otvorem. Dle obrázku 3 se můžeme setkat s režimem proudění s volnou hladinou (průběh hladiny 1 a 2), se zatopeným vtokem (3), tlakovým prouděním (4) a nezděná i s přeléváním mostním objektem (5).



Obr. 3 – Charakteristické průběhy hladin při proudění mostním objektem

Pro proudění s volnou hladinou se nejčastěji používá výpočetní postup vycházející z Bernoulliho rovnice

$$E = y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{\zeta \cdot v_2^2}{2 \cdot g} = y_2 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot \varphi^2 \cdot S_2^2}$$

V rovnici znamená E úroveň čáry energie v profilu 1, y_1 a y_2 hloubky proudění v profilech 1 a 2, v_1 a v_2 střední rychlosti vody v profilech 1 a 2, dále Q průtok mostním objektem, S_2 průtočnou plochu mostního profilu 2, φ rychlostní součinitel a konečně ζ součinitel místní ztráty na vtoku.

Použití výpočtu průtoku mostním objektem ke stanovení kulminačního průtoku má však svá úskalí. K přesnějším údajům vede výpočet pouze v případě dostatečného rozdílu hladin před a za mostem. Rozdíl hladin by měl být řádově větší než přesnost stop a tedy v desítkách cm. Obecně je vzduť mostním objektem funkcí rychlostní výšky. S významnějším vzduť hladiny se můžeme setkat při splnění následující podmínky. Mostní konstrukce musí významným způsobem omezit proudění (koncentrace proudu do užšího pásu mostního otvoru) a rychlosti proudění mostním otvorem musí být větší než 2 nebo spíše $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V takových případech je potřeba počítat s příčnými složkami rychlostí v úseku nad i pod mostním profilem. Jako jejich důsledek se objeví příčný sklon hladiny.

V případě vyhodnocení kulminačního průtoku výpočtem průtoku mostním objektem je potřeba věnovat zvýšenou pozornost stopám po kulminační hladině, a to především právě z pohledu analýzy možného příčného sklonu hladiny.

Praktické zkušenosti s vyhodnocením ukázaly, že bylo dosaženo dobrých výsledků tehdy, když byl mostní objekt součástí delší měrné tratě. Naopak vyhodnocení kulminačního průtoku selhalo ve většině případů, kde byla snaha vyčíslit průtok výhradně z výpočtu proudění samotným mostním objektem.

6. Věrohodnost zaměřených stop po kulminační hladině

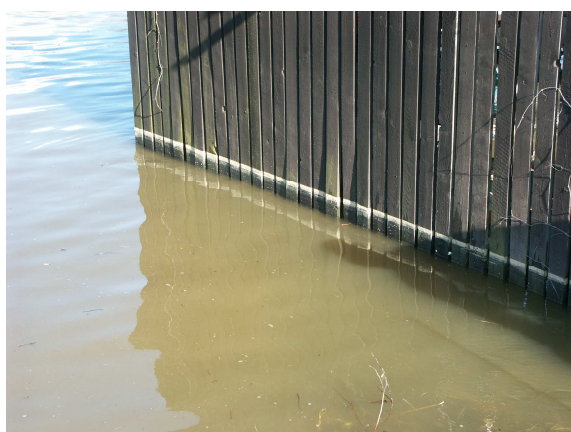
Základem kteréhokoliv z výše uvedených postupů na vyhodnocení povodňové situace musí být nalezení věrohodných stop po kulminační hladině. Z tohoto pohledu je důležitá rychlost prozkoumání lokality, která byla povodní zasažena. S postupem času samozřejmě většina stop postupně mizí.

Na druhou stranu je třeba přiznat, že v případě povodní mimořádného rozsahu (jako v případě povodní z let 1997 a 2002) není možné všechny potřebné úseky toků prohlédnout bezprostředně po průběhu povodně. Měrné tratě byly proto určovány i s několikátýdenním prodlením. Kvalita stop proto byla již horší.

Druhy stop po kulminační hladině jsou dvojího typu – lineární a bodové. Lineární stopy mohou být následujícího typu :

- liniové stopy na stavebních konstrukcích,
- linie odplaveného jehličí nebo listí v lesním porostu,
- zachycená tráva či listí na plotech,
- ulehlá tráva či jiné plodiny v inundaci.

Rozeberme si nyní tuto problematiku. Zdánlivě jasně určitelné bývají stopy na stavebních objektech. V těchto případech je potřeba posoudit, zda je nalezená stopa skutečně stopou po kulminační hladině. Na stavebních objektech s omítkou dochází vlivem kapilárních sil ke vzlínání hladiny. Maximální úroveň vlhké omítky proto může být vyšší než byla nejvyšší hladina vody. V těchto případech často pomůže fakt, že za povodně protéká v korytě značně znečištěná voda. Po kulminační hladině zpravidla zůstane špinavá stopa, která se vzlínající vodou již nepohybuje (Obr.4).



Obr.4. – Ukázky liniových stop po kulminační hladině.

Další problém vyplývá z hydraulických vlastností vodního proudu. I v případě toků, kde se nevyskytují extrémní rychlosti proudění, je možné pozorovat, že hladina v čase pulzuje kolem určité střední hodnoty (pulsace se

mohou pohybovat kolem několika málo cm až k hodnotám, které převyšují desítku cm). V takovém případě nalezená stopa nemusí odpovídat úrovni průměrné kulminační hladiny, ale maximální úrovni pulzující hladiny. V případě, že byly pulsace relativně pravidelné, může být i v tomto případě výsledná linie stopy zcela rovná. U liniových stop je proto potřeba počítat s tím, že skutečná hladina mohla být o něco nižší než úroveň zachovalé stopy.

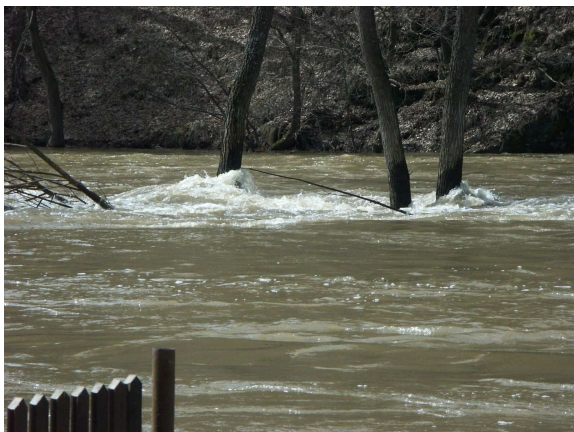
Liniové stopy po odplaveném jehličí nebo ulehlé trávě se nacházejí v okrajové části údolních profilů. U těchto typů stop platí, že mizí velmi rychle po povodni.

Nejvíce problematické mohou být stopy na plotech. V případě, že linie plotů vede kolmo k proudnici, velmi často dochází k tomu, že připlavená tráva ucpe celou plochu plotu a ten se stává téměř nepropustný. Úroveň hladiny může před ním potom stoupnout až na úroveň čáry energie v daném profilu. V jiných případech může hydrodynamická síla vodního proudu vyvolat porušení stability plotu. Ten se potom může vyvalit ve směru proudění. V šikmé poloze dojde potom k zanesení dalšího pásu plotu. Pokud takovýto plot jeho majitelé vrátí do původní svislé úrovně, může úroveň zachycené trávy či listí signalizovat podstatně vyšší úroveň hladiny než byla ve skutečnosti.

Obecně se ale dá říct, že liniové stopy na stavebních objektech umožňují zpravidla zajištění přesnějších stop po kulminační hladině než je tomu u stop bodových.

V jejich případě se můžeme setkat s podstatně větší nejistotou a nepřesností. Bodovými stopami jsou především zachycené trávy a jiné drobné předměty na stromech. V případě umístění stromů v místě s velkými svislicovými rychlostmi proudění dochází při obtékání kmene k lokálnímu vzduť hladiny. V případě, že má překážka větší rozměr, může úroveň vzduť hladiny na čele překážky dostoupit až k úrovni čáry energie v linii překážky. Zaznamenaná úroveň stopy se tak může nacházet až o hodnotu lokální rychlostní výšky výše než je střední úroveň hladiny v korytě. Pro srovnání - při rychlostech přesahujících 3 m.s^{-1} můžeme dostat rychlostní výšku větší než **0.5 m**. Jiný problém se může objevit v případě, že se stopa nachází na pružné překážce. Ta může být vlivem proudu ohnutá, stopa se na ní zachytí za tohoto stavu. Po opadnutí velké vody se může opět vztyčit do původní polohy, stopa se tak dostane nad úroveň maximální hladiny.

Ukázka vzduť hladiny na Lužnici v bechyni v okolí obtékaného stromu za povodně v dubnu 2002 a typické bodové stopy po kulminační hladině jsou dokumentovány na obrázku 5



Obr.5. – Vzduť hladiny při obtékání stromů za povodně a vytvořené stopy po kulminační hladině.

V případě, že se měrná trať nachází v oblouku, je potřebné se zabývat případným příčným sklonem hladiny. Pokud se měrná trať nachází v oblouku, je potřeba zaznamenané úroveň maximální hladiny na konkávním nebo konvexním okraji hladiny v oblouku upravit o hodnotu $\pm\Delta h/2$ na střední hodnotu úrovně hladiny v profilu, protože 1D matematický model není schopen vliv oblouku při výpočtu zohlednit.

V řadě případů jsou velmi cenná ústní sdělení odborníka či laika, kteří měli možnost sledovat průběh povodňové situace ve skutečnosti. Zpřesnění informací přinesou i fotografie a videozáznamy průběhu povodňové situace. V těchto případech je potřebu prověřit, zda získané informace byly zjištěny v době kulminace povodně.

7. Použití matematických modelů

K urychlení hydraulických výpočtů pro stanovení kulminačního průtoku v průběhu povodňových situací je vhodné použít některý z dostupných matematických modelů. V tomto případě se doporučuje dávat přednost modelům, které řeší nerovnoměrné ustálené proudění před modely proudění neustáleného. V českých podmínkách jsou nejčastěji používány modely HEC-RAS v.3.1 (vlastní výpočetní modul HEC2) a HYDROCHECK1. První byl vyvinut Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers a je jako free software volně dostupný na internetu. Druhý z uvedených modelů sestavila česká firma Hydrossoft Veleslavín. Princip obou modelů vychází z výpočtu nerovnoměrného proudění po úsecích, která je podrobně popsána v předchozí kapitole. Významnější rozdíl lze vypořádat pouze v přístupu k řešení objektů. Program HEC-RAS řeší hydrauliku objektů přímo ve výpočtu (použité výpočetní postupy jsou opět uvedeny v této kapitole), v případě programu HYDROCHECKU1 se při výpočtu průběhu hladin používá pro každý objekt měrná křivka spočítaná v samostatném modulu HYDROCHECK2.

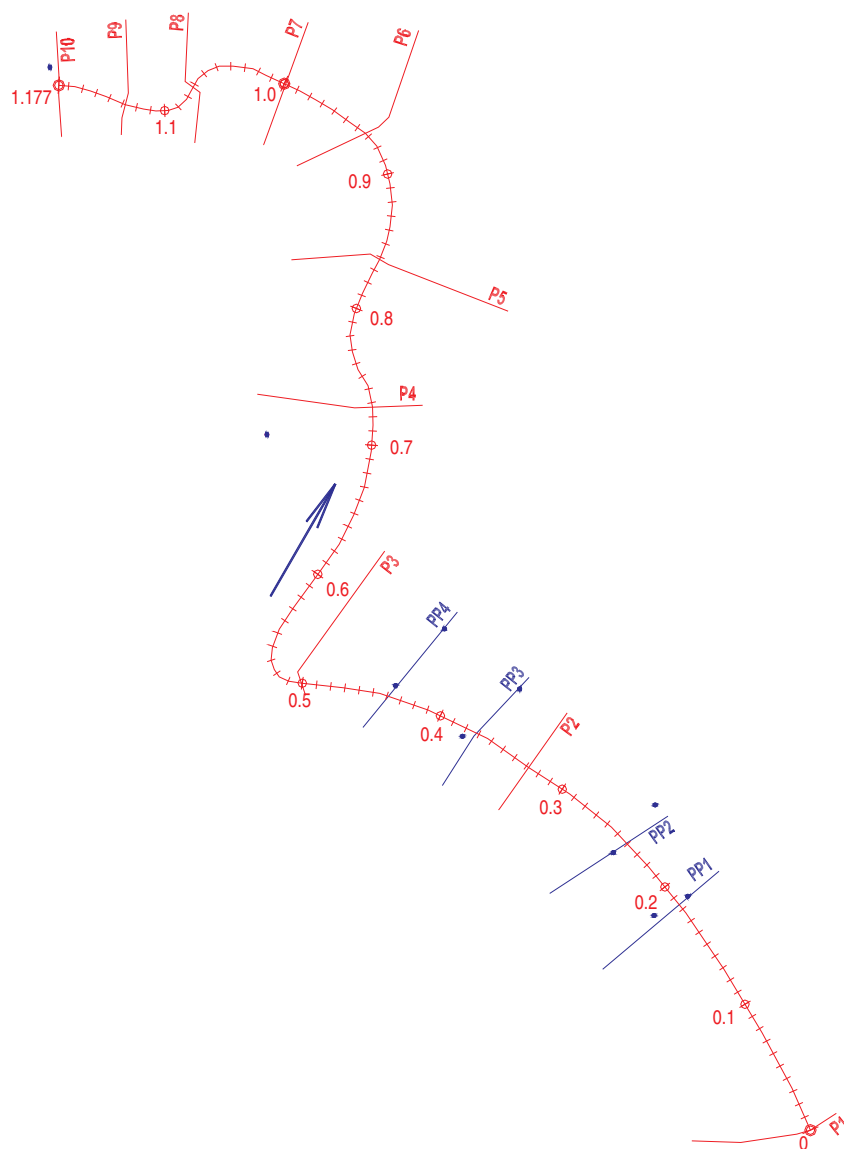
Využití modelů neustáleného proudění je třeba hledat především v případě posouzení míry transformace povodňových vln především v úsecích, kde tok protéká širokou inundací. V těchto případech je nezbytné, aby byl použitý matematický model schopen řešit proudění v síti říčních koryt včetně dělení proudu. Z dostupných matematických modelů tuto podmínku splňuje opět model HEC-RAS v.3.1 (pomocí výpočetního modulu UNET) a MIKE11, který je produktem Danish Hydraulic Institute.

8. Rozbor problémů při vyhodnocování kulminačních průtoků na praktickém příkladě měrné tratě Ostrovec na Lomnici

Lokalita, na které lze velmi názorně ukázat problémy a možné chyby při vyhodnocení kulminačních průtoků vyplývajících z úrovně zaměřených stop, se nachází pod obcí Ostrovec na řece Lomnici [8]. Po povodni v roce 2002 byla zaměřena měrná trať délky 255 m, která obsahovala 4 profily (PP1 až PP4). Kromě profilů byla zaměřena i řada stop po kulminační hladině. Další práce, které byly v této lokalitě provedeny a které umožnily jiný pohled na vyhodnocení, souvisely s extrapolací měrné křivky limnigrafické stanice Ostrovec. Její profil leží na dolním okraji obce Ostrovec. K tomuto účelu bylo nově zaměřeno celkem 10 profilů (P1 až P10 – limnigrafická stanice) v úseku délky 1177 m. Trať z roku 2002 se nachází v jeho dolní části. Schématické znázornění zaměřených příčných profilů je patrné z obrázku 4, pohled na charakter měrné tratě je dokumentován na obrázku 3.



Obr.3. – Pohledy na koryto Lomnice a překážku v inundaci tvořenou živým plotem v úseku měrné tratě Ostrovec na Lomnici.



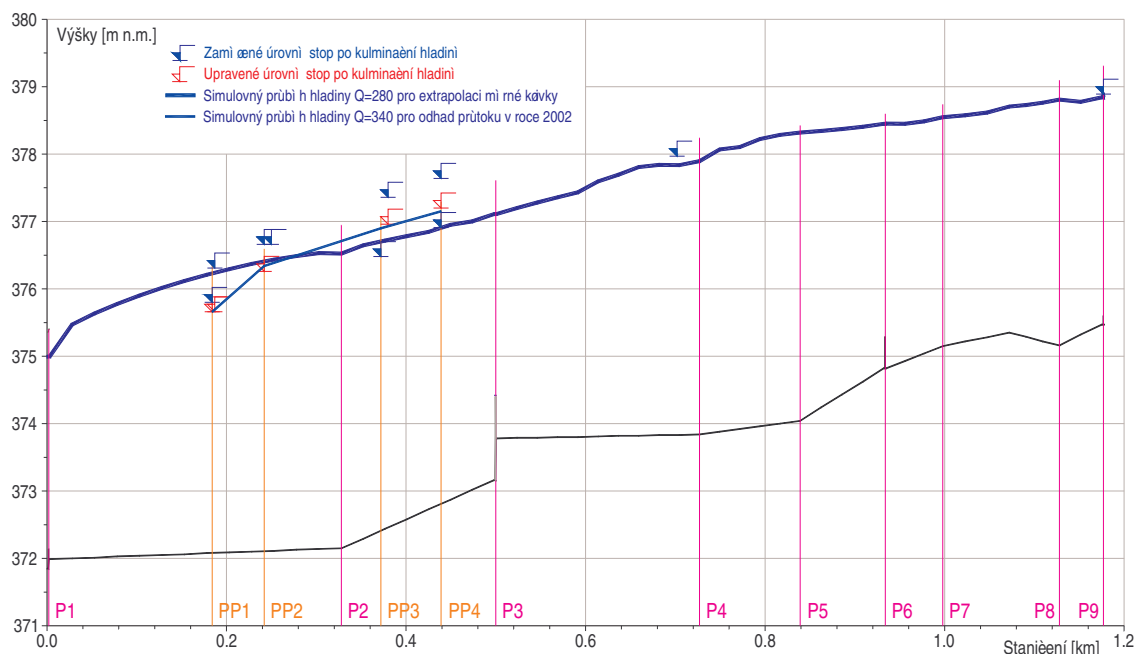
Obr. 4. – Zaměřené údolní profily v lokalitě Ostrovec na Lomnici.

Odhad kulminačního průtoku povodně z roku 2002

Při vyhodnocení kulminačního průtoku povodně ze srpna roku 2002 byla nejprve věnována pozornost úrovni stop po maximální hladině. Podobně jako v ostatních lokalitách se uvažovalo, že nalezené stopy na stromech v blízkém okolí koryta nemusí odpovídat hladině vody v korytě. Při jejich obtékání může dojít k místnímu vzduť hladiny, jehož výška se předpokládala maximálně rovná rychlostní výšce. Pomocí této metody byly proto polohy některých stop upraveny. Při výpočtech byla vyloučena 1/4 až 1/3 levé inundace (v profilu P4 s překážkou tvořenou drátěným a živým plotem pak 1/2 šířky inundace). Jako neprůtočný byl též uvažován les s křovinami na kraji pravobřežní inundace. Drsnosti koryta byly voleny v rozsahu od **0.053** do **0.057**. Kulminační průtok potom vyšel v rozsahu od **330** do **350 m³·s⁻¹**.

Extrapolace měrné křivky

Jiné hydraulické výpočty byly dokončeny v roce 2004 při zpracování extrapolace měrné křivky limnigrafické stanice Ostrovec. Na základě kalibrací drsností (pro dolní úsek byla uvažována drsnost $n = 0.045$) a možnosti uvážení dalších stop po kulminační hladině se ukázalo, že přesně zaměřené úrovni hladiny v profilu limnigrafické stanice nejlépe odpovídal průtok $Q = 280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že se v profilu P1 nachází přirozený práh, pod kterým následuje úsek se strmějším sklonem, byla jako dolní okrajová podmínka použita měrná křivka tohoto profilu za předpokladu sklonu dna $i = 0.005$. Při tvorbě geometrického modelu byla použita funkce, která vytváří interpolované profily. Jejich maximální vzdálenost byla určena **25 m**. Křivka snížení však byla velmi krátká (končila ve staničení cca **km 0.125**, profil PP1 se nachází v staničení **km 0.184**), volba této okrajové podmínky proto výsledek v žádném případě nemohla ovlivnit. Náorné porovnání obou výpočtů je zpracováno v podélném profilu na obrázku 5.



Obr. 5. – Podélný profil simulovaných průběhů hladin a pozorovaných stop po kulminační hladině na měrné trati Ostrovec na Lomnici.

Z obrázku je patrná významná odchylka především ve sklonu hladiny v úseku mezi profily PP1 až PP4. Rozdíl hladin mezi profily PP1 a PP4 činil dle simulací z roku 2002 $\Delta H = 1.49 \text{ m}$ (průměrný sklon hladiny **0.0058**), dle simulací z roku 2004 potom pouze **0.64 m** (průměrný sklon v úseku **0.0025**). V roce 2002 byl tedy uvažován dvojnásobný sklon hladiny než v roce 2004. Při podrobné analýze tabelárních výstupů výpočtů z roku 2002 na celé trati se v žádném z profilů nevyskytl sklon hladiny větší než **0.004**.

Kde je tedy možné hledat zdroj pravděpodobné chyby? Z grafu je patrné, že nereálně velký sklon hladiny se objevil především mezi profily PP1 a PP2, jeho příčinou je pravděpodobně příliš nízká úroveň zaměřené stopy č.501 a velké snížení úrovně stopy č. 502 o **65 cm**.

Díky podstatně většímu sklonu hladiny, který byl na základě uvedených stop uvažován, přinesl odhad kulminačního průtoku v roce 2002 i při vyšších použitých drsnostech koryta podstatně vyšší hodnotu než ukázaly pozdější výpočty.

9. Význam jednotlivých parametrů na přesnost odhadu

V této kapitole bude probrán význam jednotlivých parametrů na přesnost provedeného odhadu kulminačního průtoku. Výsledek závisí na těchto parametrech : charakteristiky průtočného profilu, přesnost úrovní stop po kulminační hladině a odpory koryta a inundace.

Charakteristiky průtočného profilu

Charakteristiky průtočného profilu vychází z geodetického zaměření jednotlivých profilů. Chyby vyplývající z vlastního zaměření jsou v porovnání z ostatními zanedbatelné. Z analýzy vyhodnocení kulminačního průtoku v měrné trati Spůle na Spůlce však vyplývá, že pro přesnost odhadu kulminačního průtoku je zcela zásadní skutečnost, zda při povodňové situaci proudila voda v celé šířce záplavového území nebo jen v určité části. K této skutečnosti může docházet především v případech členitější morfologie záplavového území.

V případě, že byla v průběhu povodňové situace k proudění využívána jen část šířky záplavového území, mohou chyby v odhadu kulminačního průtoku dosáhnout až několika **desítek %**.

Přesnost úrovní stop po kulminační hladině

Podrobný rozbor hydraulických výpočtů pro lokalitu Ostrovec na Lomnici ukázal, že pro odhad kulminačního průtoku má zcela zásadní význam přesnost zaměřených stop a z nich vyplývající předpokládaný sklon hladiny při proudění kulminačního průtoku. Velikost chyb odhadu je možné omezit do značné míry volbou dostatečné délky měrné tratě. Úroveň stop po kulminační hladině může rovněž ovlivnit velikost průtočné plochy.

V případě, že délka měrné tratě není dostatečná a stopy po kulminační hladině nejsou zcela věrohodné, mohou chyby v odhadu kulminačního průtoku dosáhnout až několika **desítek %**.

Odpory koryta

Odpory koryta jsou do výpočtů zahrnuty zpravidla odhadem Manningova součinitele drsnosti **n**. Řada srovnávacích analýz, které byly u nás v minulosti

provedeny, ukázaly, že rozdíly mezi odhady součinitele, které pro stejné úseky toků provedli zkušební hydraulici, dosahují až několik desítek %. S chybami v odhadu velikosti tohoto součinitele v tomto rozsahu je proto nutné počítat. Porovnání výsledků různých variant výpočtů na desítkách měrných tratí však přineslo překvapivé zjištění. Při změně odhadu součinitele drsnosti o **10 %** vycházely odhady kulminačního průtoku pro naprostou většinu případů odlišné pouze o cca **5 %**.

Důsledkem maximální chyby odhadu hodnoty Manningova součinitele drsnosti **n 20 %** by měla být chyba v odhadu kulminačního průtoku přibližně **10 %**.

10. Metodická doporučení pro vyhodnocení kulminačních průtoků výpočtem nerovnoměrného proudění

V poslední kapitole se autor pokusil zpracovat metodická doporučení pro výběr měrných tratí pro vyhodnocení kulminačních průtoků při povodňových situacích na vodních tocích pomocí metody nerovnoměrného proudění.

Obecně by se při výběru měrné tratě měla dát přednost úseku, kde byl průtok relativně koncentrován do úzkého pásu přímého úseku, kde se tvar a velikost příčného profilu příliš nemění. V praxi se pochopitelně vyskytnou situace, kdy je potřeba vyhodnotit kulminační průtok i v úsecích, kde je problém takovou podmínku splnit. Následující kritéria jsou proto pomůckou, jak přistoupit k výběru úseku měrné tratě, zaměření profilů a zajištění stop po kulminační hladině tak, aby byl výsledný odhad zatížen co nejmenší chybou.

- Vhodnou délku měrné tratě je možné stanovit z následující rovnice

$$L = \frac{K}{i^{1.5}}$$

Kde **L** je délka měrné tratě, **K** koeficient zohledňující přesnost odhadu kulminačního průtoku, **i** průměrný sklon dna měrné tratě. V případě, že je hodnota **K** větší než **0.1** je možné dosáhnout velmi dobrého odhadu kulminačního průtoku (pochopitelně při splnění dalších podmínek). Naopak pokud je hodnota součinitele **K** menší než **0.05**, můžeme se dopustit při odhadu kulminačního průtoku velkých chyb především v případech, kdy úrovně stop především v dolní části měrné trati nejsou dostatečně hodnověrné.

- Vzdálenost zaměřených profilů musí být volena tak, aby průměrný profil mezi dvěma zaměřenými profily mohl dostatečně dobře reprezentovat úsek pro výpočet sklonu čáry energie. Maximální vzdálenost mezi profily je možné alespoň přibližně určit z podmínky, aby se šířka hladiny nebo

velikost průtočného profilu mezi 2 sousedními profily nezměnila o více než 25 %.

- Za nevhodný lze považovat takový úsek, kde v horním úseku je proveden průtok v relativně úzkém profilu a ve směru toku dochází k rozliti vody do široké inundace.
- Z hlediska tvaru a rozměru údolního profilu jsou nejvhodnější tratě, kde šířka hladiny při kulminačním průtoku nepřevyšuje v celém úseku dvojnásobek šířky koryta. Pokud tato šířka přesáhne přibližně trojnásobek šířky koryta, je nutno věnovat zvýšenou pozornost stopám po průběhu kulminační hladiny na obou březích.
- V případě širších inundací či morfologicky členitějších území je třeba posoudit, zda voda proudila v celé části inundace (odhad „aktivních“ a „pasivních“ zón), zda vedla proudnice v inundaci paralelně s trasou hlavního koryta, zda je možné z hydraulického hlediska řešit proudění jako jednorozměrný problém, zda je v celém příčném profilu možné počítat s jednou konstantní hladinou.
- V případě, že nejsou úrovně stop po kulminační hladině zcela věrohodné, může metoda založená na výpočtu průtoku mezi 2 sousedními profily z daných úrovní hladin přinést chyby v odhadu ve velikosti až několika desítek procent.
- Při hledání stop po kulminační hladině se doporučuje věnovat hlavní pozornost nalezení liniových stop.
- Zaměřené stopy po kulminačním průtoku je nutné podrobit podrobné analýze. Především je potřeba se zaměřit na otázku případného příčného sklonu hladiny (například převýšení hladiny u konkávního břehu v oblouku, příčný sklon hladin v okolí mostních objektů), na úroveň bodových stop (při obtékání překážek dochází k lokálnímu vzduť hladiny, stopa proto nemusí odpovídat hladině vody v posuzovaném profilu).
- V případě, kdy není stopa po kulminační hladině v dolním profilu (dolní okrajová podmínka) příliš věrohodná, se doporučuje přiklonit spíše k nižší hodnotě z důvodu kratší křivky snížení než křivky vzduť (při stejné odchylce hladiny).

Seznam použité literatury

- [1] Barnes H. H., Jr. 1967: Roughness Characteristics of Natural Channels. U.S.G.S. Water Supply Paper 1849, Washington.
- [2] Bathurst, J.C. 1985: Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers. JHD ASCE Vol. 111, HY4,, str.625-643.
- [3] Cowan, W.L. : Estimating Hydraulic Roughness Coefficient. Agricultural Engineering 37, no. 7, pp. 473 75, 1956.
- [4] FESWMS, User's Manual. US Department of Transportation. Federal Highway administration.
- [5] Hamill, L., 1999 : Bridge Hydraulics. E&FN SPON, London.
- [6] Havlík, A. : Hydraulické vyhodnocení dynamiky odtoků a rozlivů. Závěrečná zpráva DÚ 4 projektu Vyhodnocení povodňové situace v červenci 1997. VÚV TGM Praha, červen 1998.
- [7] Havlík, A. : Vyhodnocení kulminačních průtoků povodně ze srpna 2002 ve vybraných profilech limnigrafických stanic pobočky ČHMÚ Plzeň. ČVUT v Praze, březen 2003.
- [8] Havlík, A., Mareš, K. Píček, T. : Vyhodnocení kulminačních průtoků povodně ze srpna 2002 ve vybraných profilech limnigrafických stanic pobočky ČHMÚ České Budějovice. ČVUT v Praze, březen 2003.
- [9] Havlík, A. : Vyhodnocení kulminačních průtoků na Dubské Bystřici v průběhu povodňové situace v srpnu 2002. Revital Praha, listopad 2002.
- [10] Havlík, A., Satrapa, L., Salaj, M. Horský, M., Fošumpaur, P. : Riziková a finanční analýza na horní Opavě. Závěrečná zpráva projektu. Zadavatel Povodí Odry, s.p. ČVUT v Praze, duben 2004.
- [11] Havlík, A., Matoušek, V. : Srážko-odtokové a korytotvorné procesy v povodí toků. Výroční zpráva projektu MŽP ČR. ČVUT v Praze, listopad 2004.
- [12] HEC-RAS version 3.1, Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers. USA, Davis, 2002.
- [13] Hey, R. D. : Flow Resistance In Gravel-Bed Rivers. J.Hyd. Div. ASCE 105, No. HY4, pp. 365- 79. 1979.
- [14] Hydraulic Design of Spillways. Technical Engineering and Design Guides. US Army Corps of Engineers, No.12. New York, 1995.
- [15] Chen,Ch. L. : Power Law of Resistance in Open Channels: Manning's Formula Revisited. In: Yen, B.C. (ed): Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula. Water Res. Publ., Littleton CO, 1992.
- [16] Chow V.T. : Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York 1959.
- [17] Kolář, V., Patočka, C., Bém, J. : Hydraulika. SNTL, Praha 1983.
- [18] Kolář, V. a kol : Hydraulika. Technický průvodce, SNTL, Praha 1966.
- [19] Leopold, L.L., Wolman, G.M., Miller, J.P. : Fluvial processes in Geomorphology. General Publishing Company, Toronto, 1964.

- [20] Limerinos, J.T. 1970: Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels. USGS Water Supply Paper 1898-B. Denver CO.
- [21] Marešová, I. : Odpory proudu v korytech s hrubozrnným dnem. Kandidátská disertační práce. ČVUT v Praze, Stavební fakulta, Praha, 1992.
- [22] Martinec, J. : Rychlostní ztráty v nepravidelných říčních tratích. Práce a studie 118. VÚV, Praha, 1966.
- [23] Mattas, D. : Výpočet průtoku v otevřených korytech. Habilitační práce v rukopise.
- [24] Meyer-Peter, E. Müller, R. : Formulas for Bed-Load Transport. Proc. second Meeting Int. Assoc. Hydraulic Research, paper No.2, pp. 39-64, 1948.
- [25] Patočka, C. : Hydraulika. Skripta FSv ČVUT, Praha, 1966.
- [26] Pícek, T. Havlík, A., Mattas, D. : Tlakové proudění mostním otvorem a přelévané mosty. Journal of Hydrology and Hydromechanics Vol.52, No.3. Bratislava, 2004.
- [27] River Hydraulics. Technical Engineering and Design Guides. US Army Corps of Engineers, No.18. New York, 1996.
- [28] RMA2 WES Version 4.3, User's Guide. US Army Corps of Engineers, 1997.
- [29] Skalička, J. : Výpočet průtoku přes jez při vysokém stupni zatopení dolní vodou. Vodní hospodářství 9/1981 – řada A, str. 237-242. Praha, 1981.
- [30] Sturm, T.W. : Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York 2001.

Ing. Aleš Havlík, CSc.

Narozen : 4.9.1956

Odborná kvalifikace :

- 1975 – 1980 studium, ČVUT, Fakulta stavební, obor vodní stavy a vodní hospodářství
- 1980 – 1998 Výzkumný ústav vodohospodářský TGM
- 1988 – 1993 vědecká aspirantura
- 1993, 1994 stáž v Danish Hydraulic Institute (Horsholm, Dánsko) zaměřená na matematické modelování v otevřených korytech
- 1997 stáž v ústavu RIZA (Lelystad, Nizozemí) zaměřená na matematický model Sobek
- 1998 – doposud ČVUT, Fakulta stavební, katedra hydrauliky a hydrologie
- 2005 začíná přednášet hlavní předmět oboru vodní stavy a vodní hospodářství - hydraulika

Oblast odborného zaměření

Hydraulika otevřených koryt, stabilita přirozených a upravených koryt, pohyb splavenin, zimní a ledový režim vodních toků.

Účast na řešení projektů :

- Hlavní řešitel projektu GAČR 103/00/1620 "Hydraulická funkce mostních objektů" 2000-2002.
- Hlavní řešitel projektu MŽP VaV/650/2/00 "Systém opatření v hydrologických povodích ke snížení škodlivých účinků následků povodní" 2000-2002.
- Hlavní řešitel projektu MZe QC0300 "Analýza povodňových škod a jejich využití pro prevenci" 2000-2002.
- Hlavní řešitel projektu GAČR 103/03/0309 „Hydraulika objektů za povodní“ 2003-2005.
- Hlavní řešitel projektu MŽP SL/1/13/04 „Srážko-odtokové a korytotvorné procesy v povodí toků“ 2004-2006.