

Název projektu

Stanovení rychlosti proudění a průtoku na malém vodním toku

Úvod do problematiky

Na místech, kde chybí hydrometrická měření, jsou často kulminační průtoky povodní odvozovány nepřímo na základě výšky vodní hladiny, kterou lze rekonstruovat podle povodňových stop. Stejný postup může být použit pro odhad průtoku při jiných vodních stavech, např. pro hloubku kapacitního průtoku nebo hloubku při základním odtoku. Nepřímé metody mohou být rovněž použity pro extrapolaci konsumpční křivky (tzn. vztahu mezi vodními stavy a průtoky).

Často používanou nepřímou metodou je výpočet průtoku z morfologických charakteristik koryta (sklon, plocha průtočného profilu). (V anglicky psané literatuře označovaná jako *slope-area method*) Nejběžnější je pro výpočet průtoku použití Manningovy rovnice:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

kde Q = průtok (m^3/s), n = Manningův drsnostní koeficient, A = plocha průtočného profilu (m^2), R = hydraulický rádius (m), a S = sklon vodní hladiny.

Pro získání korektních výsledků je zapotřebí pečlivě vybrat úsek vodního toku tak, aby byla, pokud možno, splněna podmínka rovnoměrného proudění. Tím je myšleno, že šířka, hloubka, rychlost proudění, zrnitost dnových splavenin a sklon koryta v přímém úseku toku zůstávají konstantní. Zvolen by měl být přímý, co nejvíce homogenní úsek s délkou rovnou alespoň pětinasobku průměrné šířky koryta.

Prvním krokem je identifikovat v korytě nebo nivě úroveň vodní hladiny, která nás zajímá. Může to být úroveň kapacitního průtoku nebo stopy po hladině vody zvýšené za povodně. Zkoumaná úroveň hladiny může být v terénu vyznačena pásmem nebo sprejem jasné barvy, aby bylo možné změřit její podélný sklon. V úseku by měly být zaměřeny nejméně tři příčné profily (vedené kolmo ke směru proudnice) a zaměřen průměrný sklon dna a vodní hladiny. Zaměření více příčných profilů rozmístěných s většími rozestupy zmenšuje některé typy chyb, která jsou s touto metodou spojeny. Čím více se úsek blíží homogenním podmínkám, tím lepších výsledků bývá dosaženo. Tato podmínka však nebývá často splněna v silně turbulentních tocích a tocích s velkým sklonem. Poslední proměnnou je Manningův koeficient drsnosti (n), který odráží mnoho faktorů vytvářejících drsnost koryta a odpor vůči proudění.

Jednou z největších obtíží při aplikaci této metody je přesný odhad Manningova koeficientu drsnosti (n). Obecně hodnota Manningova n roste se zvětšující se turbulencí a vyšším odporem koryta vůči proudění. V úsecích vodních toků, kde je jednotný sklon a kde je drsnost dna a břehů přibližně stejná (např. v upravených korytech), lze považovat Manningovo n za konstantní. V přirozených korytech na druhou stranu kolísá n s hloubkou vody. Hodnota koeficientu klesá s tím, jak jsou různé prvky drsnosti koryta (kameny, mrtvé dřevo) více ponořeny pod hladinou. Koeficient má tedy na tomtéž místě různou hodnotu podle vodního stavu. Za nízkých průtoků bývá jeho hodnota větší, než za průtoků vyšších. Tento trend se ovšem může obrátit v korytech, která mají hladké dno, ale břehy hustě porostlé vegetací. V případě vyběření vody z koryta za povodně je nezbytné určit n odděleně pro koryto a povrch nivy. Celkový průtok se v těchto složených průtočných profilech vypočítá jako součet dílčích průtoků v jednotlivých částech inundačního území (dílčích průtočných profilů).

Odhad n může být proveden výběrem hodnoty z tabulek popisujících tvar a drsnost koryta (např. Chow, 1959; viz níže) nebo vizuálním porovnáním koryta s fotografickým klíčem (např. Barnes, 1967). Barnesův fotografický klíč, vytvořený Geologickou službou Spojených států amerických (US Geological Survey), obsahuje barevné fotografie koryt vodních toků s jejich n hodnotami, které byly ověřeny hydrometrickým měřením při kapacitním průtoku.

Většina publikovaných hodnot Manningova drsnostního koeficientu se vztahuje ke kapacitnímu (korytotvornému) průtoku.

Manningovy n hodnoty pro malé, přirozené vodní toky (šířka vodní hladiny při povodňových průtocích < 30 m; Chow, 1959)

Popis koryta	Minimum	Střed	Maximum
NÍŽINNÉ TOKY			
a. Bez překážek, přímé, bez hlubších tůní	0,025	0,030	0,033
b. Stejně jako a., ale více kamenů a vodních makrofyt	0,030	0,035	0,040
c. Bez překážek, zákruty, občasné tůně a mělčiny	0,033	0,040	0,045
d. Stejně jako c., ale s vodními makrofyty a kameny	0,035	0,045	0,050
e. Stejně jako c., ale za nízkých průtoků s málo efektivním sklonem a průtočným profilem	0,040	0,048	0,055
f. Stejně jako d., ale více kamenů	0,045	0,050	0,060
g. Zanesené úseky, hodně vodních makrofyt, hluboké tůně	0,050	0,070	0,080
h. Silně zarostlé vodními makrofyty, hluboké tůně nebo inundační území s hustým lesním porostem a keřovitým podrostem	0,075	0,100	0,150
HORSKÉ TOKY (žádná makrofyta v korytě, příkré břehy, stromy a keře na březích za vyšších vodních stavů pod vodou)			
a. Dno složené ze středně a hrubě zrnitého štěrku, občasný výskyt balvanů	0,030	0,040	0,050
b. Dno složené z hrubého štěrku a velkých balvanů	0,040	0,050	0,070

Další metoda, jak stanovit Manningovo n spočívá ve zhodnocení individuálních účinků nejruznějších prvků drsnosti koryta (Cowan, 1956; viz níže v Návodu pro vypracování). Tato metoda je vhodná pro malé až střední toky s hydraulickým rádiem menším než 5 m. Při aplikaci této metody je třeba dávat pozor, aby nebyl určitý typ drsnosti započítán vícekrát v rámci hodnocení různých komponent drsnosti koryta. Tento postup je stále značně subjektivní, nicméně alespoň nutí mapovatele zaznamenat a ohodnotit různorodé faktory ovlivňující Manningovo n při různých vodních stavech.

Cíle

1. Nepřímé určení rychlosti proudění v korytě menšího vodního toku podle hydraulických a morfologických parametrů koryta.
2. Výpočet aktuálního, dominantního (kapacitního), případně povodňového průtoku.
3. Porovnání vypočtených hodnot rychlosti proudění a průtoku na dvou prostorově blízkých, ale morfologicky kontrastních úsecích koryta. Diskuze přesnosti nepřímých (početních) metod odhadu průtoku na neměřených tocích.

Návod pro vypracování

Obecný postup práce

1. Vyberte si středně velký vodní tok (potok, říčku) v blízkém okolí Brna, na kterém lze najít přirozené i upravené úseky koryta. Musí se jednat o tok, který je broditelný s použitím rybářských holínek. Takovým vodním tokem může být např. Veverka, Ponávka, Bobrava, aj.
2. Na zvoleném vodním toku si vyberte dva úseky - jeden přirozený a druhý upravený. Délka úseků by měla být cca 200 m.
Pozn. Úseky vybírejte tak, aby byly kontrastní z hlediska podmínek pro odtok (proudění) vody. Upravený úsek by se měl vyznačovat jednotnou šířkou, hloubkou a sklonem koryta, zrnitostně homogenními dnovými splaveninami a stálou rychlostí proudění (regulovaný úsek). Druhý úsek vyberte na místě s přirozenou morfologií.
3. V obou úsecích proveďte rekognoskační pochůzku. Na základě pochůzky nakreslete jednoduchou skicu postihující topografii koryta a příbřežní zóny (zaměřte se na

objekty, které ovlivňují rychlost odtoku vody, např. úpravy břehů a dna, příčné stavby, břehové porosty).

4. V obou úsecích zaměřte vybrané morfologické parametry koryta (příčný a podélný profil), odhadněte drsnost dna, břehů a povrchu nivy (Manningův drsnostní koeficient). Zjištěné údaje použijte k výpočtu rychlosti proudění vody a průtoku dosazením do Manningovy rovnice.
5. Porovnejte vypočítané hodnoty pro regulovaný a přirozený úsek. Diskutujte faktory, které mohly způsobit rozdíl ve vypočtených hodnotách.

Geodetické zaměření podélného a příčného profilu

A. Zaměření podélného profilu

1. Zaměření podélného profilu proveďte v úseku koryta o délce rovné alespoň 5ti násobku šířky koryta.
2. Pomocí GPS zaměřte začátek a konec nivelovaného úseku řeky.
3. V případě, že kolem koryta jsou stopy po nedávném zvýšeném vodním stavu (povodni), zanivelujte podélný sklon hladiny při kulminaci povodně. Výšku hladiny při kulminaci poznáte podle polehané trávy, drobného organického materiálu (tráva, listí, větvičky) zachyceného na keřích a stromech, naplaveného dřeva, erozních výmolů na březích či v nivě, nánosů jemných povodňových sedimentů (kal, písek) či povodňových jizev na kmenech keřů a stromů. Předem si úsek projděte a rozsah inundace si vyznačte barevným sprejem.
4. Zanivelujte podélný profil dna v proudnici, na záměrných bodech změřte aktuální hloubku vody.
5. Pro záznam údajů z nivelace použijte měřický zápisník z Přílohy 2.
6. Pro zjištění délky měřeného úseku proveďte výpočet kosinovou větou (použijte údaje z nivelace) nebo úsek změřte pásmem či laserovým dálkoměrem. Pro osvěžení paměti je kosinová věta uvedena v Příloze 3.
7. Vykreslete podélný profil a vypočtěte sklon dna, aktuální vodní hladiny a případně hladiny kulminace.

B. Zaměření příčných profilů

1. Na začátku, uprostřed a na konci úseku zanivelujte příčný (průtočný) profil korytem až po úroveň povodňové kulminace.
2. Polohu příčných profilů zaznamenejte pomocí GPS.
3. Figurant stává při nivelaci lat' tak, aby byly zachyceny všechny nepravidelnosti (zlomy) ve tvaru příčného profilu. Zaměřit je třeba i kontakt hladiny se břehem a to při obou březích (později bude využijete při stanovení omočeného obvodu).
4. Pro záznam údajů z nivelace použijte měřický zápisník z Přílohy 4.
5. V příčném profilu určete úroveň korytotvorného průtoku. Nezapomeňte si do měřického zápisníku poznamenat, kde se nacházela úroveň korytotvorného Q. Jaká vodítka v terénu použít pro nalezení úrovně hladiny za korytotvorného průtoku najdete v Příloze 5.

Vzorkování říčních sedimentů

1. V každém úseku stanovte zrnitost dnových splavenin na třech místech. (Účelem je určit drsnost dna pro další výpočty)
2. Podle hrubosti sedimentu odeberte buď objemové vzorky (jemnější materiál) nebo proveďte měření na místě gridovým vzorkováním (pebble count).
3. Hrubší vzorky změřte pomocí granulometrické tabulky nebo posuvného měřítka. Odebírejte klasty ve čtvercové síti s krokem 10 cm, měřte vždy pouze osu *b* klastu. Každý vzorek bude čítat 100 změřených klastů.
4. V případě použití granulometrické tabulky použijte k záznamu hodnot formulář z Přílohy 6.

- Jemnější vzorky odeberte do sáčku a proveďte sítování v Laboratoři environmentální geografie na Geografickém ústavu. Doporučené váhy vzorků pro jednotlivé zrnitostní frakce najdete v Příloze 7.
- Pokud budete odebírat vzorky ze sedimentárních facií různé zrnitosti, tak proveďte odhad plošného zastoupení jednotlivých facií a výslednou zrnitost vypočítejte jako vážený průměr.

Stanovení drsnosti koryta (Manningova koeficientu drsnosti)

- Před výpočtem průměrné rychlosti proudění v průtočném profilu je třeba určit vliv tření o dno, břehy, případně o povrch nivy. Drsnost těchto povrchů se kvantitativně vyjádří pomocí Manningova koeficientu drsnosti n .
- Výpočet koeficientu proveďte podle následující rovnice:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$
 n_0 až m_5 postihují různé prvky drsnosti koryta, jejich hodnoty obsahuje následující tabulka (podle Cowan, 1956 a Jarrett, 1985):

<i>Základní hodnota n, n_0 (zrnitost substrátu)</i>	
půda	0,020
skalní podloží	0,025
jemný štěrk	0,024
hrubý štěrk	0,028
kameny	0,030-0,050
balvany	0,040-0,070
<i>Nepravidelnosti povrchu, n_1</i>	
hladké koryto	0,000
malé (slabě erodované nebo prohloubené)	0,005
střední (slabé sesouvání)	0,010
velké (sesuvy, erodované břehy, skalní výčnělky)	0,020
<i>Variabilita tvaru průtočného profilu způsobující turbulenci, n_2</i>	
změna probíhá pozvolna	0,000
občasné změny z velkého na malé nebo proudnice rozkmitaná od břehu ke břehu	0,005
časté změny	0,010-0,015
<i>Působení překážek (stromy, kořeny, balvany), n_3</i>	
zanedbatelné (několik rozptýlených překážek)	0,000
malé (překážky izolované, 15% plochy)	0,010-0,015
podstatné (propojení překážek, které zabírají 15-50% plochy)	0,020-0,030
silné (překážky pokrývají > 50% plochy nebo způsobují na většině plochy turbulenci)	0,040-0,060
<i>Vegetace, n_4</i>	
žádná nebo bez efektu	0,000
ohebné semenáčky nebo hustá tráva/makrofyta	0,005-0,010
křovitý porost, žádný porost na dně koryta; makrofyta zasahující celou hloubku proudění	0,010-0,025
mladé stromy s podrostem travin a bylin; makrofyta s dvakrát vyšší než hloubka proudění	0,025-0,050
Křovitý porost na břehu, hustý porost v korytě; stromy s podrostem trav a bylin; plné olistění	0,050-0,100
<i>Křivolakost, m_5</i>	
malá (křivolakost 1,0 - 1,2)	1,00
podstatná (1,2 - 1,5)	1,15
silná (> 1,5)	1,30

- Pokud má inundační území více částí, které se výrazně liší svojí drsností, je třeba Manningovo n vypočítat pro každou tuto část zvlášť.

Výpočet rychlosti proudění a průtoku (Q) - aktuální, kapacitní a kulminační

1. Z grafů příčných profilů zjistěte následující parametry:
 - a. plochu průtočného profilu - zvláště pro aktuální vodní stav, kapacitní průtok a kulminační průtok (A)
 - b. omočený obvod (P)
 - c. vypočítejte hydraulický rádius ($R = A/P$)
2. Z nivelace podélného profilu zjistěte sklon aktuální vodní hladiny a sklon vodní hladiny za povodně ($S = \Delta H/L$), H ... převýšení úseku (m), L ... délka úseku (m).
3. Proveďte výpočet průtoku podle následující rovnice:
$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$
4. Pokud se Manningovo n počítalo zvláště pro jednotlivé části inundačního území, tak se Q počítá zvláště pro každou tuto část a pak se dílčí průtoky sečtou.

Požadované výstupy

1. Skica říčního koridoru obou říčních úseků, včetně legendy.
2. Podélné a příčné profily korytem.
3. Tabulkový přehled zaměřených a vypočítaných morfologických charakteristik obou úseků (vždy pro aktuální, dominantní a povodňový průtok): šířka koryta, maximální hloubka koryta, průměrná hloubka koryta, omočený obvod, zvláště omočený obvod pro dno, břehy a povrch nivy, plocha průtočného profilu, hydraulický rádius.
4. Tabulkový přehled Manningových koeficientů drsnosti pro dno, pravý a levý břeh a pravou a levou část nivy.
5. Vypočítané hodnoty rychlosti proudění vody za aktuálního, dominantního a povodňového průtoku v obou úsecích.
6. Vypočítané hodnoty aktuálního, dominantního a případně povodňového průtoku.
7. Diskuze (slovní zhodnocení) shody či rozdílů ve vypočítaných hodnotách rychlosti proudění a průtoků mezi oběma úseky. Rozbor faktorů, které mohly ovlivnit přesnost výpočtu.

Použité pomůcky

nivelační přístroj, rybářské holínky, granulometrická tabulka, lopatka + sáčky na odběr objemových vzorků splavenin, síťovací zařízení Retsch, laserový dálkoměr, pásmo

Doporučená literatura / informační materiály

- Knihy
 - Gordon, N.D. - McMahon, T.A. - Finlayson, B.L. - Gippel, C.J. - Nathan, R.J. (2005): Stream hydrology - an introduction for ecologists. Wiley, Chichester, 2. vydání; kap. 5.6.6. Slope-area method of estimating discharge, s. 101-104, kap. 6.6.5. Shear stress and the uniform flow equations of Chézy and Manning, s. 163-165.
 - Králová, H. (ed.) (2001): Řeky pro život - revitalizace řek a péče o nivní biotopy. Veronica, Brno; kap. 2.2. Průzkum morfologie řeky, s. 117-124, kap. 2.3. Průzkum říčního koridoru, s. 125-131.
 - Rosgen, D. (1996): Applied river morphology. Wildland Hydrology, Pagosa Springs; kap. 5. Level II: The morphological description, s. 5-1 až 5-34.
- Časopisecké články
 - Barnes, H.H. (1967): Roughness Characteristics of Natural Channels. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849, 213 s.
Dostupné na http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp_1849/html/pdf.html
 - Cowan, W.L. (1956): Estimating hydraulic roughness coefficients. Agricultural Engineering, roč. 37, s. 473-475.

- Jarrett, R.D. (1985): Determination of roughness coefficients for streams in Colorado. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4004, 54 s.
- Webové stránky
 - Webové stránky Geologické služby Spojených států amerických (US Geological Survey) zaměřené na odhad Manningova drsnostního koeficientu na příkladu upravených a přirozených toků v Illinois.
<http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/>
 - Webová stránka s pokyny k průzkumu a měření příčného profilu vodního toku od pracovníků University of Canberra, Austrálie.
<http://ausrivas.canberra.edu.au/Geoassessment/Physchem/Man/Protocol/chapter5n.html>