

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra fyzické geografie a geoekologie**

**Studijní program: Geografie a kartografie**



**Tomáš Kabelka**

**MOŽNOSTI ODVOZENÍ PRŮTOKŮ VYSOKÝCH  
VODNÍCH STAVŮ NA VYBRANÝCH PROFILECH KFGG**

**POSSIBILITIES OF DERIVATION OF DISCHARGES AT HIGH STAGES AT  
SELECTED PROFILES OF KFGG**

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: RNDr. Miroslav Šobr, Ph.D.

PRAHA 2013

## **Zadání bakalářské práce**

### **Název práce**

Možnosti odvození průtoků vysokých vodních stavů na vybraných profilech KFGG

### **Cíle práce**

Cílem práce je popsat různé metodické přístupy k výpočtu průtoků za neměřených vodních stavů a následná aplikace těchto způsobů na profilu Křemelná.

### **Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje**

Aplikace teoretických metod popsaných v rešeršní části byla provedena na profilu Křemelná. Pro výpočet průtoků byly zvoleny Chezyho a Manningova rovnice, podle formy stanovující ČSN 1070. Vypočítané průtoky byly porovnávány s hodnotami zaměřenými přístroji a byla vypočtena hodnota drsnostního součinitele, který se nejvíce blíží skutečnému průtoku. Data pro praktickou část byla získána při terénním měření pracovníky KFGG.

Datum zadání: 28. 1. 2013

Jméno studenta: Tomáš Kabelka

Podpis studenta: .....

Jméno vedoucího práce: RNDr. Miroslav Šobr, Ph.D

Podpis vedoucího práce: .....

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 20. 05. 2013

.....  
podpis

## **Poděkování**

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé práce RNDr. Miroslavu Šobrovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky a výbornou spolupráci. Děkuji také všem členům mé rodiny za všestrannou podporu při tvorbě této práce.

# **Možnosti odvození průtoků vysokých vodních stavů na vybraných profilech KFGG**

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se věnuje problematice zpětného zjišťování průtoků na vodních tocích při vysokých vodních stavech. Pro výpočet průtoků je nutné znát plochu profilu a rychlost proudění vody. Příčný průtočný profil vytvoříme ze známé maximální výšky vodní hladiny během povodně, určíme ji podle stop v terénu. Pro odvození průtoků lze použít platnou konsumpční křivku nebo metody výpočtu rychlosti proudění s použitím určitých hodnot drsnostních koeficientů, které jsou ovlivňovány přírodními podmínkami toku a jeho okolí. Poznatky popisované v odborné literatuře jsou následně aplikovány na vodní stavy zachycené v profilu řeky Křemelné na Šumavě.

**Klíčová slova:** vodní stav, průtočný profil, konsumpční křivka, Chezyho rovnice, Manningova rovnice

## **Abstract**

This bachelor thesis is dedicated to the regressive surveys on the water flow at high stages. It is necessary to know the surface profile and the velocity of water to calculate the flow rate. We will create transverse flow profile from the known maximum water level during the flood, which is determined by traces in the terrain. We can use to derive the discharge valid rating curve or the method of calculating velocity with certain values of roughness coefficients, which are influenced by natural flow conditions and its surroundings. Findings described in the literature are then applied to stages recorded in the profile Křemelná in Sumava Mountains.

**Key words:** stage, flow profile, rating curve, Chezy equation, Manning's equation

## Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK .....	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ .....	9
1. Úvod a cíl práce .....	11
2. Zjištění vodního stavu.....	12
3. Zaměření příčného profilu .....	16
3.1 Výpočet plochy profilu .....	17
3.2 Druh proudění v profilu .....	18
4. Konsumpční křivka.....	19
4.1 Úpravy konsumpční křivky .....	19
4.2 Způsoby výpočtu vysokých hodnot .....	21
4.2.1 Logaritmická extrapolace .....	21
4.2.2 Stevensova metoda .....	21
4.2.3 Manningova metoda .....	22
4.3 Nepravidelnosti při vykreslení křivky .....	23
5. Výpočet střední profilové rychlosti .....	25
6. Darcy-Weisbachova rovnice.....	29
7. Chezyho rovnice .....	32
7.1 Výpočet Chezyho koeficientu.....	34
7.1.1 Vzorec Ganguillet a Kutter .....	34
7.1.2 Bazinův vzorec .....	34
7.1.3 Pavlovského rovnice .....	36
7.1.4 Manningova metoda .....	37
7.1.5 Další hodnoty a způsoby výpočtu C .....	37
7.2 Chování koeficientu C .....	37

8. Manningova rovnice .....	39
8.1 Okolnosti ovlivňující hodnotu n .....	39
8.1.1 Drsnost povrchu .....	40
8.1.2 Vegetace.....	40
8.1.3 Nepravidelnosti koryta.....	41
8.1.4 Zakřivení toku.....	41
8.1.5 Usazování a vymílání materiálu .....	41
8.1.6 Vodní stav a průtok.....	42
8.1.7 Další vlivy.....	43
8.2 Cowanova metoda výpočtu n.....	43
8.3 Profil s různými drsnostmi.....	46
8.4 Složené koryto .....	48
9. Praktický výpočet průtoku .....	50
9.1 Příklad č. 1 .....	53
9.2 Příklad č. 2 .....	55
9.3 Příklad č. 3 .....	56
10. Diskuse a zhodnocení výsledků.....	57
11. Závěr .....	61
12. Zdroje.....	62
12.1 Internetové zdroje: .....	64
13. Přílohy.....	66

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Stopa po hladině na omítce chaty
- Obr. 2: Zaměření vodního stavu pomocí vegetace zachycené na stromě
- Obr. 3: Konsumpční křivka používající přímé hodnoty průtoku
- Obr. 4: Konsumpční křivka používající hodnoty  $\sqrt{Q}$
- Obr. 5: Hystereze konsumpční křivky
- Obr. 6:  $S_a$ ,  $S_f$  a  $S_o$  při nerovnoměrném proudění
- Obr. 7:  $S_a$ ,  $S_f$  a  $S_o$  při rovnoměrném proudění
- Obr. 8: Závislost Chezyho koeficientu  $C$  na velikosti Reynoldsova čísla  $Re$
- Obr. 9: Přírodní profil s různými drsnostmi povrchu
- Obr. 10: Složené koryto
- Obr. 11: Oblast profilu s vyznačenými body měření sklonu hladiny
- Obr. 12: Pracovníci KFGG zaměřují profil
- Obr. 13: Tvar měřeného profilu s výškou hladiny
- Obr. 14: Koryto Křemelné v měřeném profilu
- Obr. 15: Toky s koeficientem  $n = 0,038$
- Obr. 16: Hodnota  $n = 0,035$  při vodním stavu 0,86 m

## SEZNAM TABULEK

- Tab. 1: Bazinův součinitel drsnosti
- Tab. 2: Součinitele pro výpočet střední rychlosti z maximální povrchové rychlosti
- Tab. 3: Hodnoty  $k_s$  pro různé typy zdiva a betonu
- Tab. 4: Porovnání Bazinova  $m$  a Kutterova  $n$
- Tab. 5: Hodnoty  $n$  na řece Nishnabotna v závislosti na hloubce a typu vegetačního pokryvu

Tab. 6: Hodnoty  $n$  pro Cowanův vzorec

Tab. 7: Součinitele drsnosti pro koryta s relativně hrubým materiálem dna nevytvářejícím na dně útvary

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ

A	plocha průtočného profilu
C	drsnostní součinitel (Chezyho)
f	Darcy-Weisbachův faktor tření
g	gravitační zrychlení
h	hloubka toku
$k_s$	drsnostní součinitel
$l_d$	délka dna
$l_h$	délka volné hladiny
m	drsnostní součinitel (Bazinův)
n	drsnostní součinitel (Manningův, Kutterův)
$n_c$	složený drsnostní součinitel
P	omočený obvod
Q	průtok
$Q_f$	fiktivní průtok
R	hydraulický radius
$Re$	Reynoldsovo číslo
S, $S_o$	sklon hladiny
$S_a$	sklon čáry energie
$S_f$	sklon dna
T	nejvyšší bod hladiny od dna
v	rychlost
$v_p$	povrchová rychlost

$v_{pmax}$  maximální povrchová rychlost

$v_{pstř}$  střední povrchová rychlost

$\kappa, \lambda$  koeficient

## 1. Úvod a cíl práce

Povodně se neustále objevují na různých místech ve světě. Mnoho profilů má dlouholeté měřené řady průtoku. Zvláště během povodňových stavů je však obvykle nemožné měřit průtok přímo na tocích a běžné automatické měřicí přístroje jsou buď poničeny, nebo z jiných důvodů nejsou schopné zaznamenat přesný vodní stav, a proto je nutné průtok spočítat pomocí jiných způsobů.

Práce se zabývá aplikací teoretických metod výpočtu průtoků v přírodních korytech během vysokých vodních stavů. Zaměřuje se na způsoby zpětného zjištění tvaru profilu a výpočtu rychlosti proudění. Práce je rozdělena na rešeršní a praktickou část.

Cílem této práce je studium dostupné odborné literatury zabývající se problematikou výpočtu průtoků a aplikace těchto teoretických postupů v praxi na konkrétním přírodním profilu.

První část rešerše se věnuje sběru potřebných dat v terénu. Jsou zde popsány způsoby zjišťování důležitých parametrů pro následné výpočty. Nejdříve jsou uvedeny postupy zpětného zjišťování vodního stavu, na které navazují metody určování příčného profilu s výpočtem plochy průtočného průřezu. Také jsou zde charakterizovány hydraulický radius a omočený obvod.

V druhé části rešerše je popsáno možné využití konsumpční křivky při měřených vodních stavech a využití různých výpočetních vzorců pro určení rychlosti proudění, ze kterých se následně určí průtok. Vztahy počítající rychlost proudění v toku obvykle počítají s drsnostním součinitelem, jehož vliv je zde také popisován.

V praktické části jsou podle ČSN ISO 1070 aplikovány Chezyho a Manningovy rovnice pro výpočet průtoku na konkrétních datech v profilu PřF UK Křemelná (most na sever od Prášil, Šumava).

## 2. Zjištění vodního stavu

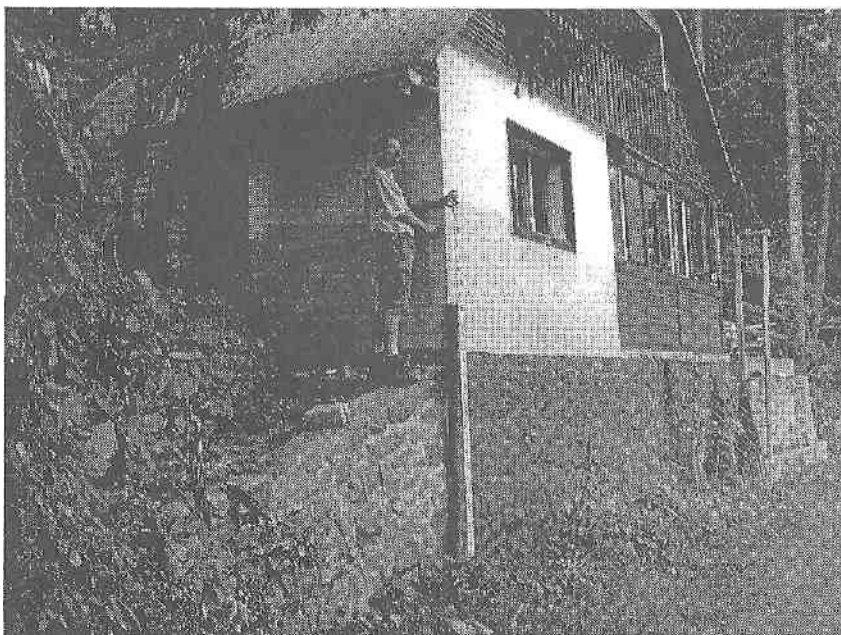
Pro vypočítání průtoku je potřeba zjistit určité údaje. Jeden z potřebných parametrů je velikost průtočné plochy. Abychom mohli vyznačit průtočný profil, potřebujeme znát výšku hladiny. Jestliže je pozorovatel v místě, kde právě protéká velká voda, je dobré zaznačit vodní stav na nějakých stabilních objektech (mosty, jiné stavby), aby ji pak mohl později přesně změřit. Pokud nejsou v místě pozorování žádné vhodné objekty, podle nichž by bylo možné stav zaregistrovat, nebo jsou nedostupné, situaci zaznamenáme alespoň fotograficky, eventuálně natočíme několik záběrů, které zdokumentují výšku vodní hladiny na několika místech. V případě, že je na toku umístěna vodoměrná stanice, určíme v ní úroveň hladiny a také zde navážeme měření vodního stavu na výšku vodočtu (Kašpárek, 2003).

Pokud se nepodařilo či nebylo možné zaznačit výšku hladiny během vysokého průtoku, zaměřujeme výšku z různých stop v okolí, které zůstaly po povodni. Čím později však zaměřujeme stopy po úrovni hladiny, tím méně jich můžeme nalézt a jejich spolehlivost se snižuje (Kašpárek, 2003).

Pro následné geodetické měření sklonu hladiny, je nutné zaznamenat výšku na více bodech podél toku. Velká pozornost se však musí věnovat částem, kde se vodní tok zužuje, např. při průtoku pod mostem, u stupňů a obdobných staveb. V těchto místech totiž dochází ke zvýšení hladiny před objektem, a proto je nezbytné co nejdůkladněji provést měření hladiny před těmito objekty i za nimi (Kašpárek, 2003).

Při označování známek výšky hladiny je třeba uvážit, zda nejsou ovlivněny vzdutím či snížením hladiny. Vzduť se objevuje v místě, kde se v proudu nachází nějaká překážka (pilíře, jezy...), přes kterou vodní tok přetéká, čímž se hladina zvyšuje. V tomto případě bude sklon hladiny nižší než sklon dna. Snížení se naopak vyskytuje v bodě, kde se nalézá nějaký stupeň, přes který voda přepadává, případně v zóně, kde se koryto rozšiřuje. V těchto situacích je sklon hladiny větší než sklon dna. V určité vzdálenosti za těmito částmi se povrch vodního toku znovu srovná a jeho sklon je stejný jako sklon dna (Jandora, Šulc, 2006).

Stop zachycených po vysokém průtoku může být velké množství s různou vypovídací hodnotou. Výška hladiny se snadno určí podle stop na omítkách různých domů (obr. 1), často i ve vnitřních částech obydlí.



Obr. 1: Stopa po hladině na omítce chaty (Kašpárek, 2003)

Další znaky jsou menší větve či různé byliny a trávy, které se zachytily na dřevních porostech (obr. 2). Ty jsou však méně spolehlivým znakem, protože je pravděpodobné, že u překážky došlo ke vzduť hladiny, když narážela na překážku. Mohlo se také stát, že větve stromů nebo keřů se mohly silným proudem ohnout, a když vysoká voda odtekla, vrátily se znovu do původní výšky. Jak vysoko voda dosahovala, mohou také označovat listy nebo jiné drobné kusy rostlin zachycené na drátěných plotech. Úroveň hladiny je možné zjistit také podle známek eroze, protože při vysokém průtoku má voda velkou unášecí schopnost. V některých skalnatých oblastech se dá určit hladina podle toho, že povrchy skal, které byly dříve zašpiněné, budou nyní očištěné. Další stopy, které můžeme při určování použít, lze nalézt i v trubicích (např. šachta vodoměrné stanice) a zatopených štolách (Kašpárek, 2003).



Obr. 2: Zaměření vodního stavu pomocí vegetace zachycené na stromě (Kašpárek, 2003)

Při určování stop je důležité zahrnout také typ proudění. Říční proudění, které se vyznačuje malou rychlostí a velkou hloubkou, znaky povrchu hladiny ovlivňovat nebude a při vysokém průtoku se s ním ani nejspíše nesetkáme. V bystřinném proudění však může být hladina toku i v rovné části řečiště poměrně variabilní. Významné rozdíly úrovně hladiny se mohou objevit v místě, kde se mění směr proudění (Kašpárek, 2003).

Ke stanovení průtočného průřezu je třeba podle ČSN ISO 1070 v době, kdy se vyhledávají povodňové značky, najít hodnověrné stopy na obou stranách toku. U známek je nutné uvést jejich pozici vzhledem k určitému základnímu bodu. Tyto polohy jsou následně zaznamenány do grafu, aby se vytvořil vizuální obraz profilu značek velkých vod. Nerovnoměrnosti v pozorovaném profilu jsou následně jasně zřetelné, což přispívá k přesnější interpretaci průtočného průřezu a sklonu při velkých vodách.

Dobrou pomůckou při zaznamenávání znaků po povodni je nivelační vodováha s laserem. Tento přístroj snadno a rychle porovnává každou stopu (i na těžko dostupných místech) a umožňuje okamžitě vyřadit ty, které jsou pochybné. Zanesení

těchto stop do výpočtů, které se obvykle dělají až s určitou časovou prodlevou, by pouze přineslo vyšší nejistotu (Kašpárek, 2003).

Hodnověrnými informátory jsou očití svědci povodně, protože zvláště v zasažených oblastech mají obyvatelé výšku hladiny krátce po povodni v dobré paměti a dokážou ji poměrně spolehlivě popsat. Podle jejich sdělení lze vytvořit i časovou posloupnost výšky hladiny. Je možné si od nich vyžádat nějaké fotografie či natočené video o postupu povodně. Informace získané ústně je vždy dobré potvrdit ještě jiným způsobem (Kašpárek, 2003).

Čím vyšší počet známek, kam až hladina dosahovala, shromáždíme v co nejkratším časovém období, tím je vyšší pravděpodobnost, že sklon správně určíme. Před konečným vyhodnocováním průtoků ještě zkontrolujeme, jestli v povodí nebyl přirozený průtok jednorázově zvýšen, protože se protrhla přehrada, hráz rybníka či jiné vodní dílo (Kašpárek, 2003).

Pro malé přírodní profily s menšími povodňovými průtoky, které sleduje PřF UK, lze nejčastěji pozorovat stopy na vegetaci, unášený materiál zachycený na různých místech podél vodního toku a také erozní činnost na stranách koryta a v inundačních oblastech.

### 3. Zaměření příčného profilu

Zjištění tvaru příčného profilu lze obvykle provést, až povodeň ustoupí a průtok se sníží na přijatelnou hranici. V profilech, které mají jednoduchý tvar (umělé kanály, mosty), lze provádět měření snadno s pomocí měřicího pásma a olovnice. Při měření složitých přírodních profilů se používají geodetické přístroje (nivelační přístroj, totální geodetická stanice), jejichž pomocí se měření provede (Kašpárek, 2003).

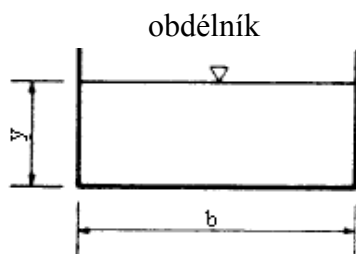
Při zjišťování tvaru příčného profilu mohou pomoci i různá plavidla opatřená ultrazvukovými zařízeními. Vyměřovací lodě a čluny stanovují hloubky vodních toků, kontrolují dno po průtoku povodňových vod, hledají překážky, které mohou být nebezpečné při plavbě a určují mocnosti sedimentačních nánosů. Profil se zjišťuje prostřednictvím ultrazvukových frekvencí, které jsou vysílány přístrojem na plavidle a po odrazu od dna jsou zachyceny přijímačem. Jestliže máme dostupnou techniku, vybavíme lodě také přístrojem na zjištění sklonu hladiny. Pokud chceme toto měření provádět během povodňového průtoku, můžeme postupovat tak, že jeden člověk chodí po mostě od jednoho břehu ke druhému a tahá člun s měřicím přístrojem, pokud to proud umožňuje. Měřicí čluny obvykle měří v rozmezí 1 – 200 m pod hladinou (Kafková, 2012). V tocích, kde je hloubka alespoň 50 cm a dovolují to přírodní podmínky, provádí pracovníci KFGG měření pomocí přístroje ADCP umístěném na plováku.

Letecké laserové skenování je další metodou jak zaměřit příčný profil. Tento způsob je založen na vysílání laserových paprsků ze skeneru, který je usazen na leteckém nosiči, a následném příjmu jejich odrazu zpět do skeneru. Výhodou oproti běžné fotogrametrii je, že se používá vlastní zdroj záření, který je nezávislý na slunečním svitu. Pro zjištění tvaru profilu je však nutné používat správné barevné zobrazení. Aby byl zřetelný povrch dna, je nezbytné použít zelenou nebo modrozelenou barvu, protože tato část barevného spektra není pohlcována vodou a proniká až ke dnu, odkud se odráží zpět. Pokud však chceme zjistit hranice vody, případně záplavová území a hranice povodňové čáry, je zapotřebí používat záření v blízkém infračerveném spektru, neboť voda absorbuje vysoké procento tohoto záření a výsledný obraz bude tedy zřetelně zobrazovat vodní plochy. Z těchto snímků lze také snadno odečíst šířku vodního toku. Ve světě se používá systém DIAL – Differential Absorption Lidar, kdy se najednou měří v infračerveném spektru, díky němuž se zjistí vodní plocha, i v zelenomodrém spektru,

kteří zjistí tvar dna. Pokud je voda čistá, lze tuto metodu využít do maximální hloubky 50 m. Obvykle se tento způsob používá na zaměřování podélných profilů vodních toků, z výsledků těchto měření však lze snadno vytvořit i jednotlivé příčné profily (Uhlířová, Zbořil, 2009).

### 3.1 Výpočet plochy profilu

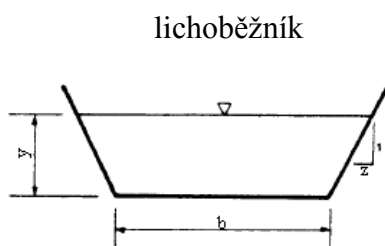
Jestliže je příčný profil jednoduchý, lze určit jeho plochu snadným vzorcem pro výpočet plochy určitého geometrického tělesa. Obvykle se takové profily objevují u revitalizovaných či jinak antropogenně ovlivněných vodních toků. Chow (1959) uvádí pro jednoduché tvary tyto vzorce pro výpočet plochy, omočeného obvodu a hydraulického radia:



$$A = by \quad (3.1)$$

$$P = b + 2y \quad (3.2)$$

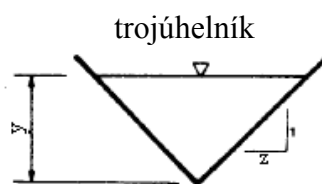
$$R = \frac{by}{b + 2y} \quad (3.3)$$



$$A = by + zy^2 \quad (3.4)$$

$$P = b + 2y\sqrt{z^2 + 1} \quad (3.5)$$

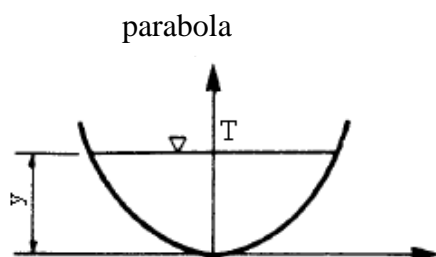
$$R = \frac{by + zy^2}{b + 2y\sqrt{z^2 + 1}} \quad (3.6)$$



$$A = zy^2 \quad (3.7)$$

$$P = 2y\sqrt{z^2 + 1} \quad (3.8)$$

$$R = \frac{zy^2}{2y\sqrt{z^2 + 1}} \quad (3.9)$$



$$A = 2/3Ty \quad (3.10)$$

$$P = T + \frac{8}{3} \frac{y^2}{T} \quad (3.11)$$

$$R = \frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2} \quad (3.12)$$

V přírodních prostředích se však většinou setkáme s nepravidelným korytem. Ve složených profilech se tedy plocha spočítá tak, že se koryto rozdělí na více pravidelnějších tvarů, u kterých spočítáme jednotlivé dílčí plochy, a sečteme je dohromady. S výpočtem plochy spočítáme i omočený obvod, což je délka celého obvodu počítané plochy bez volné hladiny (Chow, 1959).

### ***3.2 Druh proudění v profilu***

Pro aplikaci správného způsobu výpočtu bychom měli znát také způsob proudění vody v korytě. Rozlišují se dva druhy ustáleného proudění – rovnoměrné a nerovnoměrné. Rovnoměrné proudění se objevuje pouze v případech, kdy je tvar příčných profilů stejný po celé délce měřené tratě (tvar koryta v podélném profilu se nemění) a když je sklon dna neměnný. Toto proudění se obvykle objevuje jen v umělých korytech, kde se nemění jeho charakter (Chow, 1959).

U přírodních toků je běžné proudění nerovnoměrné, protože každé zvětšení či zmenšení koryta, změna sklonu dna nebo překážka v toku má vliv na průběh hladiny, a tím se upraví také průtočná plocha a sklon čáry energie. S tím se také pojí možnost postupné či jednorázové změny koryta v podobě erozní a akumulární činnosti (Chow, 1959).

## 4. Konsumpční křivka

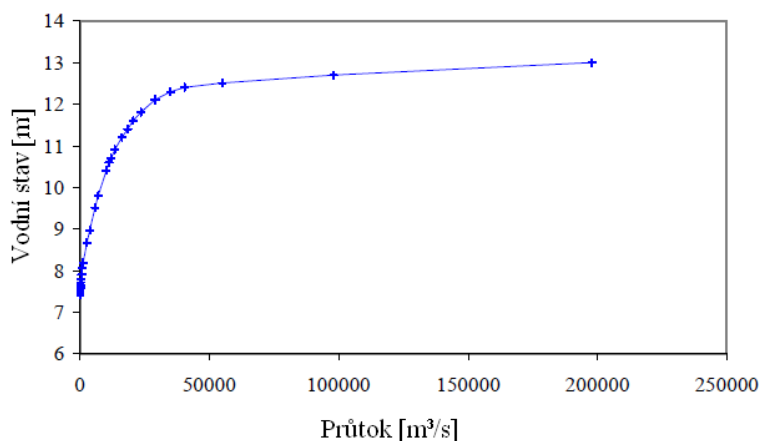
Při vysokých vodních stavech je obtížné zjistit rychlost proudění a tedy správně odhadnout průtok. V praxi se v měřicích stanicích na vodních tocích průběžně zaznamenává vztah mezi průtokem a vodním stavem. V delším časovém období se hodnoty postupně upřesňují podle různých změn podmínek v částech toku nebo podle charakteru a tvaru dna. V nepravidelných intervalech, během čtvrtletí, hydrologové zjišťují vodní stav a následně i přesný průtok, když do vzorců pro vypočtení průtoku dosadí hodnoty rychlosti proudění evidované v celém průřezu v úzce rozmístěných intervalech (Fenton, 2005).

Naměřený údaj je jeden z bodů vykreslených v grafu konsumpční křivky, kde se na y ose znázorňuje vodní stav a na x ose jsou hodnoty průtoku. Z co největšího počtu naměřených hodnot se následně vykreslí křivka. Dále se předpokládá, že pro jakýkoliv vodní stav stačí běžné periodické měření, ze kterého se odečítá průtok. Tyto hodnoty jsou následně sbírány pracovníky nebo se odesílají do centrálního datového orgánu, kde automaticky probíhají různé výpočty dalších veličin (Fenton, 2005).

Český hydrometeorologický ústav na webových stránkách uvádí, že pracovníci podle platných konsumpčních křivek zpracovávají průměrná časová měření průtoků (hodinové, denní, měsíční, roční) a také rychlé kulminační průtoky. Protože však jsou křivky zhotoveny na základě měření v odlišných dobách, ukazují pouze minulost, a proto se musí průběžně korigovat podle známých údajů o povodí a podle situací, při nichž byla vytvořena počáteční data. Tyto posudky je nutné vypracovat pro každou stanicí zvlášť. Naměřená data jsou porovnávána s různými stanicemi z celého povodí. Pro revizi, zda je konsumpční křivka platná i po delším časovém období a odvozované hodnoty podle ní jsou odpovídající, se konají měření společně s pracovníky z okolních stanic.

### 4.1 Úpravy konsumpční křivky

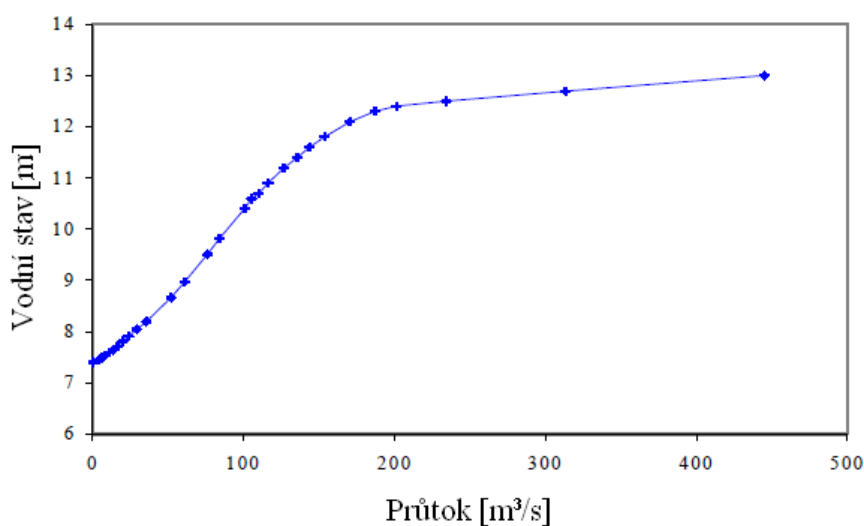
V některých tocích se může stát, že křivka v oblasti malých průtoků bude téměř vertikální a naopak pro vysoké průtoky horizontální. Jak je vidět na obr. 3.



Obr. 3: Konsumpční křivka používající přímé hodnoty průtoku (upraveno Fenton, 2005)

Jeden ze způsobů jak vyřešit problém křivky, která má velký rozsah, je použít logaritmované hodnoty. Ačkoliv tato úprava nemá žádný fyzikální základ a má řadu praktických obtíží, byla doporučena Australskou a Mezinárodní standardizační organizací pro využívání v praxi (Fenton, 2005).

Nabízí se však ještě další úprava dat pro lepší vykreslení křivky, ze které se budou hodnoty průtoku snadněji odečítat. Na obr. 4 vidíme, že když vytvoříme odmocniny z původně naměřených údajů, tvar křivky se v nízkých i vysokých hodnotách výrazně změní a celkový tvar bude pro následné použití mnohem přehlednější:



Obr. 4: Konsumpční křivka používající hodnoty  $\sqrt{Q}$  (upraveno Fenton, 2005)

## **4.2 Způsoby výpočtu vysokých hodnot**

Při vytváření konsumpční křivky se musíme vyrovnat s některými překážkami. Během povodňových událostí je konsumpční křivka odvozená z předchozích měření téměř vždy překročena. Hydrologové odpovědní za měření na řekách by měli provádět stanovené pokusy během kulminací povodní, zvláště ve stanicích, kde je hodnocení při vysokých průtocích nejisté. V praxi se objevují různé techniky, aby mohl být posouzen průtok při vysokých vodních stavech za hranicí měřených hodnot konsumpční křivky. Kromě toho si musíme uvědomit, že všechny úpravy jsou platné pouze pro stejný tvar průřezu a stejné drsnosti na dně a stranách toku (Shaw, 1994).

### **4.2.1 Logaritmická extrapolace**

Občas jsou hodnoty vytvořeny pomocí extrapolace křivky. Pokud se musí extrapolace udělat, je vhodné provádět ji s velkou pozorností, protože proudění v místech nad běžnými okraji vodního toku a tvar těchto míst se může výrazně měnit (Fenton, 2007). V okamžiku, kdy by měla extrapolace překročit 20 % největšího naměřeného průtoku, tak by měly být pro kontrolu extrapolovaných hodnot použity ještě další metody. Pro výpočet vyšších průtoků lze aplikovat lineární rovnici, která se hodí pro logaritmovanou konsumpční křivku. I v tomto případě zkontrolujeme výsledky pomocí jiné metody (Shaw, 1994).

### **4.2.2 Stevensova metoda**

Extrapolaci konsumpční křivky lze také provést pomocí empirického Chezyho vzorce (nebo použít jiný vzorec zahrnující tření vody) pro výpočet proudění v otevřeném korytě (Francis a Minton, 1984). Za podmínky rovnoměrného proudění bude rovnice vypadat takto:

$$Q = Av = AC\sqrt{(RS_0)} \quad (4.1)$$

kde  $v$  je celková střední rychlost v kanále,  $R$  je hydraulický průměr,  $S_0$  je sklon dna a  $C$  je Chezyho koeficient.

R je zjištěno pro požadované vodní stavy vztahem:

$$R = A/P \quad (4.2)$$

kde A a P je dáno příčným průřezem. Pokud  $C\sqrt{S_0}$  je považováno za konstantu k, pak průtok Q bude oproti vztahu  $kA\sqrt{R}$  znázorněn jako přímka. Pro změřené hodnoty vodních stavů, jsou odpovídající hodnoty  $A\sqrt{R}$  a Q získány a vykresleny. Prodloužená přímka následně může být použita, aby ukázala průtoky pro vyšší stavy. Metoda vychází z předpokladu, že C zůstává konstantní pro všechny stavy (Shaw, 1994).

### 4.2.3 Manningova metoda

Tuto metodu používáme místo Chezyho vzorce pro prodloužení křivky, ale má také širší uplatnění v technické praxi pro výpočet proudění. Vzorec, kde hodnoty jsou v jednotkách SI, má tvar:

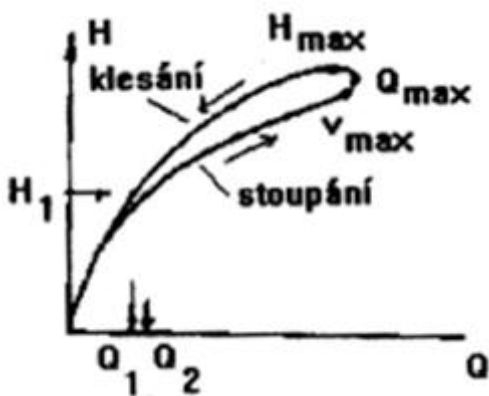
$$Q = Av = \frac{AR^{2/3}S_0^{1/2}}{n} \quad (4.3)$$

Aplikuje se podobným způsobem,  $S_0^{1/2}/n$  se předpokládá konstantní, a Q, které je znázorněno proti  $AR^{2/3}$ . Ve Stevsově a Manningově vzorci, kdy povodňový průtok překročí hranici obvyklého koryta a rozlije se do inundačních prostor, se může koeficient drsnosti, C nebo n, změnit, a tedy odtokové poměry a vysoké průtoky v oblasti údolní nivy budou počítány pomocí pozměněných rovnic. Je všeobecně přijímáno, že Manningova rovnice je lepší než Chezyho rovnice, protože n se mění méně než C a R (Shaw, 1994).

Odhady povodňových průtoků na strategických místech podél řeky jsou obvykle vytvořeny metodou založenou na Manningově rovnici. Po významných povodních mohou inspektoři měřit požadovanou plochu průřezu, omočený obvod a sklon dna zasažené oblasti. Nejvyšší bod hladiny vody se posuzuje z trosek nebo jiných povodňových značek. Následuje výběr vhodné hodnoty n pro drsnost dna kanálu a vypočtení odhadovaného vrcholu průtoky. Pro použití této techniky jsou zapotřebí značné znalosti, protože platnost vzorce závisí na povaze toku a odpovídajícímu sklonu hladiny (Shaw, 1994).

### 4.3 Nepravidelnosti při vykreslení křivky

Vzhledem k tomu, že hodnota průtoku závisí nejen na výšce vodní hladiny, ale také na jejím sklonu, je nutné si uvědomit, že sklon není neustále stejný, ale výrazně se mění především v případech vysokých povodňových průtoků. V měřicích stanicích se za neustáleného proudění v určitém okamžiku objeví pro stejný vodní stav dvě rozdílné hodnoty průtoku (Shaw, 1994). V době průchodu vysokého průtoku zkoumaným profilem při zvyšování hladiny toku nejdříve nastane největší sklon, vzápětí se objevuje největší rychlost, dále nejvyšší hodnota průtoku a nakonec je zaměřen vrcholný vodní stav. Během ústupu povodňové vlny je při shodném vodním stavu menší sklon než při jejím nástupu, proto pak konsumpční křivka na svém konci tvoří smyčku. Pro jednu hodnotu vodního stavu jsou vykresleny dvě hodnoty průtoku – hystereze (obr. 5). Odhad chyby v průtoku po kulminaci povodňové vlny se pohybuje v rozsahu +/- 10 % (Starý, 2005). Pokud řeka udržuje stálý průtok, je možné tyto dvě hodnoty zprůměrovat a výsledek považovat za relevantní. V ostatních případech však hodnoty naměřené v obou fázích necháváme a smyčka na konci křivky zůstává (Shaw, 1994). Pro odstranění tohoto problému by bylo vhodné měřit sklon, stejně jako vodní stav (Fenton, 2005).



Obr. 5: Hystereze konsumpční křivky (Kemel, 2000)

Další nesrovnalosti ve vztahu průtoku a vodního stavu bývají způsobeny nerovnoměrným prouděním. Břežní vegetace v místě měření bude mít také vliv na závislost průtoku na vodním stavu, proto je vhodné mít vytvořené odlišné konsumpční křivky pro různá roční období. Stálé porušování původního stavu nastává změnou v průřezu původního koryta vzhledem k vyplavování či ukládání unášeného materiálu.

Pokud hladina vystoupila z běžného koryta a došlo k zaplavení údolní nivy, je také ovlivněn vývoj křivky v oblasti vysokých průtoků (Shaw, 1994).

Zda je konsumpční křivka platná, je tedy závislé na stálosti hydraulických vlastností v určité části vodního toku a je také omezena časově (viz letní a zimní období). Dříve než nějakou křivku začneme používat, měli bychom ověřit její platnost (Starý, 2005).

## 5. Výpočet střední profilové rychlosti

V případě, že známe pouze maximální rychlost na povrchu hladiny, zjištěnou z nějakého záznamu, můžeme použít relativně jednoduchou metodu výpočtu, kde jsou platné následující vztahy:

$$v = \kappa v_{p \max} \quad (5.1)$$

Jestliže máme záznam, ze kterého jsme měli možnost určit  $n$  povrchových rychlostí  $v_p$  v různých místech měřeného profilu, lze spočítat střední povrchovou rychlost a od ní následně odvodit střední rychlost  $v$  pomocí vztahu:

$$v = \lambda v_{p \text{stř}} \quad (5.2)$$

$$v_{p \text{stř}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{pi} \quad (5.3)$$

Konstanty  $\kappa$  a  $\lambda$  se zjišťují pro jednotlivé měřené profily z předchozích hydrometrických měření. Jestliže konstanty neznáme a ani není možnost zjistit jejich hodnotu z dřívějších měření, je možné použít jejich doporučené odhady z tab. 2 (Mattas, 1998).

Ve své práci Dub (1957) udává pro zjištění koeficientu  $\kappa$  několik způsobů. Jedna z možností je určení dle Bazina, které udává vztah maximální povrchové rychlosti  $v_{p \text{stř}}$  a střední profilové rychlosti  $v$ :

$$\frac{v}{v_{p \max}} = \left(1 + \frac{14}{C}\right)^{-1} \quad (5.4)$$

$C$  značí v tomto vzorci Chezyho drsnostní součinitel, který by měl být v tomto případě také spočítaný podle Bazina:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \quad (5.5)$$

koeficient  $m$  je Bazinův součinitel drsnosti, jenž je značně odlišný od nyní obvykle používaného Manningova koeficientu drsnosti (Mattas, 1998),

Tab. 1: Bazinův součinitel drsnosti  $m$  (Mattas, 1998)

Druh povrchu	$m$
Velmi hladké stěny (hoblovaná prkna, hladká cementová omítka ...)	0,06
Hladké stěny (nehoblovaná prkna, kvádrové a cihelné zdivo, betonové a litinové roury, velmi dobrý beton ...)	0,16
Nikoliv hladké stěny (dobré zdivo z lomového kamene, průměrný beton ...)	0,46
Středně drsné (hrubé zdivo z lomového kamene, velmi hrubý beton na skále, dlažba, svahy v pevné půdě, stěny čistě vysekané ve skále, ...)	0,85
Zemní svahy v normálním stavu (vč. dlážděných, avšak poněkud zarostlých)	1,30
Zemní koryta s velkým odporem se značným množstvím vodních rostlin, s kamenitým dnem s valouny nebo velkými oblázky	1,75

Druhý způsob jak určit koeficient  $\kappa$  je pomocí hloubky proudění, kde se počítá  $\kappa = 2/3$  pro střední hloubky do 1 m, případně  $\kappa = 3/4$  pro hloubky větší než 1 m (Dub, 1957). Také je možné určit koeficient podle charakteru dna a použít hodnoty z tab. 2.

Tab. 2: Součinitele pro výpočet střední rychlosti z maximální povrchové rychlosti (Mattas, 1998)

Charakter koryta	$\kappa$
Dřevo, beton, dlažba	0,70-0,90
Hlína, písek	0,65-0,83
Dno z uloženého štěrku	0,62-0,75
Drsné, zarostlé koryto	0,40-0,50

Pro koeficient  $\lambda$  se v různé literatuře udávají rozdílné hodnoty. Dub (1957) uvádí rozmezí  $\lambda = 0,80-0,85$ . Průvodce pro hydrologická cvičení (1975) uvádí pro toky

s malými hloubkami a pomalým prouděním  $\lambda = 0,75-0,85$  a pro hluboké toky, které mají pravidelné koryto a vyšší rychlosti nad 2 m/s  $\lambda = 0,90-0,96$ . Další autoři nabízí  $\lambda = 0,80-0,95$  (Bliznjak, 1952) a pro velké toky rozsah  $\lambda = 0,84-0,87$  (Luščeva, 1951).

Pro zjištění tohoto koeficientu udávají ruští autoři také vzorce odvozené Železňakovem. Tyto vztahy se aplikují, aby se opravil tzv. fiktivní průtok  $Q_f$ , což je průtok zjištěný na bázi příčného profilu a rychlosti povrchového proudění zjištěného ve více místech, na skutečný průtok  $Q$  (takže  $Q = \lambda Q_f$ ). Zde je zapotřebí považovat střední povrchovou rychlost  $v_{pstř}$ , ne za průměrnou rychlost na povrchu, ale za  $v_{pstř} = Q_f/S$  (Mattas, 1998)

Blizňak (1952) uvádí tento vztah:

$$\lambda = 1 - \frac{5,8}{v_{pstř}} \sqrt{hS} \quad (5.6)$$

$h$  označuje střední hloubku řeky a  $S$  značí sklon povrchu. Dále udává další vzorec:

$$\lambda = 1,5 - 0,5 \frac{v_{p\max}}{v_{pstř}} \quad (5.7)$$

Zároveň ale varuje, že pro menší toky může mít koeficient  $\lambda$  vysokou variabilitu s hodnotami v rozsahu 0,3-0,9.

Další Železňakovův vzorec udává Luščeva (1951):

$$\lambda = \frac{C}{C+6} \quad (5.8)$$

Tento vzorec je uplatňován především pro toky v nížinných oblastech, oproti vzorci 5.9, jenž se používá pro horní části toků:

$$\kappa = \frac{C}{1,34C+6} \quad (5.9)$$

Je třeba zmínit, že však vzorec 5.9 je platný pro vztah střední průřezové rychlosti a maximální povrchové rychlosti, tedy se nezjišťuje koeficient  $\lambda$ , ale koeficient  $\kappa$ . V předchozích vzorcích značí  $C$  Chezyho koeficient.

Luščeva (1951) přisuzuje vzorcům, které odvodil Železnakov tyto hraniční hodnoty, pro které mají platnost:

- průtok = 1,75 - 8320 m<sup>3</sup>/s
- sklon = 0,000037° - 0,00827°
- střední hloubka = 0,36 - 7,77 m
- délka volné hladiny = 7,10 - 1001 m

Tyto výpočetní vztahy jsou platné za podmínky téměř ustáleného proudění, proto není možné je používat v místech vzduť, v oblastech jezů a podobných územích (Mattas, 1998).

## 6. Darcy-Weisbachova rovnice

Darcy-Weisbachova rovnice byla původně vytvořena pro výpočet průtoku v uzavřených kanálech a potrubích (Chow, 1959). Aby byla rovnice platná pro otevřená koryta, vyměníme původní hodnotu  $d_0$  (průměr potrubí) za čtyřnásobný hydraulický radius –  $4R$  (pro potrubí s průtokem  $A = \pi d_0^2/4$ ,  $P=\pi d_0$ , a tak  $R=A/P=d_0/4$ ). Výsledný tvar rovnice tedy vypadá takto:

$$S_f = \frac{fv^2}{R8g} \quad (6.1)$$

kde  $f$  je bezrozměrný faktor nazývaný koeficient tření. Velikost tohoto koeficientu je závislá na tom, zda je proudění laminární, v hydraulicky hladkém či drsném prostředí, přechodné nebo turbulentní. V literatuře zabývající se mechanikou kapalin nalézáme tabulku nazývanou Moodyho diagram, z něhož lze zjistit třecí faktor pro různé povrchy potrubí. Přestože přímo pro otevřená koryta není žádný takový diagram vytvořen, můžeme tento koeficient spočítat podle následujících rovnic (Henderson, 1966).

Pro laminární proudění

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (6.2)$$

Pro proudění s hladkým povrchem dna, kde  $R_e < 100\,000$

$$f = \frac{0,316}{R_e^{0,25}} \quad (6.3)$$

Pro proudění s hladkým povrchem dna, kde  $R_e > 100\,000$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2,5}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (6.4)$$

Pro přechodné proudění

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k_s}{12R} + \frac{2,5}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (6.5)$$

Pro turbulentní proudění

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k_s}{12R} \right) \quad (6.6)$$

$K_s$  je parametr, který vyjadřuje charakter drsnosti povrchu. Jeho hodnoty pro různé povrchy jsou uvedeny v tab. 3 (Henderson, 1966).

Další vzorce pro výpočet  $f$ , které uvádí Henderson (1966):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{k_s}{14,83R} \right) \quad (6.7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{0,56 \lambda^{0,9} R}{k_s} \right) \quad (6.8)$$

Ačkoliv má Darcy-Weisbachův vzorec určitý teoretický základ, v praxi je pro výpočet průtoku v otevřených korytech používán zřídka. Hlavním důvodem je pravděpodobně to, že aplikace rovnic uvedených pro  $f$  vyžaduje sérii různých pokusů, s užitím metody pokus – omyl (musíme znát  $R$  případně  $R_e$ , abychom zjistili  $f$ , ale  $R$  a  $R_e$  je závislé na  $f$ ). Tyto rovnice však ukazují, že viskozita je dominantním rysem průtokového odporu při nízkých hodnotách Reynoldsova čísla, zatímco drsnost povrchu ovlivňuje průtokový odpor v turbulentním toku. Reynoldsovo číslo udává vztah odporu prostředí a vnitřního tření. Je to bezrozměrná konstanta, podle které určujeme, zda je proudění laminární, turbulentní nebo přechodné. Pro toky s hrubým povrchem na rozdíl od potrubí není koeficient tření konstantní pro dané koryto a záleží na hydraulickém poloměru, stejně jako na drsnosti dna kanálu (Akan, 2006).

Tab. 3: Hodnoty  $k_s$  pro různé typy zdiva a betonu (Henderson, 1966)

Povrch	$k_s$
Beton 4. třídy (monolitické, ocelové konstrukce bez nerovností)	0,0005
Povrchy omítnuté velmi hladkým cementem	0,001
Litý beton v mazaných ocelových formách	0,0016
Dřevem obložené potrubí, hoblované dřevěné žlaby a beton 3. třídy, hladké hlazené povrchy (glazované kanalizační potrubí)	0,002
Beton 2. třídy (monolitické konstrukce v hrubých formách nebo hladce nastříkaný cementový povrch – torkret), glazované zdivo	0,005
Krátké betonové potrubí malého průměru bez zvláštních spojů	0,008
Beton 1. třídy (prefabrikované trubky s maltou v kloubech), rovné, homogenní přírodní kanály	0,01
Drsné betonové žlaby	0,014
Lomové zdivo	0,02
Neupravený torkret	0,01-0,03

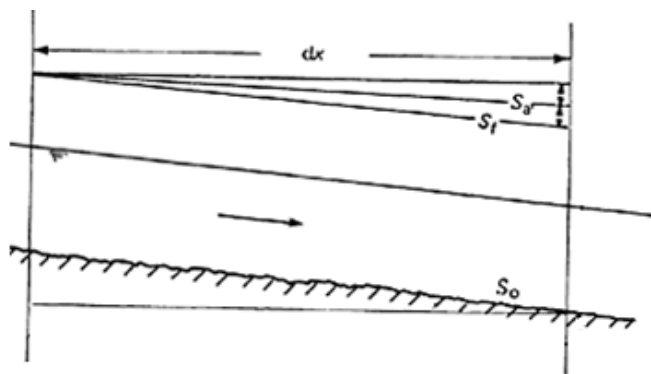
## 7. Chezyho rovnice

Tuto rovnici vytvořil v roce 1768 francouzský inženýr Antoine Chezy při navrhování systému kanálů pro zásobování Paříže vodou (Henderson, 1966; Chow, 1959). Tato rovnice vypočítává rychlost proudění a platí pro nerovnoměrné, ustálené proudění:

$$v = C\sqrt{RS_f} \quad (7.1)$$

kde  $C$  je Chezyho koeficient drsnosti, který závisí na různých přírodních faktorech,  $R$  značí hydraulický poloměr, což je plocha průřezu dělená omočeným obvodem ( $R=A/P$ ), a  $S_f$  je sklon přímky energie, která je potřebná k překonání odporu tření v kapalině (Shaw, 1994). Omočený obvod je část průtočného profilu, kde dochází ke kontaktu vody s pevným materiálem břehů a dna. Tření významně ovlivňující rychlost se objevuje právě v těchto místech, tření o vzduchové hmoty je v porovnání nedůležité, a proto se volný povrch hladiny nezapočítává do omočeného obvodu. Na rozdíl od tlakových potrubí jsou výška hladiny v otevřených korytech a také velikost průtočného profilu závislé na průtoku (Jandora, Šulc, 2006).

Jak je znázorněno na obr. 6, sklon dna  $S_o$ , sklon hladiny  $S_a$  a sklon čáry energie  $S_f$  se při nerovnoměrném proudění nerovnají (Jandora, Šulc, 2006).

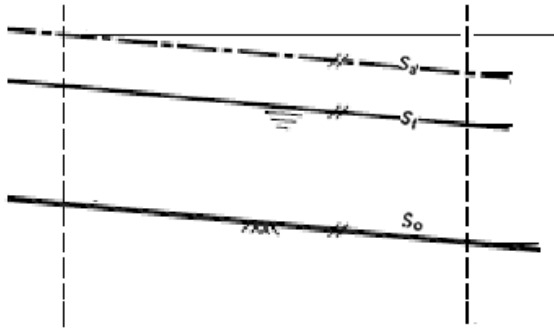


Obr. 6:  $S_a$ ,  $S_f$  a  $S_o$  při nerovnoměrném proudění (upraveno - Shaw, 1994)

Místo rovnice 7.1 jsme pro rovnoměrné proudění získali následující rovnici:

$$v = C\sqrt{RS_o} \quad (7.2)$$

Rovnice 7.1 pro rovnoměrné a 7.2 pro nerovnoměrné proudění jsou velmi podobné. Při nerovnoměrném proudění však používáme sklon čáry energie  $S_f$  a pro rovnoměrné proudění sklon dna  $S_o$  (které má v tomto případě stejnou hodnotu jako  $S_f$  a  $S_a$ )



Obr. 7:  $S_a$ ,  $S_f$  a  $S_o$  při rovnoměrném proudění (upraveno - Jandora, Šulc, 2006)

Jandora a Šulc (2006) uvádějí řešení nerovnoměrného proudění pomocí metody po úsecích. Zde je uveden vztah pro výpočet  $S_f$ , který označují za nejvhodnější, protože i v extrémních podmínkách udává stejné výsledky:

$$S_f = \frac{Q^2}{S_o^2 C^2 R} \quad (7.3)$$

$$S_o = \frac{S_{oj} + S_{oj+1}}{2} \quad (7.4)$$

$$C = \frac{C_j + C_{j+1}}{2} \quad (7.5)$$

$$R = \frac{R_j + R_{j+1}}{2} \quad (7.6)$$

V těchto případech se sčítají vždy dva sousední profily.

## 7.1 Výpočet Chezyho koeficientu

### 7.1.1 Vzorec Ganguillet a Kutter

Ganguillet a Kutter vytvořili vzorec vyjadřující hodnotu C z hlediska sklonu hladiny S, hydraulického poloměru R a koeficientu drsnosti n. Vzorec byl původně sestaven v angloamerické měrné soustavě IU (Chow, 1959):

$$C = \frac{41,65 + \frac{0,00281}{S} + \frac{1,811}{n}}{1 + \left(41,65 + \frac{0,00281}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (7.7a)$$

pro metrickou soustavu se udává tvar (Mara, Sleight, Taylor, 2001):

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (7.7b)$$

Koeficient n v této rovnici je známý jako Kutterův koeficient drsnosti. Vzorec byl odvozen z měřených průtokových dat v kanálech různých typů, také byla použita Bazinova měření, měření mnoha evropských řek a řeky Mississippi. Ačkoliv je práce s vzorcem 7.7 náročná, jeho výsledky jsou obvykle uspokojivé (Chow, 1959).

V rámci běžných rozsahů sklonu a hydraulických poloměrů je zjištěno, že hodnoty Manningova a Kutterova n jsou početně velmi blízko. Pro praktické účely mohou být obě hodnoty považovány za shodné, když je sklon roven nebo větší než 0,0001 a hydraulický poloměr v rozsahu 1-30 stop (0,3-9,1 metrů). Typické hodnoty vhodné pro oba drsnostní součinitele jsou uvedeny v tabulce 9 v příloze (Chow, 1959).

### 7.1.2 Bazinův vzorec

V roce 1897 navrhl francouzský hydrolog H. Bazin vzorec, podle kterého je Chezyho C vztaheno k hydraulickému rádiu R, ale neuvažuje sklon S. V anglických jednotkách je

tato rovnice vyjádřena takto (Chow, 1959):

$$C = \frac{157,6}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \quad (7.8)$$

v soustavě SI má tato rovnice tvar uvedený rovnicí 5.5, kde koeficient m je hodnota drsnosti povrchu, jejíž hodnoty jsou navrženy Bazinem (tab. 1).

Bazinův vzorec byl vyvinut především z údajů shromážděných z malých experimentálních toků, a proto je jeho užívání méně uspokojivé než vzorec 7.3. Úřad pro ochranu vod v Miami provedl studii (Houk, 1918) srovnávající změnu v Chezyho koeficientu C v závislosti na použití Bazinova m nebo Kutterova n na experimentálních Bazinových datech a v několika dalších přírodních tocích. Výsledky získané z této studie jsou uvedeny v tab. 4. Hodnoty průměrné změny naznačují, že Bazinova rovnice není tak spolehlivá jako rovnice 7.7 ani pro jeho vlastní naměřené hodnoty (Chow, 1959).

Tab. 4: Porovnání Bazinova m a Kutterova n (Chow, 1959)

Měření	Průměrné hodnoty			Průměrná odchylka		
	C	m	n	C	m	n
Bazinova měření 6		0,185	0,0127		5,2	1,1
Bazinova měření 7		0,156	0,012		3,4	1
Bazinova měření 8		0,142	0,0116		3,8	2,5
Bazinova měření 9		0,199	0,13		10,6	1,2
Bazinova měření 10		0,144	0,0117		3,4	1,5
Bazinova měření 11		0,129	0,0112		3,7	3,8
Bazinova měření 12		0,324	0,0151		1,6	1
Bazinova měření 13		0,311	0,0148		2,7	1,2
Bazinova měření 14		0,321	0,015		4,4	1,8
Bazinova měření 15		0,715	0,0209		4,2	1,2
Bazinova měření 16		0,711	0,0212		5,7	1,6
Bazinova měření 17		0,721	0,0215		6,7	2,2
Bazinova měření 32		0,424	0,168		1,8	0,4
Bazinova měření 33		0,444	0,0171		3,1	1,2
Bazinova měření 44		0,658	0,0195		18,6	8,8

Tab. 4: Porovnání Bazinova m a Kutterova n – pokračování z předchozí strany (Chow, 1959)

Bazinova měření 46		0,704	0,0205		11,1	5,7
Miami u Tadmoru, Ohio, 1915-1916	67,4*	1,98	0,0316	4,08	10,9	4,9
Bogue Phalia, Miss., 1914	63,3*	4,09	0,0704	25,2	35,7	22,2
Arkansaský odpadní kanál, Ark., 1915	65,9*	2,12	0,0324	3,18	4,8	1,6
Mississippi, Carrolton, La., 1912		1,33	0,032	1,3	5,4	3
Mississippi, Carrolton, La., 1913		1,46	0,0334	2,8	12,8	2,8
Iravadi, Barma		1,35	0,0332	4,1	23	6,2
Volha u Samary, Rusko		1,58	0,0311	1,87	13	4,1
Volha u Zhiguly, Rusko		1,76	0,0363	18,8	36,5	5
Celková průměrná odchylka				7,54	9,67	3,58

\* Střední hodnoty dle autora studie

### 7.1.3 Pavlovského rovnice

V Rusku je běžně používán vztah navržený Pavlovským, který odvodil z výsledků mnoha svých vlastních i cizích měření v různých profilech a místech (řeky, náhony, potrubí). Vytvořil tento tvar (Chaundry, 2008, Jandora, Šulc, 2006, Chow, 1959):

$$C = \frac{1}{n} R^y \quad (7.9)$$

kde

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1) \quad (7.10)$$

Exponent y závisí na koeficientu drsnosti a hydraulickém poloměru. Tento vzorec platí pro R mezi 0,1 a 3,0 m a pro n mezi 0,011 a 0,04. Pro praktické účely jsou obecně navrženy následující formy rovnice:

$$y = 1,5\sqrt{n} \text{ pro } R < 1 \text{ m} \quad (7.11)$$

$$y = 1,3\sqrt{n} \text{ pro } R > 1 \text{ m} \quad (7.12)$$

### 7.1.4 Manningova metoda

V praxi není při obvyklých situacích velké rozmezí hodnot exponentu  $y$  z Pavlovského rovnice. Dosadíme-li tedy střední hodnotu  $y=1/6$ , získáme Manningovu rovnici (Jandora, Šulc, 2006):

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (7.13)$$

### 7.1.5 Další hodnoty a způsoby výpočtu C

Následující vzorce uvádí ve své publikaci Simons a Senturk (1992):

$$C = \frac{8}{\sqrt{f}} \quad (7.14)$$

$$C = 42 \log \frac{R}{n} \quad (7.15)$$

$$C = 100 \left( \frac{R}{n} + R \right)^{1/2} \quad (7.16)$$

## 7.2 Chování koeficientu C

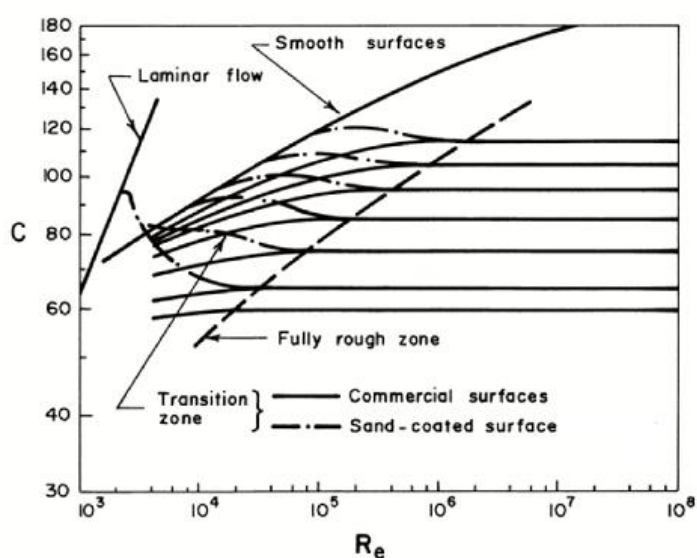
Lze očekávat, že Chezyho koeficient  $C$  závisí, podobně jako Darcyho koeficient  $f$ , kromě drsnosti povrchu také na Reynoldsově čísle a tvaru profilu. Zatímco chování  $f$  při průtoku v potrubí bylo důkladně popsáno, podobné výzkumy, které by dokonale charakterizovaly chování  $C$  v otevřených korytech, dosud nebyly provedeny. Je to nejen proto, že dodatečné proměnné podílející se v případě otevřeného kanálu jsou v praxi v extrémně širokém rozsahu velikostí, drsnosti povrchu a typů, ale také proto, že je obtížné dosáhnout plně rozvinutého ustáleného rovnoměrného toku mimo laboratoře (Henderson, 1966).

Tyto důvody jsou uvedeny ve studii o třech faktorech v otevřených kanálech sponzorované americkou společností stavebních inženýrů (Report A.S.C.E.). Z tohoto a dalších zdrojů se také zdá, že účinek tvaru průřezu je malý, alespoň v mezích přesnosti běžně uznávaných v praxi. Z toho vyplývá, že chování  $C$  může být dokázáno přímo z chování Darcyho  $f$  odvozeného ze vztahu (Henderson, 1966):

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (7.17)$$

Tento závěr pro přírodní koryta je však přípustný pouze za předpokladu, že parametry kanálů jsou v rozmezí obvyklých hodnot v potrubí a jsou vyzkoušené během experimentů, v praxi se to týká malých kanálů a hladkých povrchů, jako jsou např. kov, beton nebo zdivo (Henderson, 1966).

Vzhledem ke známým parametrům toku a povrchové drsnosti hranic kanálu lze hodnotu koeficientu odporu zjistit z upraveného Moodyho diagramu (Henderson, 1966). Na obr. 8 je znázorněn diagram, kde je zakresleno  $C$  místo  $f$ . Tento diagram je rozdělen do tří oblastí: laminární proudění (laminar flow), přechodné (transition zone) a turbulentní. Zobrazuje také vztah k typu povrchu - hladký (smooth surface) nebo drsný (fully rough zone). Průtok může být považován za laminární, i když je povrch kanálu drsný. Tato situace nastává za předpokladu, že oblast s vyšší povrchovou drsností je překryta vrstvou laminárního proudění. Když se Reynoldsovo číslo zvýší, tloušťka této vrstvy se sníží a vliv drsnosti podloží se stane významnějším. Následkem toho se proudění dostane do přechodné zóny. Pokud spodní vrstva není dostatečně viskózní a nenastává laminární proudění, může být proudění klasifikováno jako turbulentní (Chaudhry, 2008).



Obr. 8: Závislost Chezyho koeficientu  $C$  na velikosti Reynoldsova čísla  $Re$  (Chaudhry, 2008)

## 8. Manningova rovnice

Ve snaze dát do vzájemného vztahu a systematizovat stávající data z přírodních a umělých kanálů navrhl irský inženýr Robert Manning rovnici pro výpočet rychlosti proudění (Simons, Senturk, 1992). Poprvé představil vzorec 4. prosince 1889 na zasedání Instituce stavebních inženýrů Irska. Jeho rovnice byla vytvořena ze sedmi různých rovnic. Výsledky tohoto vzorce porovnával Manning na vzorku 170 experimentálních pozorování, z nichž ve 104 případech použil Bazinova data (Sturm, 2001). Vzorec byl nejdříve uveden v komplikované formě a následně zjednodušen na tento tvar (Chow, 1959):

$$v = CR^{2/3}S^{1/2} \quad (8.1)$$

kde  $v$  je průměrná rychlost,  $C$  je koeficient drsnosti,  $R$  je hydraulický poloměr a  $S$  je sklon. Rovnice v metrické soustavě byla dále upravena do tohoto tvaru (Chow 1959, Simons, Senturk, 1992):

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (8.2)$$

$n$  v tomto vzorci značí Manningův součinitel drsnosti. Tento koeficient není bezrozměrná konstanta, má rozměry času a délky ( $s/m^{1/3}$ ). Aby mohly být používány stejné hodnoty  $n$  i pro soustavu IU, bylo potřeba rovnici upravit (French, 1985). Protože:

$$n [s/m^{1/3}] = 0,6730 n [s/ft^{1/3}] \quad (8.3)$$

byl pro angloamerickou soustavu jednotek vytvořen tento vztah:

$$v = \frac{1}{0,6730n} R^{2/3} S^{1/2} = \frac{1,49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (8.4)$$

V obou rovnicích 8.2 a 8.4 (stejně jako v rovnicích 3.18a a 3.18b) je tedy číselná hodnota  $n$  neovlivněna, proto je tento typ drsnostního součinitele široce používán v obou měřických soustavách (Chow, 1959).

### 8.1 Okolnosti ovlivňující hodnotu $n$

Drsnostní součinitel  $n$  je velmi variabilní a závisí na řadě faktorů. Pro optimální výběr hodnoty  $n$  v různých přírodních podmínkách je třeba znát základní vlastnosti těchto

vlivů (French, 1985). Tyto příznaky jsou však do jisté míry navzájem závislé, proto se jejich charakteristiky mohou opakovat u více faktorů (Chow, 1959).

### **8.1.1 Drsnost povrchu**

Drsnost povrchu záleží na velikosti a tvaru zrn materiálu, který tvoří omočený obvod. Tento faktor významně ovlivňuje průtok vody, proto je často považován za jediný vliv při výběru koeficientu drsnosti, ale ve skutečnosti je jen jedním z několika hlavních faktorů (Chow, 1959). Obecně lze říci, že jemný materiál má nízké hodnoty  $n$  a je relativně neovlivněný změnami v hloubce toku, ale pokud je obvod tvořený štěrkem nebo většími kameny, hodnota  $n$  je větší a může se významně měnit s hloubkou (French, 1985).

V nivách, kde se častěji objevují drobná zrna (písek, jíl), je tedy zpomalovací efekt nepatrný a dopad na změnu průtoku je nevýrazný. Štěrky a větší kameny, které jsou obvykle shromážděné na dně toku, vytvářejí vyšší drsnost oproti břehům a zvyšují hodnotu  $n$  zvláště při malých průtocích. Při vysokých průtocích dochází, v důsledku vysoké unášecí schopnosti vody, k přenosu balvanů dále po proudu, čímž se také zvyšuje drsnostní součinitel (Chow, 1959).

### **8.1.2 Vegetace**

Odhadovaná hodnota  $n$  by měla brát v úvahu vliv vegetace na zpomalování toku a zvyšování  $n$ . Obvykle platí, že působení vegetace na  $n$  je velmi silně ovlivněno hloubkou toku a výškou, hustotou, rozmístěním a typem vegetace (French, 1985). U. S. Soil Conservation Service zjistil ve studii zabývající se průtokem v menších mělkých kanálech chráněných vegetací, že hodnota  $n$  pro tato koryta se mění v závislosti na příčném profilu, sklonu dna a hloubce toku. Menší průměrná hloubka vytváří vyšší  $n$ , v důsledku zasažené vegetace. Trojúhelníkový kanál má vyšší  $n$  než lichoběžníkový a širší kanál nižší  $n$  v porovnání s úzkým kanálem. Při dostatečně vysoké hladině má voda tendenci ohýbat a zaplavovat vegetaci a produkovat nízké hodnoty  $n$ . Strmý sklon způsobuje větší rychlost, větší zploštění vegetace a také nízké  $n$  (Chow, 1959).

### **8.1.3 Nepravidelnosti koryta**

Koryto je formováno různými nepravidelnostmi v omočeném obvodu, změně průřezu, velikosti a tvaru podélného profilu toku. V přírodních kanálech jsou tyto anomálie obvykle způsobeny ukládáním nebo vymíláním na dně (French, 1985). Často se na dně vytvářejí překážky v podobě písečných vln, hřebenů či prohlubní a děr, které společně s druhem materiálu ovlivňují výslednou hodnotu  $n$ . Postupné změny mají spíše zanedbatelný dopad na  $n$ , zatímco náhlé změny mohou vést k mnohem vyšší hodnotě  $n$ , než by se odhadovalo při posuzování drsnosti obvodu koryta před událostí. V tomto případě může být zvýšení  $n$  až o 0,005 nebo více. Vlivy, které způsobují, že proud nesměruje přímo, ale teče od jednoho břehu ke druhému, budou mít stejný efekt na  $n$  (Chow, 1959).

### **8.1.4 Zakřivení toku**

Zakřivení s velkým poloměrem udává relativně nízkou hodnotu  $n$ , naopak zakřivení s několika meandry  $n$  zvyšuje. Na základě testů žlabů ukazuje Scobey (1933), že hodnota  $n$  se zvyšuje o 0,001 pro každých 20 stupňů zakřivení v kanálu dlouhém 30,5 m. Ačkoliv je sporné, zda zakřivení zvyšuje hodnotu  $n$  o více než 0,002 nebo 0,003, jeho účinek nelze úplně vyloučit. Zakřivení mohou ovlivnit akumulaci naplavenin a tím nepřímo zvýšit hodnotu  $n$ . Případné zvýšení drsnosti v nezpevněných kanálech vedoucích vodu při nízkých rychlostech je zanedbatelné, avšak u meandrujících přírodních potoků může být hodnota  $n$  zvýšena až o 30 % (Chow, 1959).

### **8.1.5 Usazování a vymílání materiálu**

Zanášení může změnit velmi nepravidelný kanál na poměrně stabilní a snížit drsnost, zatímco eroze může upravit pravidelný kanál na labilní, čímž se drsnost zvýší. Dominantní vliv na vymílání však má povaha uloženého materiálu, který tvoří omočený obvod. Jeho charakteristika ovlivňuje množství a rovnoměrnost odnosu. Písečné nebo šterkovité dno bude erodováno rovnoměrněji než hliněné. Při erozi a přenosu materiálu v suspenzi nebo valením po dně se také zvýší odpor. Efekt vymílání není významný, pokud eroze dna způsobená vysokou rychlostí proudění probíhá rovnoměrně (Chow,

1959). Urquhart (1975) poznamenává, že je důležité, zda jsou oba tyto procesy aktivní a zda je pravděpodobné, že budou aktivní i v budoucnosti.

### 8.1.6 Vodní stav a průtok

Hodnota  $n$  na většině toků klesá s nárůstem vodního stavu a průtoku. Když je voda mělká, jsou různé překážky na dně kanálu odkryté a jejich účinky jsou výraznější. Hodnota  $n$  však může být velká při vysokých průtocích i v případě, že okraje toku jsou drsné a travnaté. Když je průtok příliš vysoký, může proud přetéci své okraje a část toku se rozlije do záplavového území. Hodnota  $n$  v záplavových oblastech je obecně vyšší než v korytě a jeho velikost je závislá na stavu povrchu a vegetace. Pokud jsou dno a okraje kanálu stejně hladké a pravidelné a sklon je také rovnoměrný, může být hodnota  $n$  téměř stejná ve všech vodních stavech, takže se odhaduje podle průtokových výpočtů, které jsou obvyklé v umělých kanálech (French, 1985, Chow, 1959).

V záplavových územích se hodnota  $n$  obvykle mění v závislosti na typu zatopených porostů a výšce hladiny v dané oblasti. V roce 1954 vypracoval U. S. Soil Conservation Service studii zabývající se tímto problémem. V tabulce 5 jsou znázorněny hodnoty, které ukazují variabilitu  $n$  v závislosti na vodním stavu. Výzkum byl proveden na řece Nishnabotna v Iowě pro průměrné vegetační období. Vegetace má však výrazný vliv jen do určitého vodního stavu a pro praktické účely stanovení průtoků, které byly nad hranicí obvyklých okrajů koryta, lze považovat koeficient drsnosti za konstantní (Chow, 1959).

Tab. 5: Hodnoty  $n$  na řece Nishnabotna v závislosti na hloubce a typu vegetačního pokryvu (Chow, 1959)

Hloubka (ve stopách)	Kryt záplavových území				
	Kukuřice	Pastvina	Louka	Malá zrna	Pole po sklizni
Méně než 1	0,06	0,05	0,1	0,1	0,12
1-2	0,06	0,05	0,08	0,09	0,11
2-3	0,07	0,04	0,07	0,08	0,1
3-4	0,07	0,04	0,06	0,07	0,09
Více než 4	0,06	0,04	0,05	0,06	0,08

### 8.1.7 Další vlivy

Přítomnost překážek, jako jsou spadané stromy, mostní pilíře, kmeny nebo trosky unášené proudem a následně uvízlé, může významně ovlivnit hodnotu  $n$ . Jak velký je účinek takových překážek, závisí na počtu, velikosti, jejich materiálu a rozmístění v toku. Zatím není definitivně potvrzeno, zda tvar a velikost koryta má nějaký vliv na  $n$ . Zvětšení hydraulického rádia může zvýšit či snížit  $n$  v závislosti na stavu kanálu (Chow, 1959).

Všechny výše uvedené faktory by měly být studovány a hodnoceny s ohledem na podmínky týkající se typu kanálu, stavu toku, stupně údržby a dalších souvisejících aspektů. Dobrý odhad je základem pro stanovení správných hodnot  $n$  pro danou situaci. Jako obecné vodítko k posouzení mohou být akceptovány nejen podmínky, které mají tendence vyvolávat turbulentní proudění a zvyšovat hodnotu  $n$ , ale také ty, které snižují pravděpodobnost vytvoření turbulencí, čímž se  $n$  snižuje.

## 8.2 Cowanova metoda výpočtu $n$

Cowan (1956) ve své práci vybral několik základních faktorů, které ovlivňují koeficient drsnosti, a vytvořil postup pro odhad hodnoty  $n$ :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (8.5)$$

kde  $n_0$  je základní hodnota  $n$  pro rovné, rovnoměrně proudící a hladké kanály,  $n_1$  úprava pro nerovnosti povrchu,  $n_2$  je hodnota odchylky tvaru a velikosti průřezu kanálu,  $n_3$  je hodnota odporu překážek v trase,  $n_4$  úprava hodnoty pro vegetaci a průtokové podmínky a  $m_5$  faktor meandrování toku (Chow, 1959, Sturm, 2001). Chow (1959) ve své práci uvádí hodnoty pro jednotlivé úpravy v závislosti na jejich vlastnostech.

Tab. 6: Hodnoty n pro Cowanův vzorec (upraveno Chow, 1959)

Podmínky v korytě		Hodnoty	
Materiál	Země	$n_0$	0,02
	Skála		0,025
	Jemný štěrk		0,024
	Hrubý štěrk		0,028
Stupeň nepravidelnosti	Hladký	$n_1$	0
	Malý		0,005
	Střední		0,01
	Drsný		0,02
Změna průřezu	Postupná	$n_2$	0
	Občas střídavá		0,005
	Často střídavá		0,01-0,015
Relativní vliv překážek	Zanedbatelný	$n_3$	0
	Malý		0,01-0,015
	Znatelný		0,02-0,03
	Velký		0,04-0,06
Vliv vegetace	Nízký	$n_4$	0,005-0,01
	Střední		0,01-0,025
	Vysoký		0,025-0,05
	Velmi vysoký		0,05-0,1
Stupeň meandrovitosti	Malý	$m_5$	1
	Střední		1,15
	Velký		1,3

Při výběru nerovnoměrnosti dna je kategorie hladká považována za povrch srovnatelný s nejlepšími dostupnými materiály. Malá úroveň značí upravená koryta a mírně erodované či očištěné boční svahy kanálů. Střední stupeň jsou ohlazené či slabě upravené toky a nejvyšší drsný charakter jsou drolicí se, silně erodované či sesunuté svahy přírodních toků nebo nepravidelné povrchy kanálů vyhloubených ve skále (Chow, 1959).

Hodnota  $n_2$  udává změnu velikosti a průřezu a dělí se na postupnou, občas střídavou a často střídavou. Za postupné změny se považují ty, které se objevují pozvolna a plynule na sebe navazují. Pokud se občas střídají malé a velké úseky nebo na některých místech tok proudí ze strany na stranu, zvolíme kategorii občas střídavé. Nejvyšší hodnoty použijeme, když se velikost mění často a proud směřuje téměř stále od jednoho břehu ke druhému (Chow, 1959).

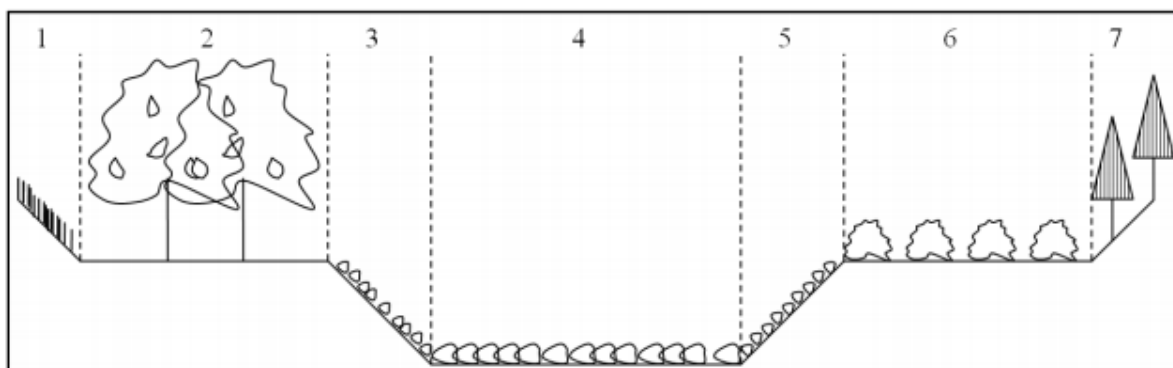
Volba hodnoty  $n_3$  je založena na přítomnosti a charakteru překážek, jako jsou různé trosky, pařezy, odkryté kořeny, padlé kmeny a balvany. Při posuzování relativního vlivu překážek je třeba zvážit následující parametry: do jaké míry překážky zabírají tok a snižují vodní plochu, charakter překážky (hranaté předměty s ostrými hranami vyvolávají větší turbulence než zakřivené s hladkým povrchem) a příčné nebo podélné umístění překážky (Chow, 1959).

Hodnota  $n_4$  vyjadřuje účinek vegetace. Nízký je při travních porostech, kde hloubka toku je 2-3krát větší než výška trav, u kmenů (proutků) mladých stromů jako vrba, topol nebo cedr při hloubce 3-4krát větší než výška vegetace. Střední vliv nastává, když je u travnatého povrchu hloubka pouze 1-2krát větší, u tenkých kmenů stromů a lipnicovitých porostů hloubka 2-3krát větší, u občasných křovinatých porostů (podobně jako u vrb starých 1-2 roky během neaktivního vegetačního období). Vysoký účinek mají travnaté drny dosahující hladiny, vrby, topoly a jiné stromy staré 8-10 let, bez listů a obklopené bylinami, kde je hydraulický poloměr větší než 60 cm, keřovité stromy ve stáří 1 roku za vegetační období s plným olistěním a okolní vegetací s hydraulickým poloměrem větším než 60 cm. Do nejvyšší kategorie s velmi vysokým stupněm vlivu vegetace patří drny trav pouze zpola ponořené, hustě u sebe rostoucí keřovité a další stromy s listy a okolními rostlinami s hydraulickým poloměrem maximálně 3 m (Chow, 1959).

Hodnota  $m$ , stupeň meandrovitosti, závisí na poměru skutečné délky toku ke přímé délce toku bez ohybů. Malý stupeň je udáván, když je poměr 1,0-1,2, střední je při poměru 1,2-1,5 a velký při hodnotách větších než 1,5 (Chow, 1959).

### 8.3 Profil s různými drsnostmi

Drsnost kanálu se může lišit v různých částech omočeného obvodu. Zvláště v přírodních korytech je obvyklé, že dno má jiný povrch než jeho okraje (obr. 9). V takových případech se pro každou část vytváří vlastní hodnota drsnostního součinitele (McKay, Fischenich, 2011). Ačkoliv se v důsledku různých drsností objevují také rozdílné rychlosti proudění, lze pro celý profil zvolit jednu složenou hodnotu drsnosti pomocí různých výpočtů. (Akan, 2006, Sturm, 2001)



Obr. 9: Přírodní profil s různými drsnostmi povrchu (McKay, Fischenich, 2011)

V přírodním kanále je průtočná plocha rozdělena do  $n$ -částí s odpovídajícím omočeným obvodem a koeficientem drsnosti. Následující metody nezahrnují sousedící úseky obvodu mezi částmi (French, 1985).

Hortonova metoda (1933) je založena na předpokladu, že rychlosti ve všech částech omočeného obvodu jsou stejné a rovnají se střední rychlosti v celém úseku. Výsledný hodnota Manningova  $n$ , je dána vztahem:

$$n_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N P_i n_i^{3/2}}{P} \right]^{2/3} = \frac{(P_1 n_1^{3/2} + P_2 n_2^{3/2} + \dots + P_i n_i^{3/2})^{2/3}}{P^{2/3}} \quad (8.6)$$

kde  $P_i$  je určitá část omočeného obvodu,  $n_i$  drsnostní koeficient  $i$ -té části,  $N$  celkový počet částí a  $P$  celkový omočený obvod.

Pro další výpočet ekvivalentní drsnosti se předpokládá, že celková síla odporu toku se rovná součtu sil, které odporují proudění v každé z rozdělených částí. Vzorec byl vytvořen Einsteinem a Banksem (1950). Podle tohoto předpokladu je ekvivalentní koeficient drsnosti dán vztahem:

$$n_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N P_i n_i^2}{P} \right]^{1/2} = \frac{(P_1 n_1^2 + P_2 n_2^2 + \dots + P_i n_i^2)^{1/2}}{P^{1/2}} \quad (8.7)$$

při stejném předpokladu uvádí Yen (2002) tyto vzorce:

$$n_c = \sqrt{\frac{1}{A} \sum (n_i^2 A_i)} \quad (8.8)$$

$$n_c = \sqrt{\frac{1}{PR^{2/3}} \sum (n_i^2 P_i R_i^{2/3})} \quad (8.9)$$

$R$  v těchto vzorcích značí hydraulický radius,  $A_i$  plochu určité části a  $A$  celkovou plochu.

Lotter (1933) předpokládá, že celkové množství průtoku se rovná součtu průtoků v jednotlivých oblastech. To znamená, že odpovídající koeficient drsnosti je:

$$n_c = \left[ \frac{PR^{5/3}}{\sum_{i=1}^N \frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i}} \right] = \frac{PR^{5/3}}{\frac{P_1 R_1^{5/3}}{n_1} + \frac{P_2 R_2^{5/3}}{n_2} + \dots + \frac{P_i R_i^{5/3}}{n_i}} \quad (8.10)$$

i za tohoto předpokladu Yen (2002) udává vztah:

$$n_c = \frac{A}{\sum \frac{A_i}{n_i}} \quad (8.11)$$

Vztah založený na logaritmickém rozdělení rychlostí, který vytvořili Krishnamurthy a Christensen (1972), má tento tvar:

$$\ln n_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N P_i h_i^{3/2} \ln n_i}{\sum_{i=1}^N P_i h_i^{3/2}} \right] \quad (8.12)$$

kde  $h_i$  je hloubka v  $i$ -té sekci.

Motayed a Krishnamurthy (1980) použili údaje z 36 potoků ve státech Maryland, Georgia, Pennsylvania a Oregon z měřicích stanic USGS (United States Geological Survey), aby porovnali rovnice 8.6, 8.7, 8.10 a 8.12. Průměrná hodnota sklonu přímky energie získané z měření hloubky a rozložení rychlostí v průřezu byla použita k získání „měřené“ složené hodnoty Manningova  $n$  a porovnána s uvedenými výpočty. Výsledky ukázaly, že střední chyba mezi vypočítaným a měřeným  $n$  je nejmenší pro Lotterův vzorec.

Mnoho dalších vzorců pro výpočet  $n_c$  od různých autorů s rozdílnými koncepty a předpoklady uvádí ve své práci Yen (2002).

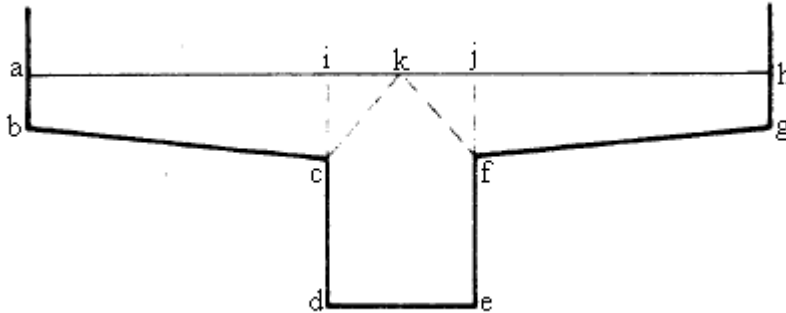
#### **8.4 Složené koryto**

Složený profil může být definován jako celek, který je tvořen několika částmi s různou drsností povrchu, hloubkou a rychlostí proudění. Typickým příkladem jsou přírodní toky během vysokého vodního stavu, kdy voda vystoupí ze svého obvyklého koryta a rozlije se do okolí (Chaudhry, 2008). Při vybřežení začíná tok pokrývat inundační oblast, omočený obvod se prudce zvyšuje, zatímco průtočný průřez se zvyšuje pomalu. V takové situaci hydraulický poloměr, rychlost a průtok klesají s rostoucí hloubkou průtoku (French, 1985). Průměrné rychlosti proudění v hlavním kanálu a přilehlých oblastech se mohou výrazně lišit kvůli různé průtočné hloubce a koeficientu drsnosti. Při výpočtech bychom měli tyto rozdíly vzít v úvahu (Akan, 2006).

French (1985) ve své práci uvádí několik postupů výpočtu průtoku ve složeném korytě.

Způsoby navržené Frenchem pracují s rozdělením koryta na jednotlivé části podle obr. 10. U první metody se celá plocha průřezu  $A$  (abcdefgh) dělí celkovým omočeným

obvodem P (abcdefgh) s cílem získat střední nebo složený hydraulický poloměr. Potom mohou být vypočítány střední rychlost a průtok. Při malých hloubkách toku v záplavové oblasti však tento způsob výpočtu vede k chybným výsledkům.



Obr. 10: Složené koryto (upraveno, French, 1985)

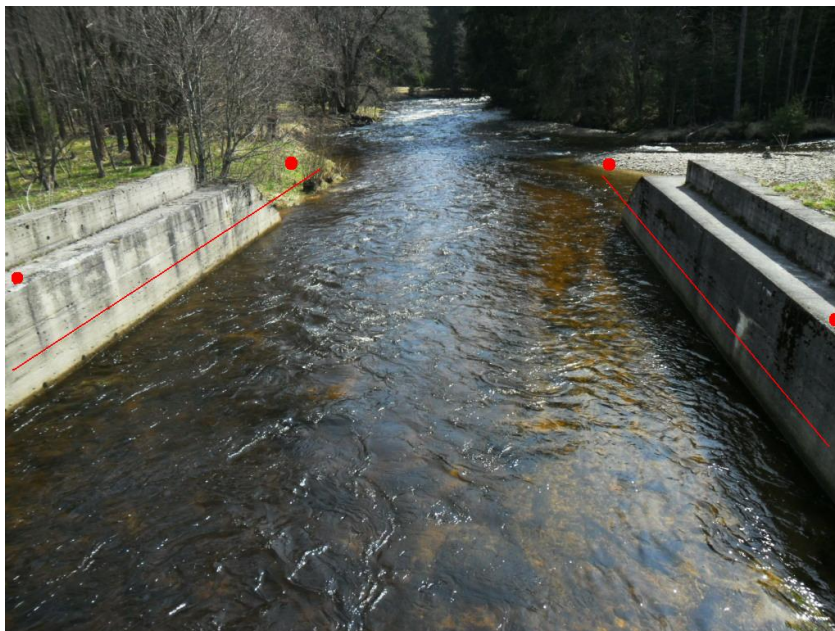
Druhá metoda rozděluje části koryta na hlavní kanál a k němu přiléhající dvě inundační území oddělená liniemi ic a if. Plocha hlavního kanálu je A (icdefj) a omočený obvod P (icdefj). Okolní oblasti mají tyto profily a omočené obvody: A (abci), P (abc), A (jfg h) a P (fgh). Podle této metody jsou linie ic a if zahrnuty do omočeného obvodu hlavního koryta, protože se na těchto liniích vyskytuje smykové tření. V následující metodě je kanál rozdělen stejně jako v předchozí, ale délky ic a if nejsou považovány za součást omočeného obvodu. Poslední navrhovaný postup rozděluje profil liniemi ck a fk. Omočený obvod jednotlivých částí je počítán pouze z pevných hranic a vážený hydraulický radius pro celou plochu je dán následujícím vztahem (French, 1985):

$$R = \frac{\{[A(abck)]^2 / P(abc)\} + \{[A(kcdef)]^2 / P(cdef)\} + \{[A(kfgh)]^2 / P(cgh)\}}{A(abck) + A(kcdef) + A(kfgh)} \quad (8.13)$$

Posey (1967) hodnotil ve své práci přesnost těchto čtyř metod na souboru dat měřených ve žlabech, které měly tvar zobrazený na obr. 10. V těchto experimentech byla zjištěna stejná drsnost hlavního kanálu a bočních území. Posey dospěl k závěru, že druhý způsob je vhodnější, když je hloubka proudění v okolních oblastech mělká. První metoda má lepší výsledky, když je hloubka průtoků v inundačních plochách alespoň poloviční ve srovnání s hloubkou v hlavním kanálu. Údaje, které měl Posey k dispozici byly však nedostatečné, a proto je nutné v této oblasti další zkoumání.

## 9. Praktický výpočet průtoku

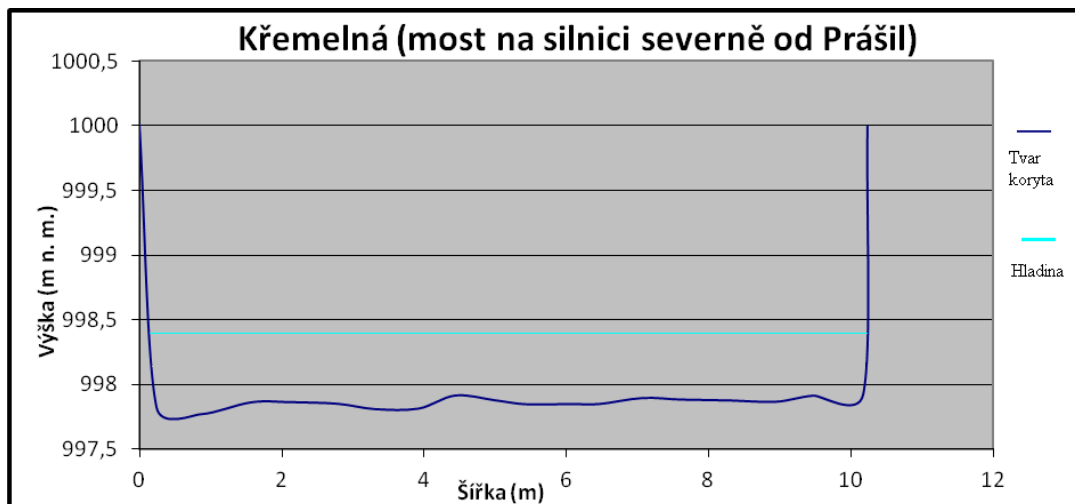
Průtok byl počítán na profilu řeky Křemelné (49.135002 s. š. a 13.386758 v. d.) na mostu silnice vedoucí z Prášil na sever (obr. 11). Data o průtoku byla získána pomocí přístroje Flow Tracker. Při měření 24. 4. 2013, když byl vodní stav 0,34 m, byl naměřen průtok  $3,503 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ve druhém příkladu počítám situaci ze dne 18. 4. 2006 s dosud nejvyšším vodním stavem 0,56 m, kdy se přístrojově měřilo. Tehdy byl zaznamenán průtok  $6,634 \text{ m}^3/\text{s}$ . V příkladu č. 3 odvozuji průtok z vodního stavu 1,62 m, což je nejvyšší zaznamenaný vodní stav během doby měření na tomto profilu. Tvar profilu a sklon hladiny byly zaměřeny pomocí totální geodetické stanice (obr. 11 a obr. 12). Na levé straně byl určen sklon 0,002277 a na pravé straně 0,001086. Pro výpočty byl stanoven průměr těchto sklonů 0,001682. Pro příklady č. 2 a 3 však nebyl sklon zaznamenán, takže používám pro všechny příklady stejný sklon, což však samozřejmě může ovlivnit výsledné průtoky. Výběr koeficientů  $n$  a  $C$  jsem zvolil z hodnot udávaných ČSN 1070 (tab. 7 a tab. 8). Vzhledem k tomu, že se jedná o složený profil s různou drsností dna a stěn, který je však upravený a nemá obvyklé inundační oblasti, vypočítal jsem výslednou hodnotu složených koeficientů drsnosti váženým průměrem. Z nadmořských výšek měřených v profilu jsem stanovil střední hloubku ve výšce 997,8602 m n. m. Následující postup výpočtu průtoku uvádí ČSN 1070.



Obr. 11: Oblast profilu s vyznačenými body měření sklonu hladiny (Kabelka, 24. 4. 2013)



Obr. 12: Pracovníci KFGG zaměřují profil (Kabelka, 24. 4. 2013)



Obr. 13: Tvar měřeného profilu s výškou hladiny (24. 4. 2013)



Obr. 14: Koryto Křemelné v měřeném profilu (Kabelka, 24. 4. 2013)

Průtok spočítáme podle vzorce:

$$Q = vA \quad (9.1)$$

Při použití Manningova rovnice:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (9.2.)$$

kde

$$R = A/P \quad (9.3)$$

dosazením za  $v$  z rovnice 9.1 dostaneme:

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} A = \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{P^{2/3} n} \quad (9.4)$$

Použijeme-li Chezyho rovnici:

$$v = C\sqrt{RS_f} \quad (9.5)$$

Dosažením za  $v$  z rovnice 9.1 získáme tvar:

$$Q = AC \sqrt{\frac{A}{P}} S_f = \frac{CA^{3/2} S^{1/2}}{P^{1/2}} \quad (9.6)$$

Na obr. 14 je vidět dno koryta tvořené oblázky a valouny, proto jsem pro dno zvolil hodnoty Manningova  $n$  0,032 a Chezyho  $C$  31. Pro stěny jsem zvolil hodnotu  $n$  0,018 a  $C$  55. U příkladů 1 a 2 jsem následně porovnával hodnoty koeficientů s těmi, které se co nejvíce blížily skutečnému průtoku.

Tab. 7: Součinitele drsnosti pro koryta s relativně hrubým materiálem dna nevytvářejícím na dně útvary (ČSN 1070)

Typ materiálu dna	Velikost materiálu dna v mm	Hodnota stupně drsnosti $n$ podle Manninga	Rychlostní součinitel $C$ v Chezyho rovnici pro následující hodnoty $R$			
			$R = 1$ m	$R = 2,5$ m	$R = 5$ m	$R = 10$ m
Štěrk	4 až 8	0,019 až 0,020	53 až 50	61 až 58	69 až 65	77 až 73
	8 až 20	0,020 až 0,022	50 až 45	58 až 53	65 až 59	73 až 67
	20 až 60	0,022 až 0,027	45 až 37	53 až 43	59 až 48	67 až 54
Oblázky a valouny	60 až 110	0,027 až 0,030	37 až 33	43 až 39	48 až 44	54 až 49
	110 až 250	0,030 až 0,035	33 až 29	39 až 33	44 až 37	49 až 42

### 9.1 Příklad č. 1

Základní hodnoty profilu:

- délka dna  $l_d = 10,7$  m
- délka volné hladiny  $l_h = 10,23$  m
- omočený obvod při vodním stavu 0,34 m  $P = 11,76$  m

- plocha průtočného profilu  $A = 5,406 \text{ m}^2$
- sklon hladiny  $S = 0,001682$
- $n = 0,031$
- $C = 32$

Manningova rovnice

$$Q = \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{P^{2/3} n}$$

$$Q = \frac{5,406^{5/3} 0,001682^{1/2}}{11,76^{2/3} 0,031} = 4,260 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je  $4,260 \text{ m}^3/\text{s}$

Při použití drsnostního koeficientu  $n = 0,038$

$$Q = \frac{5,406^{5/3} 0,001682^{1/2}}{11,76^{2/3} 0,038} = 3,475 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je  $3,475 \text{ m}^3/\text{s}$

Chezyho rovnice

$$Q = \frac{CA^{3/2} S^{1/2}}{P^{1/2}}$$

$$Q = \frac{32 \cdot 5,406^{3/2} 0,001682^{1/2}}{11,76^{1/2}} = 4,810 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je  $4,810 \text{ m}^3$ .

Při použití drsnostního koeficientu  $C = 23$

$$Q = \frac{23 \cdot 5,406^{3/2} 0,001682^{1/2}}{11,76^{1/2}} = 3,458 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je  $3,458 \text{ m}^3/\text{s}$

## 9.2 Příklad č. 2

Zde počítám s vodním stavem 56 cm. To je nejvyšší vodní stav, za kterého se ještě měřilo pomocí přístroje. Pomocí výpočtů jsme získali tyto výsledky:

Základní hodnoty profilu:

- omočený obvod při vodním stavu 0,56 m  $P = 12,2$  m
- plocha průtočného profilu  $A = 7,6725$  m<sup>2</sup>
- sklon hladiny  $S = 0,001682$
- $n = 0,031$
- $C = 32$

Manningova rovnice

$$Q = \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{P^{2/3} n}$$

$$Q = \frac{7,6725^{5/3} 0,001682^{1/2}}{12,2^{2/3} 0,031} = 7,451 \text{ m}^3/\text{s}$$

Při použití drsnostního koeficientu  $n = 0,035$

$$Q = \frac{7,6725^{5/3} 0,001682^{1/2}}{12,2^{2/3} 0,035} = 6,599 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je 6,599 m<sup>3</sup>/s.

Chezyho rovnice

$$Q = \frac{CA^{3/2} S^{1/2}}{P^{1/2}}$$

$$Q = \frac{32 \cdot 7,6725^{3/2} 0,001682^{1/2}}{12,2^{1/2}} = 7,985 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je 7,985 m<sup>3</sup>/s.

Při použití drsnostního koeficientu  $C = 27$

$$Q = \frac{27 \cdot 7,6725^{3/2} \cdot 0,001862^{1/2}}{12,2^{1/2}} = 6,738 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je 6,738 m<sup>3</sup>/s.

### 9.3 Příklad č. 3

S hodnotami maximálního zaměřeného vodního stavu 1,62 m ze dne 1. 3. 2008 jsou vypočtené hodnoty průtoku tyto:

Základní hodnoty profilu:

- omočený obvod při vodním stavu 1,62 m  $P = 14,32 \text{ m}$
- plocha průtočného profilu  $A = 18,5163 \text{ m}^2$
- $n = 0,028$
- $C = 37$

Manningova rovnice

$$Q = \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{P^{2/3} n}$$

$$Q = \frac{18,5163^{5/3} \cdot 0,001862^{1/2}}{14,32^{2/3} \cdot 0,028} = 32,19 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je 32,19 m<sup>3</sup>/s

Chezyho rovnice

$$Q = \frac{CA^{3/2} S^{1/2}}{P^{1/2}}$$

$$Q = \frac{37 \cdot 18,5163^{3/2} \cdot 0,001862^{1/2}}{14,32^{1/2}} = 31,95 \text{ m}^3/\text{s}$$

Výsledný průtok je 31,95 m<sup>3</sup>/s.

## 10. Diskuse a zhodnocení výsledků

Vytvoření spolehlivého vzorce pro výpočet průtoku je už velmi dlouho zkoumaným tématem mnoha odborníků. Vzhledem k tomu, že průtok reaguje na aktuální situaci toku, je obtížné takový vzorec najít, protože v přírodních nebo umělých korytech může nastat mnoho různorodých situací. To potvrzuje i velké množství rozdílných vzorců, koeficientů a dalších parametrů popisovaných v odborné literatuře.

U zpětného dopočítávání průtoků riskujeme, že výsledná hodnota nebude udávat skutečný průtok. Především na menších přirozených korytech je často velmi obtížné správně určit parametry nezbytné pro výpočty. To je způsobeno buď přírodními podmínkami toku a jeho okolí, nebo tím že v místě měření nemáme potřebné technické přístroje.

Výpočet vysokých průtoků je zatížen mnoha nejistotami, které mohou vést k chybnému výsledku. Bez ohledu na použitou rovnici se objevují nejistoty v určení plochy, sklonu, omočeného obvodu a správné hodnoty součinitele drsnosti.

Při výpočtu střední plochy průřezu se mohou objevit chyby způsobené měřením, různé nejistoty způsobené rozdíly mezi předpokládaným a skutečným tvarem dílčích ploch a nejistoty způsobené volbou jejich počtu či nejistoty způsobené místními diferencemi plochy v úseku. Eliminace těchto chyb závisí především na dostupné technice.

Dalším problémem je výpočet omočeného obvodu v členitém povrchu. Chyby vznikají např. rozdílem mezi předpokládaným a skutečným tvarem dna, místními rozdíly omočeného obvodu v úseku a také při měření. Nejčastěji jsou chyby způsobené nerovnoměrností povrchu.

Měření sklonu čáry energie také vnáší možné nejistoty do výsledku. Je-li sklon určován na základě značek povodňových vod, bude mít velký vliv nejistota v odečítání hladiny na vodočtech. Tento odhad lze usnadnit tím, že se vezmou do úvahy čtení vodočtů při ustáleném proudění a takto stanovené sklony se porovnají. Další chyby mohou vzniknout opravami vzhledem k nerovnoměrnému sklonu a redukcí pozorovaného sklonu na sklon odpovídající ztrátě třením.

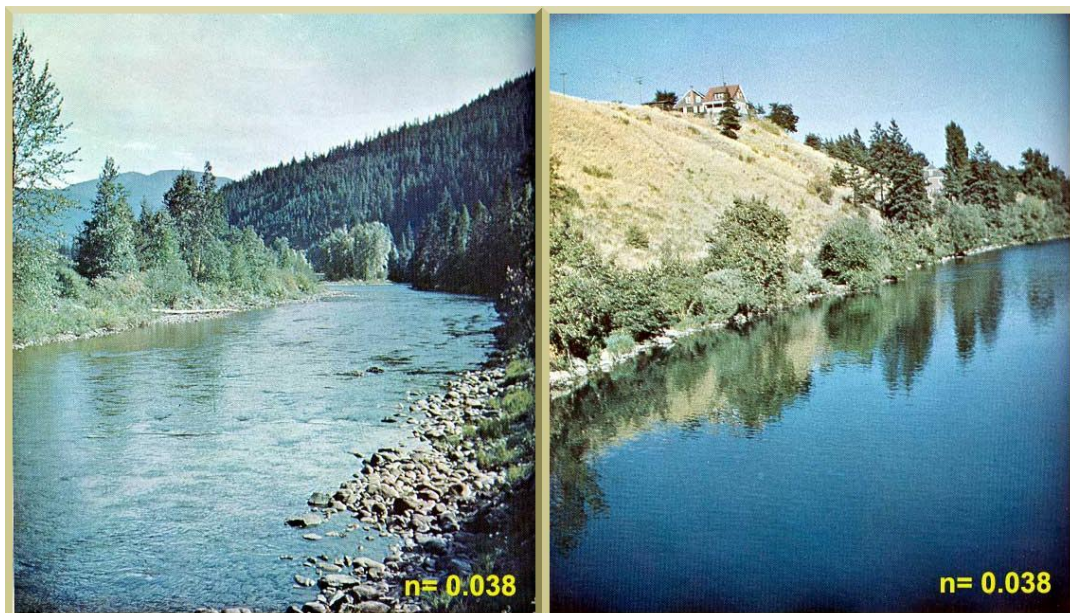
Pravděpodobně nejčastější chyba se objevuje při výběru drsnostního součinitele. Při výběru  $C$  v Chezyho rovnici můžeme narazit na potíže způsobené zvětšením koryta, kdy

se změni hydraulický radius. V literatuře zabývající se prouděním v přírodních korytech (Chow 1959, Shaw, 1994, Akan, 2006, Kašpárek, 2003) lze nalézt doporučené hodnoty pro různé situace a typy povrchů. Některé řešené praktické příklady výběru  $n$  je možné nalézt na webových stránkách USGS z Illinois a také na stránkách San Diego State University.

V prvním příkladu v praktické části jsem aplikoval Manningovu a Chezyho rovnici na měření provedená na Křemelné. Na místě jsme pomocí Flow Trackeru zjistili průtok  $3,503 \text{ m}^3/\text{s}$ . Manningova rovnice však udává výsledný průtok  $4,260 \text{ m}^3/\text{s}$  a Chezyho rovnice  $4,810 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tyto vypočtené hodnoty jsou vyšší oproti těm, které byly změřeny pomocí Flow Trackeru. Na výsledcích je tedy vidět, že hodnoty koeficientů, které jsem zvolil z tabulky doporučených hodnot součinitelů drsnosti, neměly správnou velikost a tím bylo způsobeno, že byl výsledný průtok nadhodnocen. V prvním příkladu jsem spočítal složené hodnoty  $n = 0,031$  a  $C = 32$ . Následně jsem zjistil hodnoty koeficientů, které se nejvíce blíží měřenému průtoku zaznamenaným přístroji. V příkladu č. 1 to byly hodnoty  $n = 0.038$  a  $C = 23$ .

Pro hodnoty  $n = 0,038$  uvádí San Diego State University tyto profily:



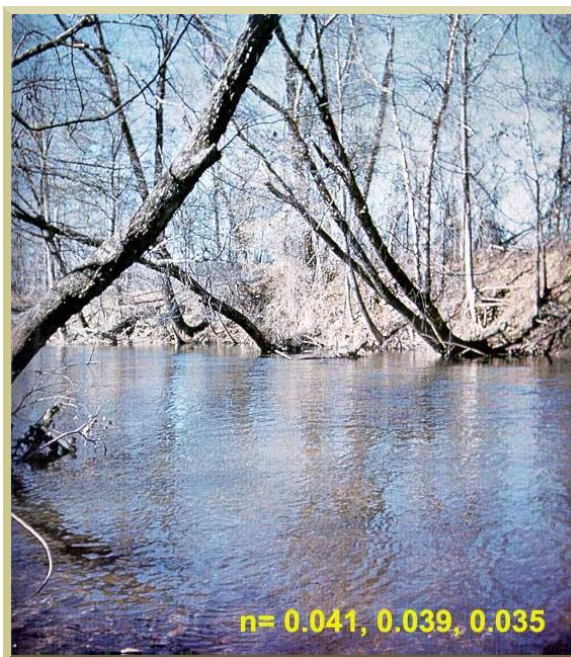
Obr. 15: Toky s koeficientem  $n = 0,038$  (<http://manningsn.sdsu.edu/>)

Oproti profilu Křemelné jsou tyto toky širší, mají větší průtočný profil a také jiné okolí. Hodnota Manningova koeficientu je však shodná s vypočteným  $n$  v prvním příkladu. To může být způsobeno buď rozdílnými plochami průtoku nebo sklonem hladiny.

Ve druhém příkladu byl počítán průtok s hladinou ve výšce 0,75 m. Průtok vypočítaný pomocí Manningovy rovnice je  $7,451 \text{ m}^3/\text{s}$  a Chezyho rovnice udává  $7,958 \text{ m}^3/\text{s}$ . Při terénním měření hydrometrickou vrtulí byl zaznamenán průtok  $6,634 \text{ m}^3/\text{s}$ .

I v tomto případě jsou průtoky vypočtené pomocí rovnic vyšší než měřené. Opět se zde uplatňuje vliv zvolené drsnosti. Tabulkové hodnoty se neměnily, ale hodnoty, které se nejvíce blíží měřenému průtoku, jsou odlišné od prvního příkladu. Pro  $n$  byla určena hodnota 0,035 a pro  $C$  27. Oproti předchozí situaci je rozdíl tabulkových a vypočítaných hodnot menší, což může být způsobeno vyšším průtokem. Kromě výběru koeficientu se však může projevit vliv sklonu hladiny, který nebyl při tomto měření zaznamenán.

Následující profil má při vodním stavu 0,86 m stejné hodnoty  $n$  jako byly vypočítané ve druhém příkladu:



Obr. 16: Hodnota  $n = 0,035$  při vodním stavu 0,86 m (<http://manningsn.sdsu.edu/>)

I zde je širší koryto než u zkoumaného profilu, vodní stav je vyšší a průtok pravděpodobně také.  $N$  má stejnou velikost nejspíše proto, že sklon toku je natolik odlišný, že se drsnost povrchu projevuje touto hodnotou.

V posledním příkladu již nebyl průtok měřený pomocí přístrojů, takže nemůžeme přesně porovnávat. Vypočtené průtoky jsou pravděpodobně nadhodnocené stejně jako u předchozích příkladů. Pokud by trend zmenšování rozdílu tabulkových a vypočítaných drsnostních součinitelů pokračoval, mohou být výsledky blízké skutečnému průtoku. Také tady se může projevit účinek sklonu hladiny, který může být odlišný při vysokých průtocích.

Je tedy vidět, že k uvedeným výpočtům je nutné přistupovat obezřetně a pro správné výsledky průtoků je třeba sbírat zkušenosti z terénních měření na různých profilech vodních toků.

## 11. Závěr

Tato práce se zabývá způsoby odvození výpočtu průtoku. Cílem bylo teoreticky popsat a vystihnout danou problematiku v rešeršní části a tyto poznatky dále aplikovat na konkrétním příkladě v praxi.

V rešerši jsem se nejdříve zabýval metodami zjišťování základních hodnot profilu, až se průtok sníží na úroveň přijatelnou pro terénní práci. Popsal jsem postupy pro určení výšky hladiny, příčného profilu a omočeného obvodu. Ze známého tvaru profilu lze následně pomocí určitých vzorců spočítat průtočnou plochu.

Další část jsem věnoval tématu konsumpční křivky, podle které je možné odečítat průtoky na vodních tocích při různých vodních stavech, ačkoliv při povodňových průtocích bývají hodnoty nepřesné v důsledku různých změn na toku. Vysoké hodnoty bývají také často dopočítávány pomocí doporučených vzorců.

Jedním z důležitých parametrů při určování průtoků je výpočet rychlosti proudění. Popsal jsem rovnice obvykle používané v praxi a zaměřil jsem se na faktory, které ovlivňují drsnostní koeficienty v uvedených metodách.

V praktické části jsem aplikoval Chezyho a Manningovu rovnici na data naměřená v profilu řeky Křemelné při dvou různých vodních stavech. Pro daný profil Chezyho i Manningova rovnice průtok nadhodnocují, což však může být vlivem nesprávné hodnoty drsnostního koeficientu nebo absence měření sklonu hladiny při 2. a 3. případě.

Problematika výpočtu průtoku vysokých vodních stavů je velmi komplexní a vyžaduje posouzení mnoha parametrů. Vzhledem k tomu, že každý profil je originální s jedinečnými podmínkami a vlastnostmi, musí se ke každému přistupovat jednotlivě a posuzovat vždy znovu. Zde se také v některých případech uplatňuje model HEC-RAS, který však do této práce nebyl zahrnutý. Další výzkum v této oblasti má velký význam pro budoucnost.

## 12. Zdroje

AKAN, A. O.: *Open channel hydraulics*. Elsevier, Amsterdam, 2006, 364 s. ISBN 978-0-7506-6857-6

BLIZNJAK, E.: *V.Vodnyje issledovanija*. 5 vyd., Izd. ministerstva rečnovo flota, SSSR, Moskva, 1952

ČSN ISO 1070.: *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Metoda sklonu a plochy*. 1994

CHAUDHRY, M. H.: *Open-channel Flow*. Springer, New York, 2008, 523 s. ISBN 978-0-387-30174-7

COWAN, W. L.: *Estimating hydraulic roughness coefficients*. Agricultural Engineering 1956, vol. 37, no. 7, str. 473-475

DUB, O.: *Hydrológia, hydrografia, hydrometria*. SVTL Bratislava, Bratislava, 1957

EINSTEIN, H. A., BANKS, R. B.: *Fluid resistance of composite roughness*. Transactions, American Geophysical Union, 1950, vol. 31, no. 4, str. 603-610

FRANCIS, J. R. D., MINTON, P.: *Civil Engineering Hydraulics*. 5th ed. Arnold, London, 1984, 400 s., ISBN 071313514X

FRENCH, R. H.: *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, Singapore, 1985, 705 s., ISBN 0070221340

HENDERSON, F. M.: *Open channel flow*. MacMillan, New York, 1966, 522 s., ISBN 0804206988

HORTON, R. E.: *Separate roughness coefficients for channel bottom and sides*. Engineering News-Record, 1933, vol. 111, no. 22, str. 652-653

HOUK, I. E.: *Calculation of flow in open channels*. Miami Conservancy District, Technical Report, Pt. IV, Dayton. Ohio, 1918

CHOW, V. T.: *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, Tokyo, 1959, 680 s., ISBN 0070107769

JANDORA, J., ŠULC, J.: *Hydraulika*. FAST, VÚT, Brno, 2006, 178 s.

- KAFKOVÁ, K.: *Tvorba říčních profilů*. Diplomová práce na FSV ČVUT, Praha, 2012
- KAŠPÁREK, J.: *Měření povodňových průtoků*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 2003. 20 s., ISBN 80-85900-52-1
- KEMEL, M.: *Klimatologie, meteorologie a hydrologie*. ČVUT, Praha, 2000, 289 s.
- KRISNAMURTHY, M., CHRISTENSEN, B. A.: *Equivalent Roughness for Shallow Channels*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1972, vol. 98, no. 12, str. 2257-2263.
- LOTTER, G. K.: *Soobrazheniia k gidravlicheskomu raschetu rusel s razlichnoi sherokhovatostiu stenok*. Izvestiia Vsesoiuznogo Nauchnoissledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki, Leningrad, 1933, vol. 9, pp. 238 - 241
- LUŠČEVA, A. A.: *Praktičeskaja gidrometrija*. Gidrometeorologičeskoje izd., Leningrad, 1951
- MARA, D., SLEIGH, A., TAYLOR, K.: *PC-based Simplified Sewer Design*. University of Leeds, Leeds, 2001. 110 s., ISBN 0-904280-01-2
- MATTAS, D.: *Měření průtoků nestandardními metodami a v nestandardních podmínkách*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 1998, 45 s., ISBN 80-85900-20-3
- MCKAY, S. K., FISCHENICH J. C.: *Robust prediction of hydraulic roughness*. U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, 2011
- Methodology for crop and pasture inundation damage appraisal: "Trainings manual for hydrologists on watershed protection and flood preventing work plan parties," preliminary draft, U.S. Soil Conservation Service, Milwaukee, Wisconsin, 1954
- MOTAYED, A, K., KRISNAMURTHY, M.: *Composite Roughness of Natural Channels*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1980, vol. 106, no. 6, str. 1111-1116
- POSEY, C. J.: *Computation of discharge including overbank flow*, Civil Engineering, ASCE, 1967, str. 62-63.

Report ASCE: *Task Force on Friction Factors in Open Channels*. Proc. Ani. Soc. Civil Engrs., 1963, vol. 89, str. 97

SCOBAY, F. C.: *The flow of water in flumes*. U. S. Department of Agriculture, Technical Bulletin 1933, no. 393

SHAW, E. M.: *Hydrology in practise*. Third edition, Taylor & Francis, London, 1994, 613 s. ISBN 0-203-01325-5

SIMONS, D. B., SENTURK, F.: *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA, 1992. ISBN 0-918334-66-7

STARÝ, M.: *Hydrologie*. FAST, VÚT, Brno, 2005, str. 213

STURM, T. W.: *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, Singapore, 2001, str. 493 ISBN 0-07-062445-3

UHLÍŘOVÁ, K., ZBOŘIL, A.: *Možnosti využití laserového snímání povrchu pro vodohospodářské účely*. VTEI, příloha Vodního hospodářství č. 12/2009, 2009, roč. 51, č. 6, str. 11–15. ISSN 0322-8916.

URQUHART, W. J.: *Hydraulics – Engineering field manual*. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, 1975

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: *Guide to Hydrological Practises*. Third ed., WMO, no. 168, Geneva 1975, 735 s.

YEN, B. C.: *Open Channel Flow Resistance*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 2002, vol. 128, no. 1, str. 20-39

### **12.1 Internetové zdroje:**

FENTON, J.: *Open channel hydraulics* [online]. Engineering Hydraulics and Hydrology. 2005. [cit. 20. 4. 2013] Dostupné z: <http://ahm531.com/E-book/Uploaded/Open%20Channel%20Hydraulics%20by%20John%20Fenton.pdf>

Manning's n Pictorial [cit. 13. 5. 2013].

Dostupné z: <http://manningsn.sdsu.edu/>

Manning's n Pictorial [cit. 13. 5. 2013].

Dostupné z: <http://manningsn2.sdsu.edu/>

Skupina povrchových vod [cit. 26. 4. 2013].

Dostupné z: [http://pocasi.chmi.cz/BR/oddeleni/povrchove\\_vody.html](http://pocasi.chmi.cz/BR/oddeleni/povrchove_vody.html)

Illinois Site Description [cit. 13. 5. 2013].

Dostupné z: [http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/station\\_id.shtml](http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/station_id.shtml)

## 13. Přílohy

Příloha 1: Součinitele drsnosti pro koryta s jiným než hrubým materiálem dna (ČSN 1070)

Typ koryta a jeho popis	Hodnota stupně drsnosti n podle Manninga	Rychlostní součinitel C v Chezyho rovnici pro následující hodnoty R			
		R = 1 m	R = 2,5 m	R = 5 m	R = 10 m
A. Kopané nebo bagrované					
a) Zemní, přímé, pravidelného průřezu					
1 Čisté, nedávno dokončené	0,016 až 0,020	63 až 50	72 až 58	81 až 65	91 až 73
2 Čisté, po zvětrání	0,018 až 0,025	55 až 40	64 až 46	72 až 52	81 až 59
3 S nízkým travním porostem	0,022 až 0,033	45 až 30	53 až 35	59 až 40	67 až 44
b) Skalní zářezy					
1 Hladké, pravidelného průřezu	0,025 až 0,040	40 až 25	46 až 29	52 až 33	59 až 37
2 Klikaté, nepravidelného průřezu	0,035 až 0,050	46 až 29	33 až 23	37 až 26	42 až 29
B. Přirozené toky					
B.1 Menší toky (šířka v hladině při povodni menší než 30 m)					
a) Toky v rovině					
1 Koryto čisté, přímé, plný stav, žádné prolákliny nebo hluboké tůně	0,025 až 0,033	40 až 30	46 až 35	52 až 40	59 až 44
B.2 Inundace					
a) Pastviny bez keřů					
1 Nízký travní porost	0,025 až 0,035	40 až 29	46 až 33	52 až 37	59 až 42
2 Vysoký travní porost	0,030 až 0,050	33 až 20	39 až 23	44 až 26	49 až 29
b) Obdělávaná půda					
1 Bez porostu	0,020 až 0,040	50 až 25	58 až 29	65 až 33	73 až 37

Příloha 1: Součinitele drsnosti pro koryta s jiným než hrubým materiálem dna –  
pokračování z předchozí strany (ČSN 1070)

2 Vzrostlé okopaniny	0,025 až 0,045	40 až 22	46 až 26	52 až 29	59 až 33
3 Vzrostlé obilniny	0,030 až 0,050	33 až 20	39 až 23	44 až 26	49 až 29
c) Keře					
1 Rozptýlené keře, hustý travní porost	0,035 až 0,070	29 až 14	33 až 17	37 až 19	42 až 21
2 Řídce rostoucí keře a stromy (bez listí)	0,035 až 0,060	29 až 17	33 až 19	37 až 22	42 až 24
3 Řídce rostoucí keře a stromy (s listím)	0,040 až 0,080	25 až 12	29 až 14	33 až 16	37 až 18
4 Středně hustě až hustě rostoucí keře a stromy (s listím)	0,045 až 0,110	22 až 9	26 až 10,5	29 až 12	33 až 13
5 Středně hustě až hustě rostoucí keře a stromy (bez listí)	0,70 až 0,160	14 až 6,5	17 až 7,5	19 až 8	21 až 9
d) Stromy					
1 Mýtina s pařezy bez výhonků	0,030 až 0,050	33 až 20	39 až 23	44 až 26	49 až 29
2 Mýtina s pařezy s hustým porostem výhonků	0,050 až 0,030	20 až 12	23 až 14	26 až 16	29 až 18
3 Hustý stromový porost, některé stromy pokácené, řídký podrost, hladina při povodni nedosahuje k větvím	0,080 až 0,120	12 až 8,5	14 až 9,5	16 až 11	18 až 12
4 Hustý stromový porost, některé stromy pokácené, řídký podrost, hladina při povodni dosahuje k větvím	0,100 až 0,160	10 až 6,5	12 až 7,5	13 až 8	15 až 9
5 Hustý vrbový porost uprostřed léta	0,110 až 0,200	9 až 5	10,5 až 6	12 až 6,5	13 až 7,5