HYSTEREZE MĚRNÝCH KŘIVEK NA PRAKTICKÝCH PŘÍKLADECH

Aleš Havlík [1]

Abstrakt

Článek se zabývá problematikou hystereze měrných křivek limnigrafických stanic. Teoreticky je popsán jednak přístup vyhodnocení míry hystereze aplikací modelování neustáleného proudění, jednak zjednodušení metoda Jonesova. Oba přístupy jsou využity na praktických případech hystereze měrných křivek stanic Frahelž na Lužnici a Nový Jičín na Jičínce.

Klíčová slova: měrná křivka, hystereze

1. Úvod

Zvýšená četnost povodní v posledních dvou desetiletích ukazuje na potřebu zpřesnění stanovování zásadní hydrologické veličiny, kterou je průtok. Měřit kontinuálně průtok vody v řekách na základě aplikace fyzikální podstaty je nemožné. Proto se k jeho stanovení využívá měření jiných veličin, jako je například rychlost. Ani v případě stanovení průtoku na základě vyhodnocení rozdělení rychlostí v příčném profilu však zatím není reálné průběžné vyhodnocování. Časový průběh průtoku se stále vyjadřuje s využitím měrné křivky profilu.

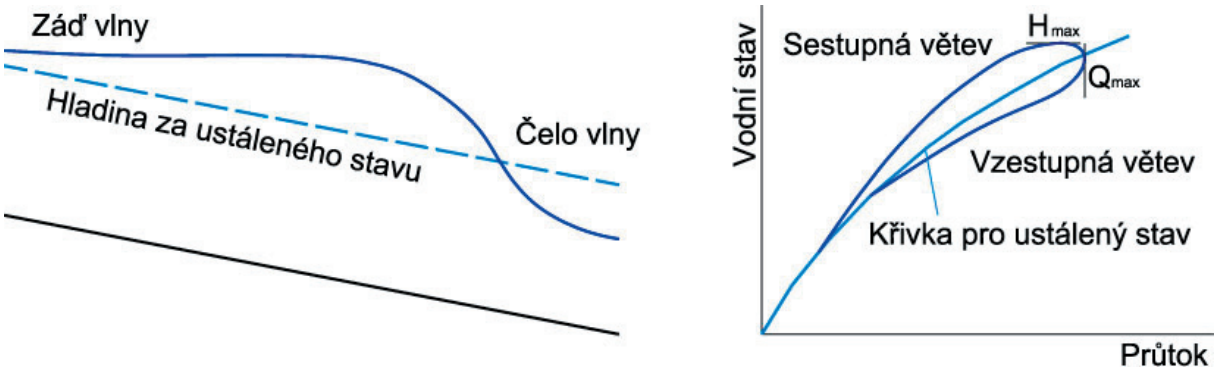
Zpřesnění měření rychlostního pole byla v poslední době věnována velká pozornost, a to zejména v souvislosti s razantním nástupem ultrazvukových čidel založených na Dopplerově principu. Oproti klasickému přístupu, který využívá hydrometrických vrtulí, se daří častěji změřit průtoky i při průtocích s extrémní pravděpodobností výskytu. Významné změny se udály i v oblasti měření vodního stavu v profilech limnigrafických stanic.

Pro přesnost časového průběhu průtoku se tak čím dál tím stává zásadní přesnost měrné křivky stanice. Největší chyby lze přitom očekávat v oblasti extrémních vodních stavů. Hlavní příčina stále tkví v nedostatku měření průtoků za těchto stavů. Je třeba konstatovat, že zpřesnění extrapolace měrných křivek byla v poslední době věnována zvýšená pozornost. K tomuto účelu se intenzivně využívají matematické modely proudění vody s volnou hladinou, a to jak jednorozměrné, tak i zvláště v poslední době dvourozměrné.

Jev zvaný hystereze, který může za extrémních vodních stavů ovlivnit nezanedbatelně přesnost přepočtu úrovně vodního stavu na průtok, je sice notoricky znám, nicméně jeho aplikace pro přesnost vyhodnocení průtoku je velmi vzácná.

2. Hystereze měrné křivky

Hydraulickou příčinou hystereze měrné křivky je proměnlivost sklonu čáry energie pro určitý vodní stav. Jako hlavní příklad se uvádí průchod povodňové vlny posuzovaným profilem. Sklon hladiny na vzestupné větvi je větší než za ustáleného stavu, na sestupné větvi naopak menší. Názorné to je na obrázku 1.



Obr. 1: Podélný profil hladiny vody za povodňové vlny a hystereze měrné křivky

Míra hystereze úzce souvisí se sklonem dna. Čím menší je sklon, tím může být hysterezní smyčka výraznější. Doposud panoval názor, že s hysterezí měrné křivky má smysl se prakticky zabývat jen na tocích s menším průměrným sklonem dna než 1 ‰. Skutečnost, že většina našich toků má průměrný sklon dna větší než toto číslo, je jednou z příčin zanedbávání tohoto jevu při vyhodnocování povodňových situací. Extrémní povodňové vlny, které byly zaznamenány v létě roku 2009, však ukázaly, že se s tímto jevem můžeme setkat i za sklonů dna větších. S hysterezí křivky se však nemusíme setkat jen za přírodních povodní. Mohou být důsledkem umělých „rázových“ vln, které vyvolává rychlá manipulace rychlá manipulace s pohyblivými uzávěry na přehradách nebo jezových objektech nebo rychlé nabíhání či vypínání vodních turbín zejména na MVE.

Proměnlivost sklonu hladiny v profilu limnigrafické stanice však může nastat i z jiného důvodu. Typickým příkladem je profil stanice Pilař na Lužnici. Limnigrafická stanice se nachází na samém konci upraveného ohrázovaného úseku řeky. Levá hráz končí jen několik desítek metrů pod stanicí, za povodní zde dochází k masivnímu rozlivu. Sklon hladiny na konci upraveného úseku je za povodní velmi ovlivněn úrovní hladiny v níže ležící široké inundaci. Ta závisí na míře plnění inundace. Hystereze křivky nebyla v tomto profilu zatím přesně vyhodnocena. Z porovnání v minulosti provedených hydrometrování za povodňových průtoků však je však patrné, že měření za situací, kdy se rozsáhlé inundace v úseku pod stanicí teprve začínaly plnit, vykazují větší průtoky, než měření za stavu zcela zaplněných inundací.

3. Možnosti vyhodnocení hystereze

K číselnému vyhodnocení hystereze měrné křivky je možné využít dvou výpočetních postupů. Vzhledem k tomu, že je hystereze křivky důsledkem neustáleného proudění vody v korytě či inundaci, nejvhodnějším nástrojem je modelování 1D neustáleného proudění v dostatečně dlouhém úseku vodního toku v okolí posuzovaného profilu. Jedním z výstupů modelování neustáleného proudění je časový průběh vývoje sklonu hladiny a čáry energie a ostatních parametrů jako jsou průtočná plocha, průřezová rychlost a to nejen v profilu stanice, ale v celém řešeném úseku. Z fyzikální podstaty je neustálené proudění popsáno diferenciálními rovnicemi vyjadřujícími zákon zachování hmoty a hybnosti. Soustava rovnic je zpravidla označována jako rovnice Saint-Venantovy (1) a (2)

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (1)$$

a

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\beta\cdot\frac{Q^2}{S}\right)+\frac{\partial}{\partial x}(g\cdot y\cdot S)=g\cdot S\cdot(i_0-i_E) \qquad (2)$$

kde S – průtočná plocha [m^2]
Q – průtok [$m^3.s^{-1}$]
t – čas [s]
x – vzdálenost ve směru proudění [m]
g – gravitační zrychlení [$m.s^{-2}$]
y – hloubka vody [m]
i_0 – sklon dna [–]
i_E – sklon čáry energie [–]

Simulace neustáleného proudění jsou často náročné na geodetická data. K jeho modelování nevystačíme se zaměřením profilu limnigrafické stanice či jeho blízkého okolí. Musíme mít zaměřený dostatečně dlouhý úsek nad i pod stanicí. Proto byly v minulosti hledány zjednodušené postupy k vyjádření vlivu hystereze. Jako nejvhodnější se ukázala Jonesova metoda [3]. Metoda vychází ze zjednodušení, že průchod povodňové vlny stanicí lze popsat kinematickým přístupem. Základem je stanovení výchozího průtoku pro ustálený stav s využitím například rovnice Manningovy. Po určitém zjednodušení se skutečný průtok v průběhu povodňové události stanoví z rovnice

$$Q = Q_n \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{i_0 \cdot c} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}} \qquad (3)$$

kde Q – průtok v daný časový okamžik [$m^3.s^{-1}$]
Q_n – průtok za ustáleného stavu [$m^3.s^{-1}$]
i_0 – sklon dna koryta v okolí stanice [-]
h – úroveň hladiny [m]
t – čas [s]
c – rychlost pohybu povodňové vlny [$m.s^{-1}$]

Rychlost pohybu povodňové vlny je možné řešit pomocí rovnice

$$c = \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial Q_n}{\partial h} \qquad (4)$$

kde B – šířka hladiny [m].

Při praktickém použití na konkrétních případech rovnice z diferenciálního přístupu přechází na konečné diference.

4. Hystereze měrné křivky stanice Frahelž na Lužnici

Jednou z limnigrafických stanic, kde se podařilo hysterezi měrné křivky přesně kvantifikovat, je stanice Frahelž na Lužnici. Ta byla v minulosti vybudována 8 km pod největším českým rybníkem Rožmberk. Díky tomuto vodnímu dílu je hydrologický režim toku významně ovlivněn manipulacemi na objektech. Jednou z epizod, kterou se podařilo velmi dobře změřit, byla situace z 25. 9. 2008. S využitím ultrazvukového snímače ADCP bylo v krátkém časovém horizontu 5 hodin provedeno celkem 5 hydrometrických měření za situace rychlé změny vodního stavu. Uvedená měření měla původně posloužit pro zpřesnění měrné křivky stanice. Výsledky měření byly ovšem využity i pro kalibraci drsností koryta pro hydraulický model. Jeho cílem byla extrapolace křivky do oblasti povodňových vodních stavů. Teprve při detailním vyhodnocení se ukázalo, že výsledky přinesly důkaz hystereze měrné křivky.

Pro daná měření vycházely hodnoty součinitele drsnosti n za předpokladu ustáleného stavu proměnlivé v rozmezí od 0,0253 do 0,0316, to je dokumentováno v tabulce 1.

Tab. 1: Výsledky hydrometrování ve stanici Frahelž na Lužnici ze dne 28. 9. 2009

Čas	***H*** [cm]	***Q*** [$m^3.s^{-1}$]	***n*** [$m^3.s^{-1}$]
25.9.2009 11:40	76,5	8,39	0,0278
25.9.2009 13:35	121,5	19,4	0,0253
25.9.2009 14:20	136	21,52	0,0286
25.9.2009 15:50	152	24,52	0,0316
25.9.2009 16:15	152	24,34	0,0302

Rozptyl hodnot se již na první pohled ukazuje jako velmi velký. Vzhledem k tomu, že se hloubka vody mezi měřeními výrazně neměnila a změna hodnoty součinitele drsnosti nebyla v souladu se změnou hloubky, nebyl shledán důvod k takové změně velikosti součinitele drsnosti. Pro další analýzu bylo proto uvažováno, že hodnota součinitele drsnosti byla v průběhu všech 5 měření konstantní jako průměr hodnot z tabulky 1. Další postup se zaměřil na hledání veličiny, která mohla rozptyl hodnot zpracovaných v tabulce 1 vyvolat. Kromě případné chyby měření průtoku se jako možná jevila i změna sklonu čáry energie.

Výsledky tohoto postupu jsou uvedeny v další tabulce 2. Při výpočtech byla použita rozšířená Chezyho rovnice, hledaný sklon čáry energie je možné získat po její úpravě.

$$i_E = \frac{Q^2}{C^2 \cdot S^2 \cdot R} = \frac{Q^2}{K^2} \qquad (5)$$

kde C – Chezyho rychlostní součinitel [$m^3.s^{-1}$]
R – hydraulický poloměr [m]
K – modul průtoku [$m^3.s^{-1}$]

Vedle stanoveného sklonu čáry energie i_{En} při uvažování neustáleného proudění v profilu stanice v průběhu jednotlivých měření jsou v tabulce uvedeny i sklony i_{Eu}, které by odpovídali ustálenému režimu při daném průtoku. Tyto hodnoty byly získány z modelování průběhu hladiny nerovnoměrného ustáleného proudění pro všech 5 průtoků s využitím tak zvané „metody po úsecích“. Existenci hystereze prokazují další hodnoty v tabulce 2. Těmi jsou nárůsty či poklesy úrovně sklonu čáry energie oproti ustálenému stavu v absolutních hodnotách i v procentech. Změnu průtoku při uvažování křivky s hysterezní smyčkou oproti ustálenému stavu je možné dopočítat dle Chezyho rovnice, kde je průtok lineárně závislý na odmocnině sklonu čáry energie

Tab. 2: Proměnlivost sklonu čáry energie v profilu stanice Frahelž při neustáleném režimu

Čas	i_{En} [-]	i_{Eu} [-]	Δi [-]	Δi [%]	ΔQ [%]
25.9.2008 11:40	0,000247	0,000246	0,000001	0,4	0,2
25.9.2008 13:35	0,000458	0,000406	0,000052	12,8	6,2
25.9.2008 14:20	0,000424	0,000422	0,000002	0,5	0,2
25.9.2008 15:50	0,000418	0,000438	-0,000020	-4,6	-2,3
25.9.2008 16:15	0,000412	0,000434	-0,000022	-5,1	-2,6

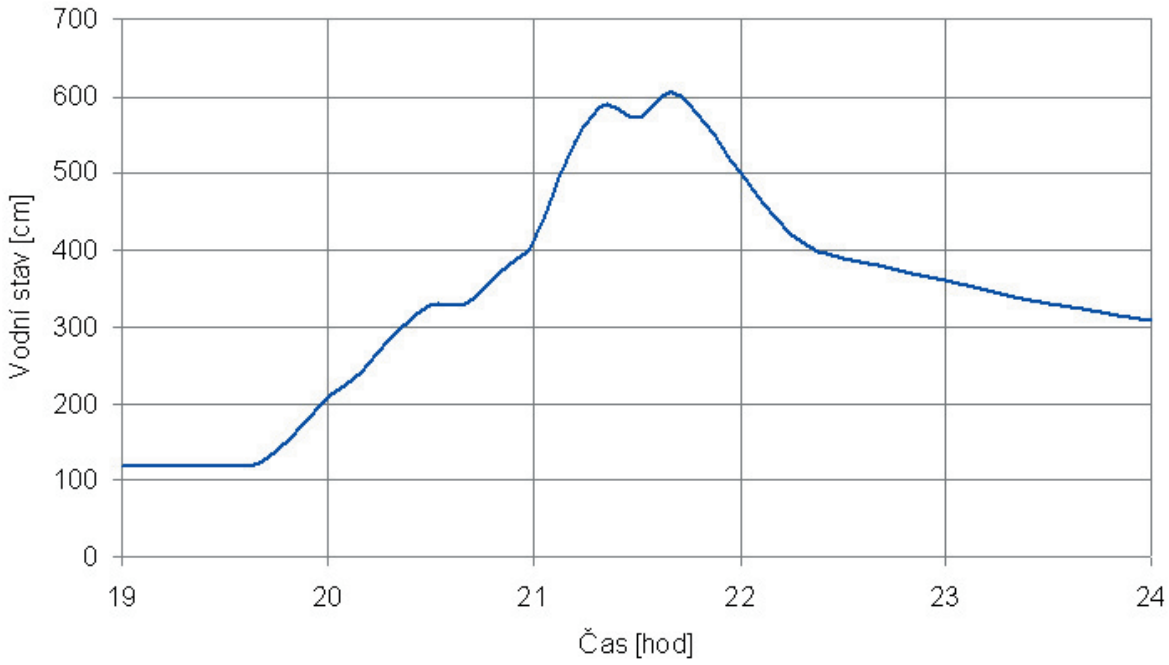
Zpracované vyhodnocení prokazují existenci hystereze měrné křivky. První měření provedené před polednem bylo v době ustáleného stavu. Pak následoval vlivem manipulace na VD Rožmberk rychlý nárůst průtoku a vznik umělé rázové vlny (přímá kladná vlna). Na

jejím čele došlo ke zvýšení sklonu hladiny a čáry energie (maximum vyhodnoceno v 13:30), skutečná hodnota průtoku vycházela dle vyhodnocení o 6,2 % větší než při odečtení z měrné křivky pro ustálený stav. V době průchodu vrcholu vlny byl sklon hladiny blízký ustálenému stavu (čas 14:20). Na sestupné větvi docházelo k postupnému snižování sklonu (časy 15:50 a 16:15).

Analýza míry hystereze byla pro čelo vlny provedena i pomocí Jonesovy metody. Při rozdílu průtoku (19,4–8,39) $m^3.s^{-1}$, rozdílu vodních stavů (1,215–0,765) m a šířce hladiny 16 m vychází dle rovnice (4) postupová doba c = 1,53 $m.s^{-1}$. Po dosazení sklonu dna v okolí stanice 0,004 a časovém intervalu (115,60) s, dostaneme hodnotu odmocniny z rovnice (3) 1,052. Po vynásobení 100 vychází nárůst průtoku na čele vlny oproti ustálenému stavu o 5,2 % větší. To je hodnota velmi blízká číslu z předchozího odstavce.

5. Hystereze měrné křivky stanice Nový Jičín na Jičínce

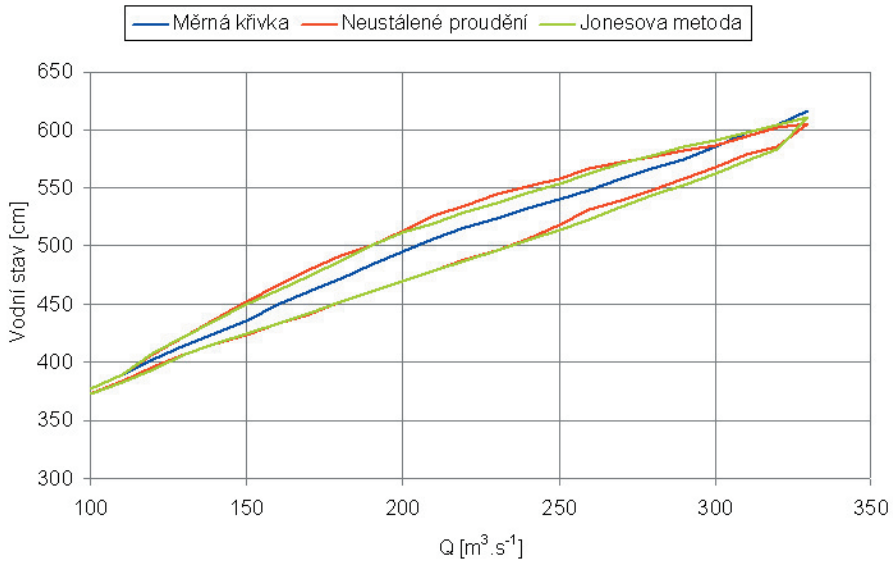
V průběhu června 2009 zasáhla povodí Jičínky povodeň s u nás naprosto výjimečným nástupem vzestupné větvě povodňové vlny. Na toku se nachází limnigrafická stanice Nový Jičín, průměrný sklon dna toku v okolí stanice se pohybuje kolem 0,25 ‰. Stanice se nachází ve vysoce kapacitním úseku řeky. Přestože kulminační průtok významně přesáhl průtok Q_{100}, voda se v okolí stanice z koryta nevylila a stanice byla schopna průběh hladiny po celou dobu trvání povodně bez problémů zaměřit. O rychlosti nástupu vlny svědčí obrázek 2.



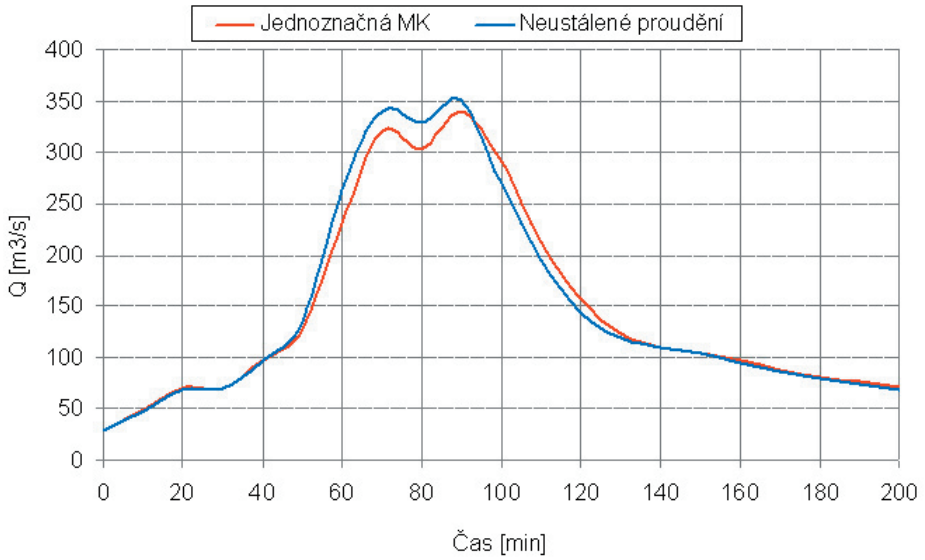
Obr. 2: Změna vodního stavu v profilu limnigrafické stanice Nový Jičín v průběhu povodně ze dne 24. června 2009.

K vyhodnocení kulminačního průtoku povodně a zpracování extrapolace měrné křivky [2] bylo pro tento úsek k dispozici geodetické zaměření dostatečně dlouhého úseku řeky Jičínky. Podrobně se hysterezí podle obou přístupů zabývala ve své diplomové práci Benešová [1] Porovnání výsledků obou přístupů s křivkou pro ustálený stav je předloženo na obrázku 3.

Aplikace měrné křivky s hysterezní smyčkou přinesla pochopitelně i odlišný hydrogram povodně oproti případu stanoveného na základě křivky pro ustálený stav. Kulminační průtok se v případě aplikace křivky s hysterezní smyčkou zvýšil o cca 10 $m^3.s^{-1}$ a mírně se změnil jeho časový průběh (Obr. 4).



Obr. 3: Hystereze měrné křivky limnigrafické stanice Nový Jičín na Jičínce v průběhu povodňové vlny z 24. 6. 2009



Obr. 4: Porovnání hydrogramů povodně zpracovaného s využitím jednoznačné měrné křivky a měrné křivky s uvažováním hystereze

Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován za podpory Výzkumného záměru č. MSM 6840770002

Literatura

[1] BENEŠOVÁ, M., 2010. Extrapolace měrných křivek. Diplomová práce, ČVUT v Praze, fakulta stavební, leden 2010.

[2] HAVLÍK A., 2009. Vyhodnocení kulminačních průtoků povodně z roku 2009 s využitím hydraulických výpočetních postupů. Dílčí zpráva projektu, ČHMÚ, Praha.

[3] OVERLEIR, A. P., 2006. Modelling stage-discharge relationship affected by hysteresis using the Jones formula and nonlinear regression. Hydrological Sciences Journal.

Kontakty na autora

1 ČVUT v Praze, Fakulta stavební, e-mail ales.havlik@fsv.cvut.cz