



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

NÁVRH METODIKY STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI OTEVŘENÝCH KORYT

DESIGN OF METHODOLOGY FOR DETERMINING ROUGHNESS COEFFICIENT OF OPEN CHANNELS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. LUKÁŠ SMELÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. HANA UHMANNOVÁ, CSc.

BRNO 2015

Abstrakt

Stanovení neměřitelného parametru, Manningova součinitele drsnosti, je komplexní úloha, kterou se hydraulika otevřených koryt zabývá již přes 200 let. Pro účely jednodimenzionálního modelování hladin v korytech toků neexistuje v současnosti jednotná metodika pro stanovení dostatečně přesné hodnoty Manningova součinitele drsnosti. Tato disertační práce se zabývá zhodnocením různých přístupů ke stanovení Manningova součinitele drsnosti, zejména pak pomocí empirických rovnic. Byly hledány takové empirické rovnice, které jsou vhodné pro co největší spektrum vodních stavů, typů materiálu dna a rozměrů koryt. Vybrané rovnice pak byly seřazeny na základě dvou způsobů podle mediánů a směrodatných odchylek naměřených a vypočtených hodnot součinitelů drsnosti dle Manninga. Dále byla srovnávána přesnost stanovení Manningova součinitele drsnosti tabulkami, fotografickými katalogy, programem CES a Cowanovou metodou, která byla rozšířena a překalibrována. Hodnoty Manningova součinitele drsnosti stanovené zmíněnými přístupy byly srovnávány s hodnotami z vlastních měření ve 27 lokalitách vodních toků v okolí Brna a Frýdku-Místku. Byly srovnávány zrnitostní křivky stanovené síťovým rozborem, Wolmanovou metodou a Subjektivním odhadem. Byl řešen vliv pohybu splavenin, dnových útvarů, travní a stromové vegetace.

Klíčová slova

Manningův součinitel drsnosti, koryto, Metodika, zrnitostní křivka, Rozšířená Cowanova metoda, Wolmanova metoda, síťový rozbor, Subjektivní odhad, fotografický katalog, tabulky, program, měření, HEC-RAS, vegetace

Abstract

Determination of immeasurable parameter, the Manning's roughness coefficient, is a complex problem of open channel hydraulics for more than 200 years. Now it doesn't exist a method for determining an exact value of 1D roughness coefficient for computation water levels in watercourses. Doctoral thesis is focused for comparing different approaches to determine a roughness coefficient, especially for empirical equations. It were sought empirical equations, which are suitable for wide spectrum of water stages, types of bed material, channel shapes and channel dimensions. Selected equations were sorted on the base of two methods by the best values of medians and standard deviations of measured and computed values of roughness coefficients. Furthermore, it were compared qualities of roughness coefficient determination by tables, by photographic catalogs, CES software and by Cowan's method, which has been extended and recalibrated. The computed values of roughness coefficients by those four methods were compared with values from own measurements in 27 locations in watercourses near of Brno and Frýdek-Místek. Also it were compared the grain size curves determined by sieving, by Wolman's method and by Subjective estimation. Doctoral thesis is marginally focused for beginning of sediment movement, roughness coefficient of bedforms (dunes), grass and trees.

Keywords

Manning roughness coefficient, channel, Methodology, grain size curve, Extended Cowan's method, Wolman's method, sieving, Subjective estimation, photographic catalogs, tables, software, measuring, HEC-RAS, vegetation

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Lukáš Smelík *Návrh metodiky stanovení součinitele drsnosti otevřených koryt*. Brno, 2015. 131 s., 71 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Hana Uhmánová, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25.11.2014

.....
podpis autora
Ing. Lukáš Smelík

Poděkování

Disertační práce byla dokončena po více než čtyřech letech. Během této doby bylo shromážděno velké množství naměřených dat a informací k tématu drsnosti. Informace jsou jednou z nejcennějších věcí na světě, a proto chci poděkovat všem, kteří mi umožnili nahlédnout více do hloubky tématu. Jedná se zejména o moji školitelku Ing. Hanu Uhmannovou, CSc., která mě během odborných konzultací mnohokrát inspirovala k dalším bádáním a výpočtům, dala mi velký prostor k realizaci vlastních nápadů a myšlenek, pomáhala s měřením a hlavně poskytla kritický nadhled a dohled nad formální stránkou této práce. Můj dík patří také kolegům z ČVUT v Praze, zejména doc. Ing. Aleši Havlíkovi, CSc., Ing. Ivaně Marešové, CSc., Ing. Petru Sklenářovi, Ph.D. a Ing. Danielu Mattasovi, CSc. Za dlouhodobou věcnou a inspirativní polemiku nad mou prací děkuji prof. Ing. Jaromíru Říhovi, CSc. Za umožnění klidné práce děkuji prof. Ing. Janu Šulcovi, CSc. Za odborný nadhled nad používanou terminologií děkuji doc. Ing. Vlastimilu Starovi, CSc. Za pomoc při měření děkuji Ing. Lucii Foltýnové, Ing. Petru Kudláčovi, Mgr. Andrei Kudláčové, Ing. Tomáši Rezbárikovi, Ing. Stanislavě Polónyové, Mgr. Kateřině Koláčkové, Ing. Pavlíně Václavíkové, PhDr. Markovi Václavíkovi, Mgr. Zuzaně Bílkové, Janu Zaorálkovi, Petru Skotnicovi, Ing. Janě Doležalové a Ing. Karlu Adamovi. Za pomoc při měření, provedení Subjektivních odhadů a odborné konzultace společných témat děkuji Ing. Ladislavu Roušarovi. Za pomoc při měření a inspirativní zájem o problematiku děkuji Ondřeji Mohylovi. Za poskytnutí informací z limnigrafických stanic a odbornou konzultaci tematiky limnigrafických stanic děkuji Mgr. Stanislavu Lejskovi a Ing. Ivu Winklerovi z ČHMÚ. Za rady a pomoc při vysoušení materiálu děkuji Bořivoji Macíkovi a Luboši Pařílkovi. Za závěrečnou kontrolu formální úpravy práce děkuji Ing. Ladislavu Dvořákovi, Ph.D., doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc. a Ing. Zbyňkovi Zachovalovi, Ph.D., kterému ještě děkuji za konzultaci k tématu stanovení zrnitostních křivek. Za poskytnutí zrnitostních křivek z povodí řeky Odry děkuji doc. Ing. Jaroslavu Veselému. Za náhled z praxe děkuji pracovníkům DHI, a.s., zejména Ing. Petru Jiřincovi. Za podporu a zázemí při přípravě měření, výpočtech a závěrečném psaní disertační práce děkuji své rodině.

OBSAH

1.	ÚVOD	10
2.	CÍLE PRÁCE	11
3.	TEORETICKÝ ROZBOR	13
3.1	DEFINICE	13
3.2	HISTORICKÝ VÝVOJ	13
3.3	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SOUČINITEL DRSNOST KORYTA	15
3.3.1	DRSNOST POVRCHU	17
3.3.2	DNOVÉ ÚTVARY	20
3.3.3	USAZOVÁNÍ A VYMÍLÁNÍ	23
3.3.4	VODNÍ STAV A PRŮTOK	24
3.3.5	ČASOVÁ PROMĚNLIVOST	25
3.3.6	ROZMĚRY A NEPRAVIDELNOSTI KORYTA.....	25
3.3.7	VEGETACE.....	25
3.4	PŘÍSTUPY KE STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI.....	28
3.4.1	EMPIRICKÉ ROVNICE	28
3.4.2	TABULKY SOUČINITELŮ DRSNOSTI.....	28
3.4.3	FOTOGRAFICKÉ KATALOGY	28
3.4.4	COWANOVA METODA.....	29
3.4.5	MĚŘENÍ VE VODNÍCH TOCÍCH.....	29
3.5	PROBLEMATIKA VÝPOČTU	31
3.5.1	VÝPOČTOVÉ MODELÝ	31
3.5.2	EKVIVALENTNÍ SOUČINITEL DRSNOSTI.....	32
3.5.3	ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY	32
3.5.4	PARAMETRICKÁ ANALÝZA.....	33
3.5.5	VYJÁDŘENÍ DRSNOSTI.....	34
3.5.6	NEJISTOTY VE STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI.....	37
3.6	ZAMĚŘENÍ TOKŮ	38
3.6.1	ZAMĚŘENÍ PŘÍČNÝCH PROFILŮ A HLADIN.....	38
3.6.2	PROBLEMATIKA PODÉLNÉHO SKLONU A HLOUBKY.....	39

3.7	ZRNITOST MATERIÁLU DNA	40
3.7.1	SÍTOVÝ ROZBOR.....	40
3.7.2	WOLMANOVA METODA	42
3.7.3	SUBJEKTIVNÍ ODHAD.....	44
3.7.4	OBEČNÉ POZNATKY	45
3.8	PRŮTOK.....	48
3.9	EXTERNÍ DATA	51
4.	METODY PRO STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI	52
4.1	STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI EMPIRICKÝMI ROVNICEMI.....	52
4.1.1	TYPY ROVNIC.....	54
4.1.2	ANALÝZA VYBRANÝCH ROVNIC.....	57
4.1.3	PODMÍNKY POUŽITÍ ROVNIC	57
4.1.4	KATEGORIE POPISNÝCH PARAMETRŮ KORYTA	58
4.1.5	STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI Z MĚŘENÍ V TOČÍCH.....	59
4.1.6	VÝPOČET SOUČINITELE DRSNOSTI, VÝBĚR EMPIRICKÝCH ROVNIC	64
4.1.7	VERIFIKACE.....	72
4.2	STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI TABULKAMI	77
4.3	STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI FOTOGRAFICKÝMI KATALOGY	82
4.4	STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI ROZŠÍŘENOU COWANOVOU METODOU.....	86
4.4.1	ROZŠÍŘENÁ COWANOVA METODA	86
5.	VÝSLEDKY	91
5.1	DÍLČÍ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	93
5.1.1	OBEČNÉ.....	93
5.1.2	EMPIRICKÉ ROVNICE	94
5.1.3	SOFTWARE CES.....	99
5.1.4	ZRNITOST MATERIÁLU.....	100
5.1.5	VEGETACE.....	101
5.1.6	POTENCIÁLNÍ ZDROJE CHYB	102
5.2	METODIKA	106

6. ZÁVĚR	109
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	112
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	120
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	125
SEZNAM OBRÁZKŮ	127
SEZNAM TABULEK.....	128
SEZNAM PŘÍLOH.....	131

1. ÚVOD

Při navrhování úprav a revitalizačních opatření vodních toků, stanovování rozsahu záplavových území, kapacity stávajícího koryta nebo dodatečné stanovení průtoku na základě povodňových značek je pro potřeby výpočtu nutné ve zkoumaném úseku toku stanovit vliv ztrát. V korytě vodního toku, které má pravidelný tvar, převažují ztráty třením nad ztrátami místními. Ztráty třením lze vyjádřit různě, ale v praxi se stalo nejpoužívanějším stanovení Manningova součinitele drsnosti n (je primárně uvažován, bude-li v následujícím textu zmínka o „součiniteli drsnosti“).

Součinitel drsnosti je určován na základě doporučení odborné literatury, znalosti poměrů řešené lokality, vlastních zkušeností a subjektivním úsudku pracovníka provádějícího expertní odhad. Ke stanovení součinitele drsnosti je potřeba přistupovat zodpovědně, protože po hloubce, která je měřitelná, je to druhý nejcitlivější parametr, který ovlivňuje vypočet proudění. Vyjádřit vlastnosti povrchu jediným součinitelem není snadné, což potvrdil pokus s 30 odborníky z oboru vodního hospodářství, kteří měli odhadnout součinitel drsnosti podle fotografií (Koutková, 2003). Vyhodnocením tohoto pokusu se ukázalo, že většina odborníků hodnoty součinitele drsnosti podhodnotila vzhledem k součinitelům drsnosti stanoveným na základě kalibrace modelu s použitím známých průtoků, které byly stanoveny hydrometrováním.

Otázka stanovení součinitele drsnosti je v odborné literatuře hojně zmiňována, ovšem komplexní pohled na problematiku, na základě které by bylo možné bez obav převzít hodnotu součinitele drsnosti pro vlastní výpočty, nebyl během rešeršní činnosti nalezen. Manningův součinitel drsnosti vyjadřuje veškeré ztráty v korytě, na které mají vliv zejména ztráty třením, ztráty místní (zejména v tocích s malým antropogenním ovlivněním - přírodní toky) a vegetace. Přestože se ve výpočtech předpokládá zjednodušení, že součinitel drsnosti koryta je v souvislosti s vodním stavem (hloubkou vody) neměnný, mnohá měření (Hicks, 1998) naznačují, že tomu tak není.

2. CÍLE PRÁCE

Stanovení Manningova součinitele drsnosti pro konkrétní úsek vodního toku a vodní stav je jednou ze základních otázek hydrauliky otevřených toků již dvě staletí. Chézyho rovnice (1) je podle současného poznání nejpoužívanější rovnicí pro výpočet rychlosti proudění v tocích. Seřadí-li se vstupní parametry Chézyho rovnice od největší citlivosti na změnu velikosti průtoku (hloubka h , Manningův součinitel drsnosti n , šířka ve dně b , podélný sklon hladiny i_H , sklon svahů $1:m$), pak součinitel drsnosti je po hloubce druhý nejvýznamnější parametr. Vzhledem k tomu, že je to jediný parametr, který se odhaduje, je potřeba jeho volbě věnovat značnou pozornost.

Cílem disertační práce je **navrhnout Metodiku pro stanovení nejpravděpodobnější hodnoty Manningova součinitele drsnosti otevřených koryt** především na základě měřitelných parametrů konkrétního vodního toku. Navržená Metodika stanovení součinitele drsnosti (dále v textu označována jako Metodika) umožňuje zpřesnit hodnotu součinitele drsnosti potřebného pro účely modelování ve vodním hospodářství.

Dílčími cíli bylo:

- shrnutí a podrobná analýza přístupů ke stanovení součinitele drsnosti dle současného stavu poznání problematiky (empirické rovnice, tabulky, fotografické katalogy, Cowanova metoda),
- získání vstupních dat (zaměření koryt a hladin, křivky zrnitosti materiálu dna, průtoky),
- vytvoření Rozšířené Cowanovy metody na základě vlastních naměřených dat,
- srovnání jednotlivých přístupů,
- vytvoření automatického výpočtu (v programu MS Excel) doporučené hodnoty součinitele drsnosti koryta empirickými rovnicemi dle Metodiky, Rozšířenou Cowanovou metodou, tabulkami a fotografickým katalogem, součinitele drsnosti dnových útvarů a vegetace a stavu pohybu splavenin.

Splnění výše uvedených cílů na základě analýzy faktorů ovlivňujících odpory proudění v tocích by mělo vést k výběru vhodné hodnoty součinitele drsnosti koryta na základě kombinace několika možných přístupů. Obdobné zpracování řešené problematiky nebylo během rešeršních studií nalezeno. Metodika je inovativním přístupem, který lze v praxi uplatnit při hydrotechnických výpočtech proudění v tocích (určení kapacity toku, návrh protipovodňových opatření, revitalizací toků, atd.).

Postup řešení:

- 1) **Shromáždit data z měření** na vodních tocích, kde je uveden kromě rozměrových, sklonových a zrnitostních parametrů také Manningův součinitel drsnosti. Jedná se o vlastní naměřená data a fotografie ze sledovaných lokalit moravských toků a data převzatá z externích zdrojů tak, aby postihovala co nejvíce vodních stavů. V případě vlastních dat stanovit reprezentativní součinitel drsnosti konkrétního měření. Získaná data slouží jako vstupy pro následné analýzy.

- 2) Stanovit různými přístupy (síťový rozbor, Wolmanova metoda, Subjektivní odhad) zrnitostní křivky materiálu dna sledovaných lokalit, analyzovat výsledky a kvalitu jednotlivých přístupů.
- 3) Shromáždit velké množství empirický rovnic různých autorů s různými vstupními parametry a možnostmi vyjádření drsnosti. Většinu rovnic lze rozdělit do několika typů, které se odlišují pouze zvolenými koeficienty, exponenty nebo kvantily zrnitostní křivky. Jsou-li známy podmínky použití rovnice, budou použity.
- 4) Rozdělit hodnoty každé z 9 kategorií (vybrané měřitelné parametry koryt) do 3 podkategorií (malé, střední, velké hodnoty parametru kategorie) - celkem tedy 27 podkategorií. Pro tyto podkategorie vypočítat součinitel drsnosti empirickými rovnicemi a vybrat empirické rovnice, které budou mít nejnižší hodnoty směrodatných odchylek a mediánů relativních rozdílů z měření stanovených a vypočítaných součinitelů drsnosti u největšího počtu podkategorií.
- 5) Provést verifikaci vybraných empirických rovnic na vstupních datech, která nebyla použita pro výše uvedený výběr empirických rovnic.
- 6) Stanovit pořadí empirických rovnic dle šesti způsobů na základě nejmenších relativních rozdílů z měření stanovených a empirickými rovnicemi stanovených součinitelů drsnosti.
- 7) Navrhnout Metodiku pro stanovení nejpravděpodobnější hodnoty Manningova součinitele drsnosti koryta.
- 8) Vytvořit výpočtový program v MS Excel, ve kterém bude po zadání vstupních parametrů, probíhat automatický výpočet nejpravděpodobnější hodnoty Manningova součinitele drsnosti empirickými rovnicemi, tabulkami a Cowanovou metodou a pomocí kterého lze vypočítat součinitel drsnosti dnových útvarů, trávy, stromů a stabilitu dna.

3. TEORETICKÝ ROZBOR

3.1 DEFINICE

Součinitel drsnosti je termín používaný vodohospodářskými inženýry pro účely vyjádření odporu proudění vody, který způsobuje materiál dna a svahů, vegetace a další parametry charakterizující vodní tok. Je jedním ze základních hydraulických parametrů, který u otevřených koryt ovlivňuje přírodní nebo umělé prvky vyskytující se v průtočném profilu a který ovlivňuje vypočítanou hloubku. Součinitel drsnosti je obvykle rozdílný v oblasti dna, svahů koryta a v inundaci (záplavové území mimo vlastní koryto). Při turbulentním pohybu se zvětšuje tangenciální napětí, které způsobuje větší ztráty třením než při pohybu laminárním (Yen, 1991).

3.2 HISTORICKÝ VÝVOJ

Dějiny moderní hydrauliky otevřených koryt začínají u francouzského hydrologa Antione de Chézyho. Chézyho rovnice (Chow, 1959) pro výpočet průměrné profilové rychlosti v $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i_E}, \quad (1)$$

kde $C [\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}]$ je Chézyho rychlostní součinitel, $R [\text{m}]$ je hydraulický poloměr a $i_E [-]$ je sklon čáry energie, byla vytvořena a ověřena experimenty prováděnými v roce 1769 východně od Paříže na kanále L'Yvette řeky Seiny [5]. Rovnice vychází z předpokladu rovnoměrného pohybu a předpokladu, že se voda v korytě pohybuje jako tuhé těleso, takže tření působí jen na styku vody a omočeného obvodu. Sílu tření uvažoval Chézy rovnoměrně rozloženou podél celého omočeného obvodu (Libý, 1970). Podle některých pramenů rovnici údajně odvodil již roku 1753 Brahms, jenž ovšem upadl v zapomnění. Od té doby vznikly desítky rovnic pro výpočet rychlosti v a Chézyho rychlostního součinitele C , postavené na nejrozumnějších základech. Většina rovnic je z mnoha důvodů již dávno zapomenuta, případně nahrazena novějšími (Mattas, 2003).

Významným pokrokem bylo použití čtyř veličin, které jsou zakomponovány v rovnici, která byla poprvé publikována roku 1891 irským inženýrem Robertem Manningem [6]. Mezi zmiňované veličiny patří tíhové zrychlení (síly zrychlení) ovlivňující podélný sklon (odpor dna), hydraulický poloměr mající význam střední hloubky (poměr mezi průtočnou plochou a omočeným obvodem) a viskozita (odporové síly). Manning vycházel ze 160 pokusů a 210 měření (konstantní podélný sklon dna a hydraulický poloměr $0,25 \text{ m} < R < 30 \text{ m}$) (Whatmore, 2010), [6] a ze sedmi v té době nejznámějších rovnic od autorů Du Buat (1786), Eyelwein (1814), Weisbach (1845), St. Venant (1851), Neville (1860), Darcy a Bazin (1865) a Ganguillet a Kutter (1869). Původně odvozenou empirickou rovnici

$$v = 32 \cdot \sqrt{R \cdot i_D \cdot \left(1 + R^{\frac{1}{3}}\right)}, \quad (2)$$

kde $i_D [-]$ je podélný sklon dna, Manning časem zjednodušil na tvar

$$v = C \cdot R^x \cdot i_E^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

a poté, co na základě výzkumu Humphreyho a Abbota na řece Mississippi stanovil hodnotu exponentu $x = 0,666$ neboli $2/3$, byla publikována výsledná rovnice [7]

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot i_E^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Manningova rovnice je prakticky jediná ze starých rovnic, která dnes v praxi (i přes řadu výhrad) patří k těm nejpoužívanějším (Mattas, 2003). V rovnici (4) je n [-] Manningův součinitel drsnosti, ale správně by se měl nazývat Ganguillet-Kutterův součinitel drsnosti, neboť tyto dva autoři jej v roce 1869 poprvé použili. V rovnici (4) hydraulický poloměr R při zmenšujícím se R uvádí vyšší průřezové rychlosti v , než jaké ve skutečnosti jsou. Pozdější autoři tento nedostatek kompenzují různými koeficienty (Martinec, 1966). V roce 1960 byla Manningova rovnice (4) začleněna do prvního hydraulického softwaru, kde měla pro omezení technického výkonu tehdejších počítačů přednost jednoduchost řešení. V následujícím období vznikalo velké množství empirických rovnic založených především na měřených datech. Později se objevily tendence tuto rovnici nahradit, případně použít jiné přístupy ke stanovení součinitele n . V novějších rovnicích se objevuje součinitel ztrát třením λ [-] (Mattas, 2003).

Pozornost si zaslouží myšlenka závislosti součinitele drsnosti na velikosti zrn materiálu dna. Každé zrno (idealizovaný trojosý elipsoid) má tři hlavní rozměry: délka a [m] (nejdelší), šířka b [m] (prostřední) a tloušťka c [m] (nejkratší). Podle uložení v toku lze určit rozměr zrna ve směru A (vodorovně, ve směru proudění), B (vodorovně, kolmo ke směru proudění) nebo C (svisle, kolmo ke směru proudění). Předpokládá se, že se zrno po dně koryta pohybuje valením. Ze zkušeností a pozorování vyplývá, že nejsnadněji se zrno valí kolem svých dvou nejkratších rozměrů, tedy b a c . Podle tohoto předpokladu bude zrno na dně nejpravděpodobněji uloženo rozměrem a ve směru B (dle (Smetana, 1957) je u plochých oblázků rozměr a ve směru A), rozměrem b ve směru A a rozměrem c ve směru C (Mattas, 2003). Charakteristickým rozměrem je ale střední rozměr b , viz kapitola 3.2, přestože právě nejkratší osa c nejvíce ovlivňuje drsnost koryta. Strickler uvádí, že poměr velikosti os $a:b:c$ bývá 3:2:1 (Macura 1990). Znalost velikosti zrn je potřebná pro velké množství empirických rovnic různých autorů, kterými se odhaduje součinitel drsnosti. Průkopníkem v této oblasti byl Albert Strickler (Marešová, 1992), do jehož rovnice je zadávána pouze velikost některého z kvantilů křivky zrnitosti. Křivka zrnitosti vyjadřuje závislost hmotnostního zastoupení frakcí zrn ve vzorku materiálu.

Běžně používaným přístupem k určení součinitele drsnosti jsou tabulky různých autorů. Tabulky obsahují stručný popis koryta a obvykle je uvedena hodnota pro dobrý, průměrný a špatný stav povrchu. Někteří autoři podporují vizuální stanovení součinitele drsnosti fotografickými katalogy, což pomáhá především při odhadu součinitele drsnosti svahů. Cowanův pokus standardizovat proceduru odhadu pomocí několika slovně ohodnocených součinitelů je z metodického hlediska přínosný, ale vágností slovního popisu jednotlivých parametrů k přílišnému zpřesnění odhadu nevede (Mattas, 2003).

Vývoj ve stanovení součinitele drsnosti ovlivnil Einstein, který rozlišoval odpory třením (mikrodrsnost) a odpory dnových tvarů (makrodrsnost). Celkový hydraulický poloměr R v rovnici

$$R = R' + R'', \quad (5)$$

je součtem hydraul. poloměru R' [m] od mikrodrsnosti a R'' [m] od makrodrsnosti (Sklenář, 2004).

Na základě dat ze 450 řek v USA, Kanadě a Novém Zélandu dělí Rosgen kategorie říčních systémů na sedm hlavních typů a šest podkategorií dle materiálu koryta. Tato technika vystihuje morfologické, hydraulické a biologické vztahy přirozeného stabilního toku (Rosgen, 1994) a (Rosgen, 2007), ale pro potřeby stanovení součinitele drsnosti není přínosná.

Protože tradiční přístup empirických rovnic, ve kterých se vyskytuje jeden odporový součinitel (např. n), nedokáže komplexně vystihnout jevy ovlivňující proudění vody, pozornost vědců se upíná ke genetickému programování. Základem je databáze vstupních dat z měření ve vodních tocích, která má být obsáhlá, kvalitní a pestrá v oblasti rozměrů a typů povrchů koryt. Výsledná empirická rovnice v sobě pak obvykle zahrnuje více detailů a bývá jednodušší než klasické rovnice (Keijzer, 2005).

Výpočetní výkon, sofistikovanější možnosti zaměření území a možnost automaticky přiřadit hodnoty součinitelů drsnosti u rozsáhlejších oblastí umožňují stále častěji využít hydrodynamické 2D modelování, kterým lze na základě výpočtu pohybu vody lépe vystihnout záplavová území a to zejména v případě složité městské zástavby (Whatmore, 2010). Širšímu použití 2D modelů stále brání především časová a finanční náročnost přípravy vstupů a potřeba kvalifikovaných pracovníků k sestavení a kalibraci modelu. Určitým kompromisem je použití 1,5D (1D síťového) modelu, který do jisté míry uvažuje i jevy, které probíhají v kolmém směru vzhledem k ose toku (Krupička, 2007).

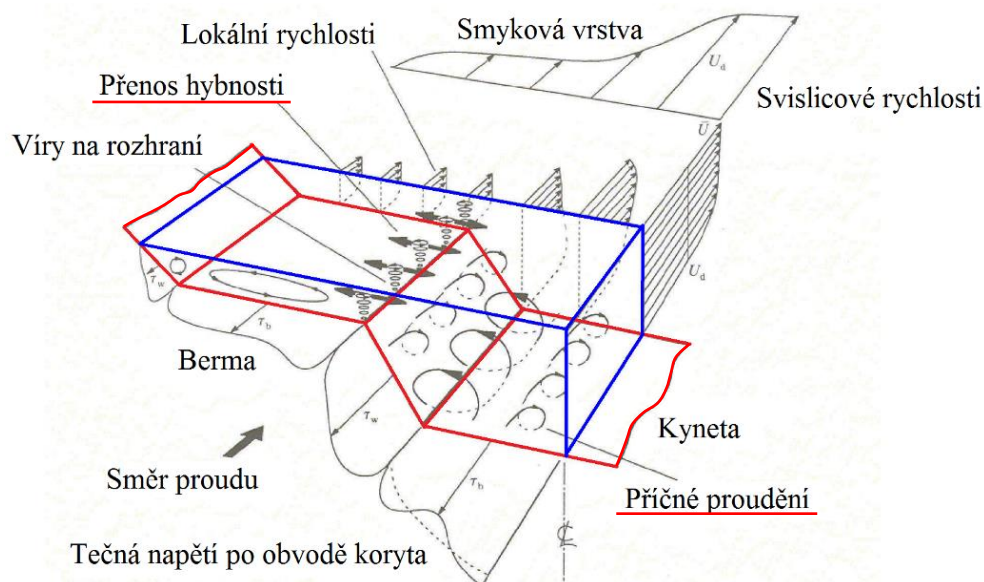
Přestože na hodnotě rychlostního součinitele C závisí přesnost celého výpočtu, jeho správné určení je jednou ze základních otázek hydrauliky toků už téměř 200 let (Brachtl, 1962). Zpočátku jednoduché stanovení součinitele drsnosti n se stává velmi komplexním, protože vyžaduje znalost hydrologie, statistiky, hydromechaniky, hydrauliky, geologie a mechaniky (Žic, 2009).

3.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SOUČINITEL DRSNOST KORYTA

Výsledný součinitel drsnosti koryta je značně proměnný a ovlivňuje jej několik parametrů, mezi které se řadí tvar příčného profilu koryta, druh materiálu dna a svahů, výskyt výmolů, nánosů a dnových útvarů, odpadu nebo přítomnost vegetace na svazích či nánosech.

Manningův součinitel drsnosti n se sice pro konkrétní příčný profil zadává konstantní hodnotou, ale ve skutečnosti je závislý na vodním stavu a ročním období. Součinitel drsnosti závisí na mnoha faktorech, které spolu do značné míry souvisí (Brachtl, 1962). Materiál dna a členitost koryta vytváří za běžných průtoků hlavní část odporů. Za povodní průtok výrazně ovlivňují svahy, případně bermy koryta a záplavová území. Obecně lze říci, že vše, co zvětšuje turbulenci proudu, zvětšuje i součinitel drsnosti. Nerovnoměrné proudění způsobuje víry, které se zvětšují nebo se rozpadají, viz Obr. 1. Velké zakřivení proudnic většinou vytváří úplavy, tedy stabilní oblasti s recirkulačním prouděním, které mohou způsobit erozi dna nebo ukládání materiálu (Žic, 2009).

Součinitel drsnosti je dán spolupůsobením dvou složek: mikrodrsnosti a makrodrsnosti. Někdy se uvádí ještě přechodový stav - mesodrsnost. **Mikrodrsnost** lze obecně předpokládat u koryt s nepohyblivým dnem, velkou hloubkou, mírným podélným sklonem a případnými jemnozrnnými sedimenty. Pro mikrodrsnost platí, že $\frac{h}{d_{84}} \geq 4$, $\frac{h}{d_{50}} \geq 7,5$ a $\frac{h}{c_{50}} \geq 15$, kde c_{50} [m] je 50% kvantil velikosti nejmenší osy zrna, d_{50} [m] je 50% a d_{84} [m] je 84% kvantil velikosti prostřední osy b zrna (Marešová, 1992).



Obr. 1 Charakter proudění a tečná napětí ve složeném korytě (Klouček, 2008)

Makrodrsnost lze obecně předpokládat u horských a podhorských koryt s malou hloubkou, velkým podélným sklonem a hrubozrnnými sedimenty (Klouček, 2008). Velikost zrn je řádově srovnatelná s hloubkou vody h [m]. Velikostí, mírou ponoření, tvarem, četností a uspořádáním zrn v korytě je ovlivněn charakter proudění (Hey, 1982). Na přítomnost velkých zrn v korytě často upozorňuje vyboulení vodní hladiny nebo dokonce vodní skok (přepadem vzniká bystřinné proudění). Na makrodrsnosti se také podílí dnové útvary. Některé studie ukazují, že do výpočtu součinitele drsnosti v případě makrodrsnosti by mělo být zahrnuto Froudovo číslo Fr [-], Reynoldsovo číslo Re [-], pohyb splavenin a provzdušnění proudu (Yager, 2007). Statistické vyhodnocení charakteristik hrubozrnného dna je nutné provést na relativně velké ploše dna nebo délce toku. Pro makrodrsnost platí dle Bathursta, Li a Simonse, že $\frac{h}{d_{84}} \leq 1,2$, $\frac{h}{d_{50}} \leq 2$ a $\frac{h}{c_{50}} \leq 4$.

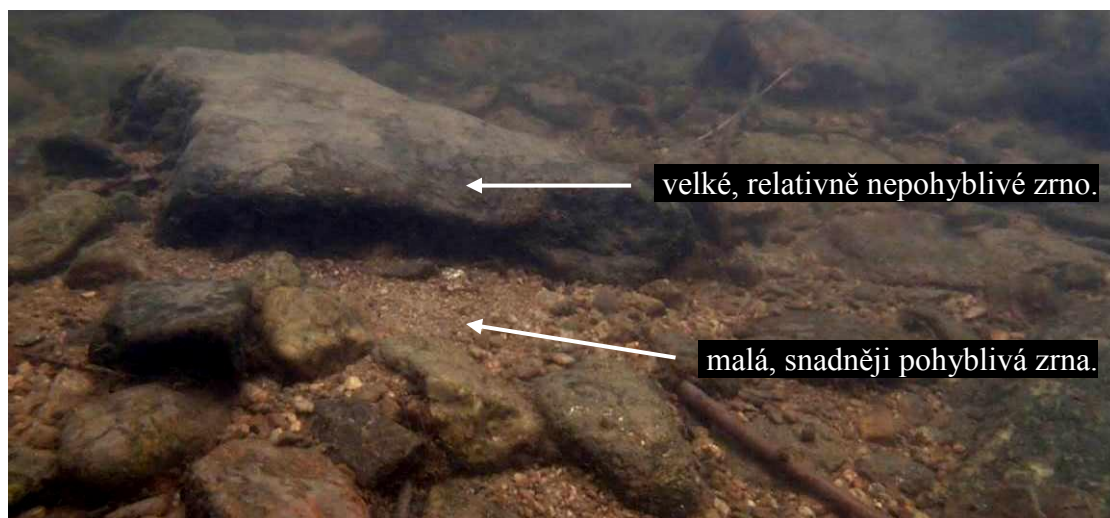
Uvedené meze odpovídají poznatkům Martince, který uvádí, že vliv velkých dnových zrn se projevuje zejména při (Marešová, 1992) $\frac{R}{d_{50}} \leq 3$.

3.3.1 DRSNOST POVRCHU

Plošná drsnost povrchu (někdy nazývána mikrodrsnost) vyjadřuje míru zasahování výčnělků materiálu (např. beton, zrna dnového materiálu), které zpomalují proudění, do průtočného profilu. Plošná drsnost povrchu představuje průměrné (reprezentativní) vertikální odchylky skutečného povrchu od ideálně hladkého. Jedná se zejména o výstupky, které přecházejí mezní vrstvu a tím způsobují víry. Víry se pak odtrhávají od stěn a postupují do jádra proudu, kde zvětšují jeho turbulenci a tím i odpory (Libý, 1970).

Plošná drsnost povrchu je často považována za jediný faktor ovlivňující součinitel drsnosti. Obecně lze říct, že součinitel drsnosti je u jemnozrnných povrchů nízký a relativně málo ovlivnitelný změnou hloubky (vodního stavu - srovnávací rovina je ve dně koryta), u hrubozrnných povrchů je součinitel drsnosti vysoký a většinou proměnný v závislosti na vodním stavu. Hodnota součinitele drsnosti se zvětšuje s velikostí a hustotou vyčnívajících zrn. Velká zrna materiálu dna mohou být geometricky zařazena do makrodrsnosti. Součinitel drsnosti hrubozrnného nepravidelného dna koryta se může snížit, dojde-li k jeho zarovnání splaveninami.

Dno koryta tvoří krycí vrstva (přirozená dnová dlažba), což je hrubozrnnější materiál, který chrání před vyplavením spodní vrstvu jemnějšího materiálu, viz Obr. 2. Dojde-li během povodně k odnosu krycí vrstvy, je dno výrazně erodováno. Stabilita krycí vrstvy závisí na míře zakotvení větších zrn do dna koryta (Mayio, 1997). Zrnitostní rozbor pro účely stanovení součinitele drsnosti by se měl provádět z materiálu krycí vrstvy.



Obr. 2 Krycí vrstva dna koryta v lokalitě Skryje

K odhadu součinitele drsnosti dna n lze využít Stricklerova výpočtu, kdy lze ze znalosti procentuálních zastoupení velikosti zrna d_x [m] (kvantil) a empirického koeficientu c_1 dle rovnice

$$n = \frac{c_2 \sqrt{d_x}}{c_1} \quad (6)$$

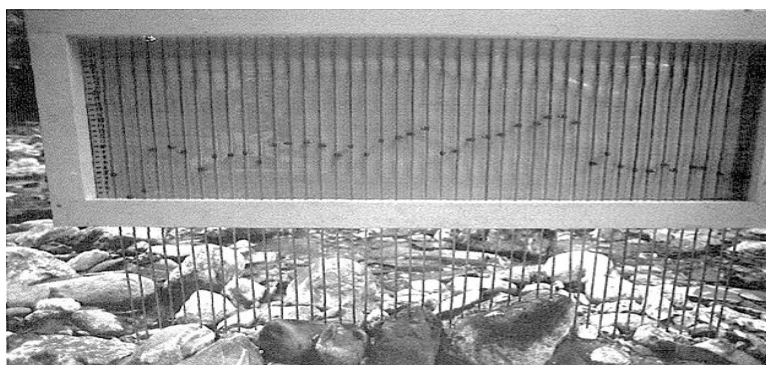
přímo stanovit součinitel drsnosti dna. Strickler uvažoval pro d_{50} koeficient $c_1 = 21,1$ a exponent $c_2 = 6$ (Yen, 1991). Stricklera následovali další vědci, kteří pro různé kvantily d_x

stanovovali své empirické součinitele c_1 (Yen, 1991). Přestože je Stricklerově rovnici vytýkáno, že pouze velikostí zrna nelze součinitel drsnosti plně vystihnout, stal se tento výpočet oblíbeným. Rovnici (6) lze použít spíše pro mikrodrsnost. Pro makrodrsnost je nevhodná, protože při proudění kolem velkých zrn (např. balvanů) nezohledňuje jejich tvar, zaoblení, uspořádání v proudu a velikost nárazové plochy (rozměry zrn ve směru uložení B a C).

Z českých autorů se problematice součinitelů drsnosti věnoval v rozsáhlém výzkumu například (Martinec, 1958) a (Martinec, 1966), s velkým množstvím dat pracovali Malíšek a Novák, podhorskými a horskými toky se zabývala (Marešová, 1992), závislostí na podélném sklonu se zabýval (Mattas, 1999) a (Mattas, 2003), zrnitostní charakteristiky zpracovával (Veselý, 2002), jevy během povodňových událostí zkoumal (Havlík, 2005), fotografickými katalogy a pohyblivým dnem se zabýval (Matoušek, 2008).

Velké množství autorů se zabývá problematikou stanovení součinitele drsnosti pomocí zrnitostního rozboru. Analýza zrnitosti probíhá na reprezentativním odebraném vzorku materiálu dna. Při odběru je nutné, aby odběr byl zcela náhodný. Nemělo by dojít k diskriminačnímu odběru materiálu, kdy se ze subjektivních důvodů odebírá přednostně určitá frakce materiálu. V praxi lze uplatnit některý z následujících vybraných postupů:

- Prosévací pokus (sítový rozbor) - odběr několika kg materiálu, vysušení, prosévání (většinou vibrační), vhodné pro jemnozrnný materiál,
- Wolmanovu metodu - odběr 100 až 150 hrubozrnných zrn ve třech liniích ve směru proudění, měření středního rozměru b , metoda vhodná pro hrubozrnný materiál a je použitelná do hloubky 0,6 m (Smart, 2004),
- Liniový odběr - odběr minimálně 150 velmi hrubých zrn v příčném řezu, měří se střední rozměr b , lze použít měřicí zařízení na Obr. 3 (De Jong, 1992), (Smart, 2004),



Obr. 3 Zařízení pro liniové měření výstupků

- Rozprostření písku - známý objem sypkého materiálu se vsype do prostoru známé půdorysné plochy, vyjádří se průměrná velikost výstupku, neznámá zrnitostní křivka, nelze použít pod vodou (Smart, 2004), pro účely stanovení součinitele drsnosti to není vhodná metoda,
- Laserové skenování - bezkontaktní, rychlé a přesné měření velikosti výstupků rozsáhlejšího území z letadla, nelze použít pod vodou a pro jemný materiál, drahý provoz (Smart, 2004), pro účely stanovení součinitele drsnosti to není vhodná metoda.

Vypovídací schopnost křivky zrnitosti úzce souvisí s odebraným množstvím materiálu nebo délkou úseku toku, ve kterém jsou odběry prováděny. Minimální reprezentativní hmotnost nebo množství odebíraných zrn není nikde závazně stanovena. Lze se řídit následujícími doporučeními:

- dle Diplase (Bunte, 2001) je minimální hmotnost $m_{\min}$ [kg]

$$m_{\min} = 200 \cdot d_{\max}^3 \cdot \rho_b, \quad (7)$$

kde $d_{\max}$ [m] odpovídá největším zrnům lokality pro zrna do 90 mm, hustota materiálu dna je doporučena $\rho_b = 2300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a odběrná plocha $A [\text{m}^2]$ má být větší než

$$A = 100 \cdot d_{\max}^2, \quad (8)$$

- dle DVWK (Bunte, 2001), je minimální hmotnost

$$m_{\min} = 712,4 \cdot d_{\max}^{1,43}, \quad (9)$$

kde $d_{\max}$ [m] se uvažuje pro zrna větší než 60 mm,

- dle ASTM C136-71 je (Bunte, 2001)

$$m_{\min} = 2596 \cdot d_{\max}^{1,5}, \quad (10)$$

- dle kanadských standardů (Bunte, 2001) je

$$m_{\min} = 2881,6 \cdot d_{\max} - 47,56, \quad (11)$$

- dle Limerinose (Limerinos, 1970) je více než 100 zrn dostatečně spolehlivé množství na vytvoření křivky zrnitosti.

Tab. 1 Orientační minimální hmotnost odebíraného vzorku materiálu dna

Maximální velikost zrna $d_{\max}$ [mm]	10	20	50	100	150	200	300
$m_{\min}$ dle Diplase (Bunte, 2001)	0,5	4	58	-	-	-	
$m_{\min}$ dle DVWK (Bunte, 2001)	-	-	-	26	47	71	127
$m_{\min}$ dle ASTM C136-71 (Bunte, 2001)	3	7	29	82	151	232	427
$m_{\min}$ dle kanadské normy (Bunte, 2001)	-	10	97	241	385	529	817

Orientační minimální hmotnost odebíraného vzorku uvádí Tab. 1. Lze konstatovat, že v případě dodržení výše uvedených doporučení (Bunte, 2001), by odebíraný vzorek materiálu se zrny většími než frakce štěrku (2 mm až 32 mm) značně nabýval na hmotnosti. Např. (Veselý, 2002) odebíral 20 kg z krycí vrstvy dna a 30 kg až 40 kg ze spodní vrstvy dna. Odebrané množství materiálu ze sledovaných lokalit má obvykle 5 kg až 20 kg (Smelík, 2012b). V naprosté většině případů je to značně nízká hodnota, a proto nelze očekávat, že by u toků s hrubozrnným materiálem dna byly zachyceny větší frakce materiálu (kameny, valouny, balvany).

V literatuře se často objevuje pojem střední zrno d_s [m]. Nelze ale spolehlivě určit, zda se jedná o efektivní zrno d_{ef} [m], často používaný kvantil d_{50} [m] nebo d_{55} [m]. Chyba ve stanovení

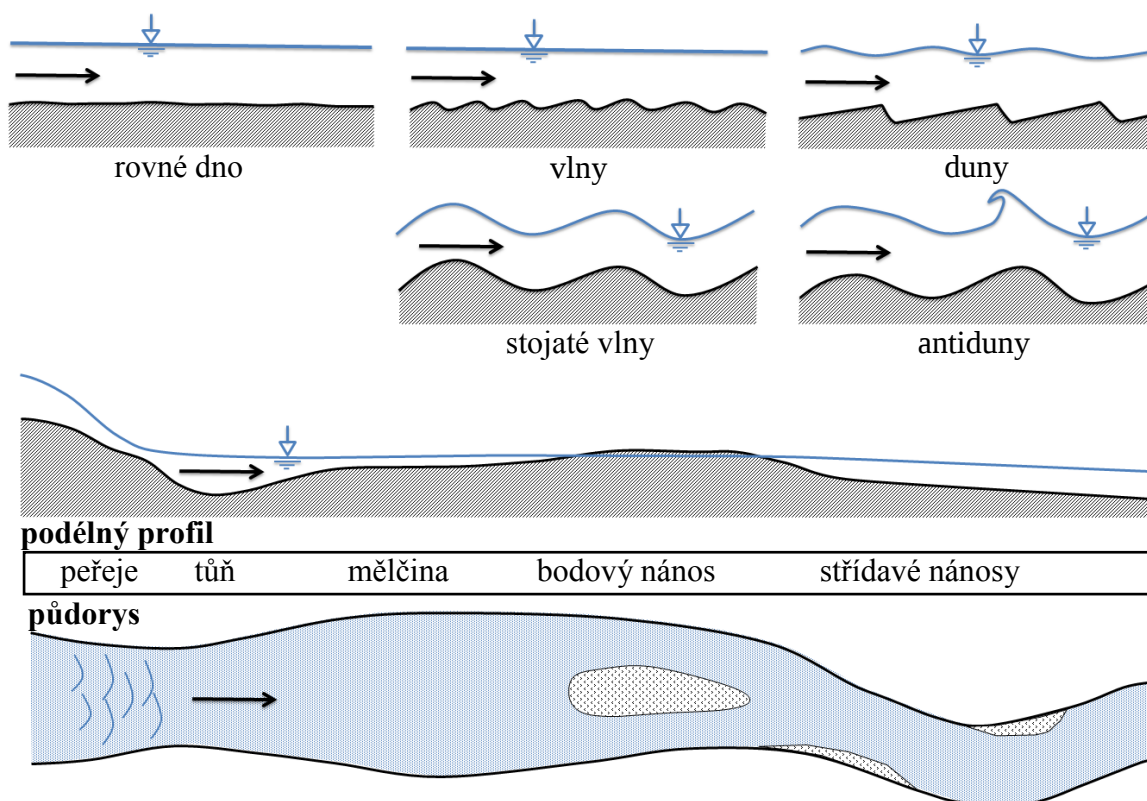
velikosti zrna ale není zásadní. Je-li chyba při určení velikosti zrna 100 %, chyba ve stanovení součinitele drsnosti bývá jen 15 % až 25 %. Je-li chyba při určení velikosti zrna 50 %, chyba ve stanovení součinitele drsnosti bývá jen 8 % až 15 % (Patočka, 1989).

3.3.2 DNOVÉ ÚTVARY

V korytě s výraznějším splaveninovým režimem se mohou ve specifických případech vytvořit pravidelné dnové útvary. Svým účinkem je lze zařadit mezi makrodrsnost, přestože jsou tvořeny jemným materiálem, nejčastěji pískem nebo šterkem. Svým tvarem zvětšují intenzitu turbulence proudu a součinitel drsnosti koryta. S dnovými útvary se lze setkat především u velkých řek nebo na tocích s malým podélným sklonem. Bližší specifikace je znázorněna v Obr. 5.

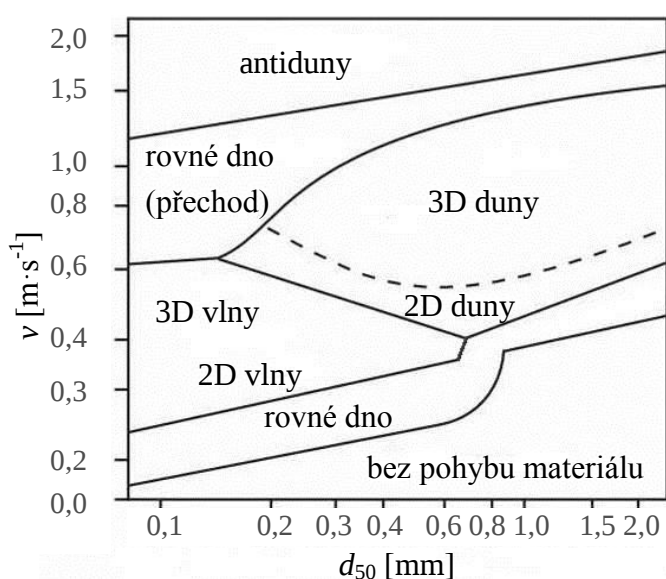
Dosáhne-li výška dnových útvarů několika metrů, jsou velkým nebezpečím pro nákladní lodě plující v řekách nebo kanálech. Lodě mohou být nárazem do takových útvarů poškozeny. Přestože by k takovým situacím v ČR nemělo dojít, je vhodné se o dnových útvarech zmínit. Nejčastěji se vyskytující dnové útvary, viz Obr. 4, jsou dle (Martinec, 1966), (Výbora, 1981), (Graf, 1984), (Arcement, 1989), (Gordon, 1992), (Fisher, 2003) následující:

- **rovné / hladké dno** - počáteční stav bez dnových útvarů, téměř rovné dno s jemnými sedimenty,
- **vlny / vlnky / vrásky** - malé, délka do 0,30 m až 0,45 m, výška do 0,03 m, v podélném směru tvar kolísá mezi trojúhelníkovým s mírnými sklony svahů a sinusovým, nezávislé na průtoku,
- **duny** - menší než nánosy a delší (0,5 m až 5,4 m) než vlny, výška cca 10 % hloubky, jsou mimo fázi s hladinovými vlnami, poznají se dle malého vyboulení hladiny způsobené víry za hřebenem duny, vznikají za větších rychlostí a větších množství splavenin než vlny, podélný profil je trojúhelníkový s mírným náběhovým svahem (na něm se mohou tvořit sekundární drobné pískové vlny) a se sklonem sestupného svahu, který je blízký úhlu vnitřního tření materiálu, pohybují se se směrem proudění, generují největší součinitel drsnosti,
- **antiduny** - při bystrinném proudění, téměř sinusový podélný profil, migrují proti proudu, při velkých rychlostech a transportech splavenin, hladinové vlny se protiproudě lámou (vodní skok), jejich výška se zvětšuje se zvětšující se rychlostí a Froudovým číslem Fr ,
- **stojaté vlny** - mají sinusový průběh, vznikají přibližně při kritickém pohybu, snadněji vznikají s většími velikostmi zrn,
- **peřeje** - vyskytují se v místech s velkým podélným sklonem, předchází i následuje je tůň,
- **tůně** - hlubší místa s jemnějším materiálem, která byla erodována po ztrátě dnové dlažby, vyskytují se v tocích s hrubozrnným materiálem,
- **mělčiny** - rychleji se pohybující voda v malých hloubkách a v hrubším materiálu,
- **nánosy / lavice** - vznikají usazováním materiálu, délka nánosů ve směru proudu je větší než jejich šířka, mají výšku srovnatelnou s hloubkou a tendenci růst od dolního konce, mohou být stabilizovány vegetací, široké bodové nánosy se nacházejí uprostřed toku, sekvence užších střídavých nánosů bývá připojena ke konvexní straně oblouku nebo k přítoku.

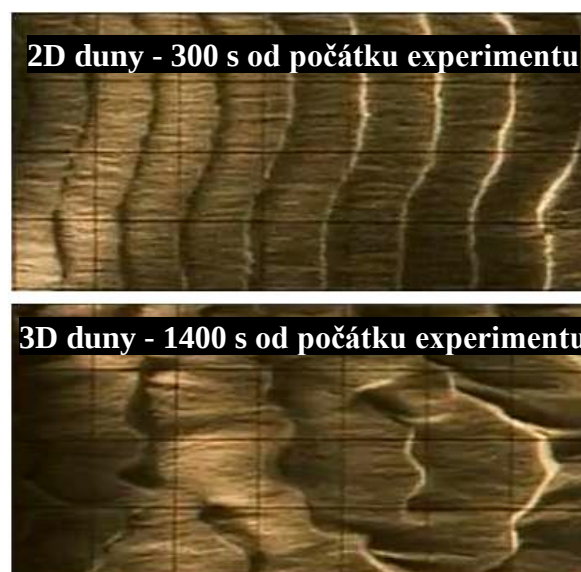


Obr. 4 Schématické znázornění dnových útvarů

S jistotou nelze stanovit, který typ dnového útvaru se v konkrétním úseku toku vyskytne, ale pomocí některých parametrů lze takový výskyt předpovědět. Mezi takové parametry patří velikost zrn sedimentu, množství transportovaných splavenin, rozměry koryta, rychlost proudění a podélný sklon dna. S posledními třemi jmenovanými pak souvisí režim proudění (říční, kritický, bystrinný), respektive Froudovo číslo. Dle zvětšující se hodnoty Froudova čísla Fr lze dnové útvary seřadit v tomto pořadí: rovné dno za pomalého proudění, vlny, duny, rovné dno za rychlého proudění, antiduny, přeje.



Obr. 5 Předpokládané oblasti s dnovými útvary



Obr. 6 Vizualizace 2D a 3D dun

Na základě mnoha pozorování a měření lze pomocí grafu na Obr. 5 stanovit předpokládaný typ dnového útvaru. Obr. 5 je upraven na základě (Harms, 1982) a vychází ze Shieldsova diagramu. Na Obr. 5 je dvakrát zmíněno rovné dno. To může vzniknout v říčním režimu s malým množstvím transportovaných splavenin, ale také v oblasti kritického a bystřinného pohybu, kdy během turbulentního proudění a s velkým množstvím transportovaných splavenin dojde k vyplavení dnových útvarů (někdy nazývaný jako přechodový stav) [8]. V případě pískových 2D vln a 2D dun dochází při delším působení stejných podmínek k provázání a superpozici okolních úvarů a vzniku 3D vln a 3D dun, jak ukazuje Obr. 6 (Venditti, 2005), [22].

Největší vliv na součinitel drsnosti mají duny. Následující odstavec vychází především ze znalostí a zkušeností, které byly získány během zahraniční stáže v Nizozemsku na TU Twente, kde se na základě laboratorních měření zabýval výzkumem chování 2D dun za proměnného průtoku. Přestože dnové útvary významně ovlivňují výsledný součinitel drsnosti, obvykle nejsou pro složitost výpočtu a nejistotu vstupních údajů uvažovány.

Duny vypadají na první pohled jako pískové vlny, ale odlišují se rozměry, tvarem a ovlivněním hladiny. Vznikají za větších rychlostí a většího množství transportovaného množství splavenin. Víry, které vznikají za hřebenem duny, způsobují za tímto místem drobné vyboulení vodní hladiny. Rozměry dun jsou závislé na průtoku. Po zvýšení průtoku se rychleji mění délka než výška duny. Velikost rozměrů v daném čase od počátečního stavu závisí na počátečních rozměrech dun, době vývoje, předpokládaných koncových rozměrech dun pro daný průtok a vlastnostech sedimentu. Vývojem rozměrů v čase se popisuje exponenciální rovnice dle (Coleman, 2005). Stanovení vstupních parametrů pro výpočet a zejména koncových rozměrů dun je obtížné. To ukázala i analýza dat a následné statistické vyhodnocení dat z měření v laboratorním žlabu délky 30 m a šířky 1 m, ve kterém byl písek s $d_{50} = 0,8$ mm a kde se měřila pomocí tří ultrazvukových senzorů úroveň dna a hladin pro čtyři průtoky a podélné sklony (zachování stejné hloubky vody po celé délce žlabu) (van Duin, 2012). Cílem každého měření bylo zaznamenávání rozměrů dun do doby, než se rozměry pro konkrétní průtok ustálí. Po eliminování některých vlivů při vyhodnocení měření se ukázalo, že časový vývoj naměřených rozměrů dun je většinou velmi podobný průběhu popisovaném v (Coleman, 2005).

Během statistického zpracování dat bylo potřeba:

- odseparovat náhlé zvýšení rozměrů (zachycení plovoucího zrna citlivým senzorem),
- nalézt úsek žlabu, ve kterém je podélný sklon dna a hladiny téměř rovnoběžný,
- stanovit průměrné rozměry dun v případě, že se ve žlabu vyskytuje jen několik dlouhých dun (např. jen 4) s odlišnými rozměry - pro jistotu srovnat s rozměry dun z předchozího a následujícího měření,
- rozhodnout, zda se skutečně jedná o koncový stav rozměrů dun nebo o dočasné ustálení,
- stanovit pro konkrétní průtok koncové rozměry dun, přestože se pro stejné hodnoty průtoku (průtok v předešlém experimentu byl nižší nebo vyšší) mohou rozměry měnit.

Dle (van Rijn, 1990), (Julien, 1995) a (Paarlberg, 2008) lze celkový Manningův součinitel drsnosti n_{celk} získat výpočtem, který zahrnuje mikrodrsnostní výšku zrn k_{zrn} (absolutní výška zrn) a makrodrsnostní výšku dun k_{duny} (absolutní výška dun), dle následujících rovnic:

$$n_{celk} = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{C_{celk}}, \quad (12)$$

$$C_{celk} = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h}{k_{celk}}\right), \quad (13)$$

$$k_{celk} = k_{zrn} + k_{duny}, \quad (14)$$

$$k_{zrn} = 3,0 \cdot d_{90}, \quad (15)$$

$$k_{duny} = 1,1 \cdot \gamma \cdot H_{duny} \cdot \left(1 - e^{\frac{-25 H_{duny}}{L_{duny}}}\right), \quad (16)$$

$$H_{duny} = 2,5 \cdot h^{0,7} \cdot d_{50}^{0,3}, \quad (17)$$

$$L_{duny} = 6,5 \cdot h, \quad (18)$$

kde R je hydraulický poloměr [m], C_{celk} je výsledný Chézyho rychlostní součinitel [$m^{0,5} \cdot s^{-1}$], h je průměrná hloubka vody v korytě [m], k_{celk} je výsledná absolutní výška zrn a dun [m], d_{90} je 90% kvantil zrna z křivky zrnitosti [m], γ [-] je tvarový faktor související se sklonem sestupného svahu dun (blízký úhlu vnitřního tření) zde uvažovaný poloviční hodnotou, tedy 0,35, která odpovídá průměrné výšce dun (pro maximální výšku duny se uvažují hodnoty v rozmezí od 0,7 do 1,0), H_{duny} je průměrná výška dun [m], L_{duny} je průměrná délka dun [m] a d_{50} je 50% kvantil zrna křivky zrnitosti. Při srovnání vypočtených hodnot L_{duny} s několika naměřenými daty z laboratorního žlabu lze konstatovat, že konstanta 6,5 byla zvolena vhodně.

3.3.3 USAZOVÁNÍ A VYMÍLÁNÍ

Součinitel drsnosti se může v čase měnit vlivem eroze dna nebo usazováním materiálu na dně. Usazením transportovaných splavenin se může nepravidelné dno koryta zarovnat tak, že se sníží součinitel drsnosti. Naopak vymílání dna koryta může způsobit zvýšení součinitele drsnosti. Schopnost koryta odolávat dnové erozi závisí na složení krycí vrstvy dna. Během zvýšeného průtoku se z ní částečně vyplaví jemné frakce (Macura, 1990) a dojde-li k dosažení určitého průtoku, uveďte se do pohybu i tato vrstva (Martinec, 1958). Parametrem, který ovlivňuje stabilitu dna, součinitel drsnosti dna a množství transportovaného materiálu, je Shieldsovo kritérium θ [-] a Shieldsův graf, viz Obr. 7 (Roušar, 2013). Dojde-li k překročení Shieldsova kritického čísla, pravděpodobně dojde i k porušení stability dna. Shieldsovo kritérium se počítá dle rovnice

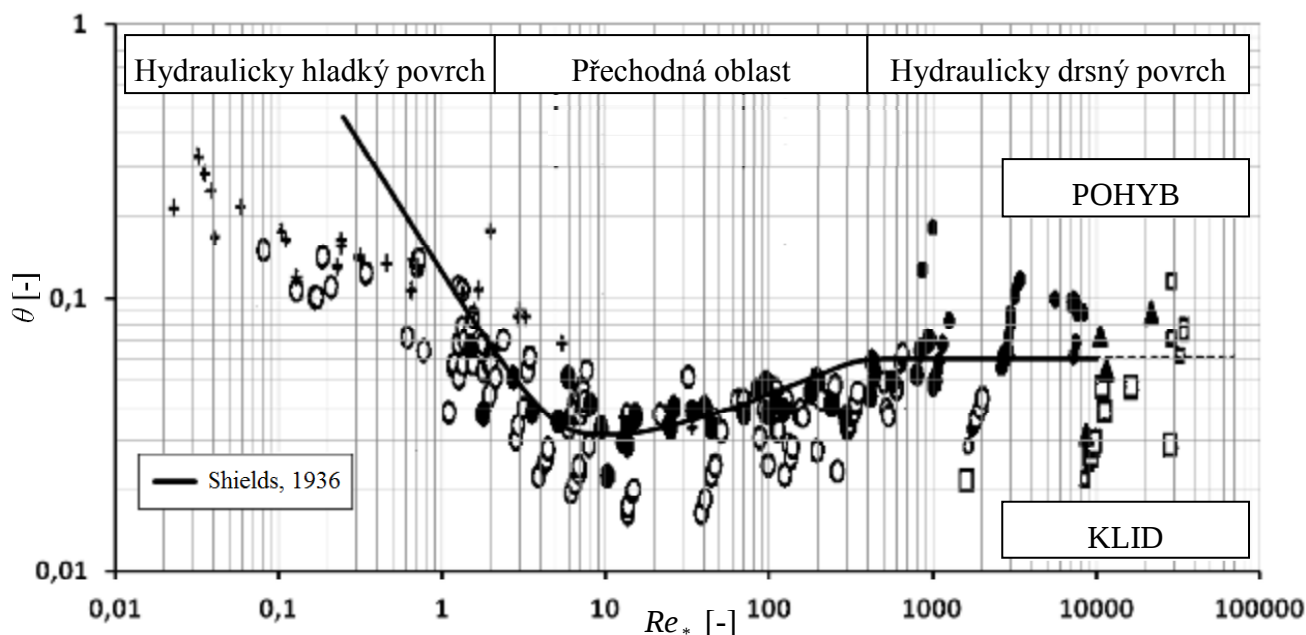
$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}}, \quad (19)$$

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot i_H, \quad (20)$$

$$Re_* = \frac{v_* \cdot d_{50}}{\nu}, \quad (21)$$

$$v_* = \sqrt{g \cdot R \cdot i_H}, \quad (22)$$

kde τ [Pa] je smykové napětí, ρ_s [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota zrn (obvykle 2 650 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota vody, R [m] hydraulický poloměr, Re_* [-] třecí Reynoldsovo číslo, v_* [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] třecí rychlost a ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] kinematická viskozita vody [9].



Obr. 7 Shieldsův diagram

3.3.4 VODNÍ STAV A PRŮTOK

V praktických výpočtech se předpokládá součinitel drsnosti nezávislý na změně vodního stavu. Bylo ale zjištěno, že tento předpoklad není správný (Chow, 1959), (Hicks, 1998). Při změnách vodního stavu se součinitel drsnosti může:

- snížit - při zvyšování vodního stavu, je-li na svazích koryta součinitel drsnosti menší než na dně,
- stagnovat - svahy a dno koryta jsou pravidelné s podobným součinitelem drsnosti (většinou umělé kanály),
- zvýšit - při malých vodních stavech a při proudění v zarostlé inundaci, při zvýšeném vodním stavu v případě opevnění svahů hrubozrnným materiálem nebo u svahů zarostlých vegetací.

V přirozeném říčním korytě bývá hodnota n nejnižší při plném korytě a zvětšuje se při stoupnutí nebo poklesu hladiny. Je-li hloubka vzhledem k velikosti zrn na dně malá, je součinitel drsnosti velký (Arcement, 1989). Tento jev může být částečně zapříčiněn nedostatečným zaměřením koryta (vyhlazení dna příčného profilu z důvodu omezeného počtu zaměřených bodů, které nevystihují skutečný stav) (Hey, 1982).

3.3.5 ČASOVÁ PROMĚNLIVOST

Během roku dochází k sezónním změnám. Vegetace (byliny, tráva, plevel, keře, stromy, vodní rostliny a řasy) v letním období způsobuje zvýšení součinitele drsnosti. V zimním období dochází k zamrznání hladiny, což také zvětšuje hodnotu součinitele drsnosti (Chow, 1959), protože se zvětšuje délka omočeného obvodu o šířku hladiny (Brachtel, 1962). Hodnoty součinitele drsnosti n ledu se podle typu (hladký, drsný) a rychlosti proudění pohybují od 0,010 do 0,020 (Macura, 1990). Na změně teploty je závislá také hustota ρ a kinematická viskozita ν , která je přímo nebo nepřímo (Reynoldsovo číslo) obsažena v některých empirických rovnicích. Vliv teploty se z důvodu malého ovlivnění součinitele drsnosti zanedbává.

3.3.6 ROZMĚRY A NEPRAVIDELNOSTI KORYTA

Proměnlivá velikost průtočných profilů v podélném směru, velikost a tvar koryta nemají na součinitel drsnosti jednoznačný účinek. Obecně lze konstatovat, že nejmenší odpor proudění klade vodě kruhový průtočný profil, větší odpor klade lichoběžníkový profil a největší odpor lze očekávat u obdélníkového profilu, kde se projevuje nejvíce účinek sekundárního proudění (pohyb vody ve směru kolmém ke směru proudění) (Chow, 1959). Součinitel drsnosti se obvykle zmenšuje se zvětšující se šířkou koryta (Brachtel, 1962). Překážky v toku (padlý strom, pařez, sesuv půdy, mostní pilíř, podpěra lávky, osamělý balvan, stupeň) významně zvětšují součinitel drsnosti (Žic, 2009). Míra ovlivnění součinitele drsnosti závisí na velikosti, tvaru, počtu a rozmístění překážek (Chow, 1959), (Knight, 1979). Přítomností oblouku v toku se obecně zvětšují ztráty. Zvětšení součinitele drsnosti je způsobeno akumulací sedimentů a pláví. Zvýšení součinitele drsnosti v oblouku je sice malé, ale u vyšších rychlostí proudu nelze opomenout (Chow, 1959).

3.3.7 VEGETACE

Vegetace v korytě obvykle generuje větší odpory než materiál povrchu koryta. Vegetace zpomaluje proud (Komora, 1977) a tím zmenšuje kapacitu koryta, podporuje ukládání splavenin, případně směřuje proud ke břehu, což zvětšuje jeho abrazi (Martinec, 1958). Vegetace je ale nepostradatelnou součástí ekosystému, protože kořenový systém zmenšuje dopady eroze a olistění zmenšuje intenzitu ohřevu vody (Martinec, 1958), (Kummu, 2002).

Účinek vegetace na proudění závisí především na její výšce, druhu, hustotě, ohebnosti, stáří, rozmístění a vegetačním období (míra olistění, výška trav). Je-li hloubka a rychlost proudu dostatečná, dojde vlivem účinku hmoty vody k ohybu a polehnutí vegetace (byliny, keře, stromky) (Chow, 1959), (Kondolf, 2003). V měrné křivce koryta se tento jev objeví ve formě hysterezní křivky, kdy při stejné hloubce vody koryto převede větší průtok na počátku povodně (van Rijn, 1990).

Pochopení vlivu vegetace na proudění se stalo významným především při revitalizacích toků. Ovlivnění proudu vegetací je složitá 3D úloha, kterou se zabýval např. (Komora, 1977), (Arcement, 1989), (Kummu, 2002), (Yen, 2002), (Järvelä, 2004), (Keijzer, 2005), (Morvan, 2008) a další. Kouwen rozdělil trávy podle výšky a hustoty do pěti typů retardance (A až E) viz Tab. 2

a zavedl 14 oblastí hodnot součinu $v \cdot R$. Dle typu retardance trávy a velikosti $v \cdot R$ lze v Tab. 3 najít doporučený součinitel drsnosti (Fischer, 2003). Orientačně lze součinitel drsnosti stromů (keřů) v malém území vypočítat dle rovnic autorů, viz níže. Koeficient a_0 je použit v rovnici (27).

Tab. 2 Stanovení retardance travních porostů - upraveno na základě (Mattas, 2007)

Hustota porostu	Výška porostu [m]	Retardance		
		Kategorie	Popis	a_0 [-]
velká	> 0,75	A	velmi vysoká	24,7
velká	0,25 až 0,75	B	vysoká	30,7
velká	0,15 až 0,25	C	střední	36,4
střední	> 0,75	B	vysoká	30,7
střední	0,20 až 0,75	C	střední	36,4
malá	0,05 až 0,20	D	nízká	40,0
malá	< 0,05	E	velmi nízká	42,7

Tab. 3 Součinitel drsnosti stanovený dle retardance

$v \cdot R$ [m ² ·s ⁻¹]	Součinitel drsnosti n [-]				
	A	B	C	D	E
0,025	0,400	0,320	0,218	0,118	0,057
0,050	0,359	0,236	0,126	0,078	0,043
0,075	0,319	0,169	0,095	0,065	0,038
0,100	0,278	0,137	0,079	0,058	0,036
0,200	0,158	0,093	0,054	0,044	0,030
0,300	0,120	0,074	0,045	0,039	0,028
0,400	0,102	0,064	0,041	0,037	0,026
0,500	0,091	0,058	0,038	0,036	0,026
0,600	0,083	0,055	0,037	0,035	0,025
0,700	0,078	0,052	0,035	0,034	0,025
0,800	0,074	0,050	0,034	0,034	0,024
0,900	0,071	0,048	0,034	0,033	0,024
1,000	0,068	0,047	0,033	0,033	0,024

Petryk a Bosmajian (Arcement, 1989) uvádí rovnici

$$n = n_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{C_* \cdot \sum (n_i \cdot d_{k,i})}{2 \cdot g \cdot A \cdot L} \right) \cdot \left(\frac{1}{n_0} \right)^2 \cdot R^3}, \quad (23)$$

kde n_0 [-] je součinitel drsnosti materiálu povrchu stanovený Cowanovou metodou (viz Příloha 8), C_* [-] je efektivní třecí koeficient dle grafu uvedeném v (Arcement, 1989) nebo dle rovnice

$$C_* = -3,51 \cdot \frac{R}{0,3048} + 21,2 \quad (24)$$

odvozené v rámci této práce pro účely automatického výpočtu (kap. 5.2) z grafu (Arcement, 1989), n_i [-] je počet kmenů o průměru $d_{k,i}$ [m], $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ je tíhové zrychlení, A [m²] je plocha průtočného profilu, L [m] je délka sledovaného úseku toku a R [m] je hydraulický poloměr.

Petryk a Bosmajian pro husté porosty (Mattas, 2007) stanovili rovnici

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}}}{\left(6,04 + 0,78 \cdot \frac{s_k}{d_k} - 0,01035 \cdot \frac{s_k^2}{d_k^2}\right) \cdot \sqrt{s_k}}, \quad (25)$$

jsou-li splněny podmínky $5 < \frac{L}{d_k} < 40$; $1,3 < \frac{h^{\frac{1}{6}}}{n \cdot \sqrt{g}} < 11$; $3 < \frac{4 \cdot L \cdot h}{\pi \cdot d_k^2} < 5000$; $0,0002 < i_H < 0,02$;

kde s_k [m] je spon kmenů (vzdálenost mezi kmeny), d_k [m] je průměr kmenů, h [m] je průměrná hloubka vody a i_H [-] je podélný sklon hladiny.

Vincent (Mattas, 2007) doporučuje rovnici

$$n = \frac{h^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}} \cdot \frac{\left(\frac{4 \cdot s_k \cdot h}{\pi \cdot d_k^2}\right)^{0,46}}{1,782 \cdot \frac{s_k}{d_k^2} + 0,00305 \cdot \left(\frac{s_k}{d_k^2}\right)^2}. \quad (26)$$

USSCS (Mattas, 2007) používá rovnici

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{a_0 + 16,4 \cdot \log(R^{1,4} \cdot i_H^{0,4})}, \quad (27)$$

kde a_0 je koeficient, viz Tab. 2.

Keijzer genetickým programováním (Mattas, 2007) získal rovnici

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{\frac{1}{C^2} + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot C_D \cdot P_s \cdot d \cdot h_{veg}}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{h}{h_{veg}}\right), \quad (28)$$

kde C_D [-] je odporový koeficient (součinitel odporu) válce (zde průřez kmene), který závisí na hodnotě Reynoldsova čísla a pro vyvinuté turbulentní proudění má hodnotu cca 1,0 (Janalík, 2008), P_s [-] je celkový počet stromů, h_{veg} [m] je výška vegetace, $\kappa = 0,41$ je von Kármánova konstanta a C [$m^{0,5} \cdot s^{-1}$] je Chézyho rychlostní součinitel dna stanovený jako

$$C = \frac{v}{\sqrt{R \cdot i_H}}. \quad (29)$$

3.4 PŘÍSTUPY KE STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI

Vyhodnotit drsnostní poměry vyžaduje kromě teoretických znalostí i značné praktické zkušenosti a velmi dobré znalosti hydromorfologických poměrů vodních toků. Pomocí série přímých měření ve vodních tocích lze získat řadu hodnot součinitelů drsnosti a vysledovat některé závislosti. Tyto poznatky využili mnozí autoři při sestavování vlastních empirických rovnic, tabulek nebo fotografických katalogů, které mají za úkol doporučit součinitel drsnosti pro konkrétní tok.

3.4.1 EMPIRICKÉ ROVNICE

Empirické rovnice vychází z hodnot naměřených v laboratořích nebo ve vodních tocích. Mnohé z nich prošly historickým vývojem a byly zpřesněny nebo se naopak zcela přestaly používat. Zejména u novějších rovnic bývá uvedena oblast použití. Jedná se o rozmezí hodnot vstupních dat, pro které byla rovnice odvozena. Použitím vstupních dat, která nejsou v tomto rozmezí, není zaručena správnost výpočtu (Brachtel, 1962). Doplnkem složitějších rovnic bývaly nomogramy (specifické grafy), pomocí kterých bylo možné součinitel drsnosti stanovit a které se používaly zejména v době před rozšířením osobních počítačů. Většina rovnic vycházejících z měření v terénu byla odvozena za předpokladu rovnoměrného pohybu. Hodnoty součinitelů drsnosti hrubozrnných materiálů dna stanovené empirickými rovnicemi obvykle vykazují výrazné odchylky od hodnot součinitelů drsnosti získaných měření v tocích, což zpochybňuje platnost těchto rovnic (Martinec, 1958). V současnosti se začíná využívat genetického programování s měřitelnými vstupními parametry, které umožňuje do rovnice zakomponovat větší množství vazeb a detailů.

3.4.2 TABULKY SOUČiniteLŮ DRSNOSTI

Tabulky různých autorů, ve kterých je slovně popsáno několik druhů povrchů vyskytujících se v otevřených korytech, obvykle obsahují u každého druhu povrchu tři doporučené hodnoty součinitele drsnosti n (minimální, optimální (střední, průměrná) a maximální). Stručným slovním popisem povrchu, který se zaměřuje na typ a velikost materiálu dna, rozměry a míru údržby koryta, nelze zcela vystihnout složité poměry v korytě. Tabulky udávají nejpřesnější hodnoty součinitelů drsnosti pro zaplněné (průtok korytem je blízký kapacitnímu průtoku), čisté a udržované vodní toky nebo běžné stavební materiály (beton, dřevo, kamenná dlažba). V uvedených případech hodnoty součinitelů drsnosti poměrně přesně odpovídají skutečnosti. Pro přírodní koryta může poměr mezi minimální a maximální hodnotou součinitele drsnosti jednoho druhu koryta nabývat až hodnoty 2 (Mattas, 2003). I přes uvedené nedostatky tabulek zůstávají nejčastěji používaným podpůrným přístupem pro stanovení součinitele drsnosti koryta. Z nejpoužívanějších tabulek lze zmínit tabulky od Ven Te Chowa (Chow, 1959), Havlíka a Marešové (Havlík, 1994), pro vegetaci (Fisher, 2003) a Nosova pro horské a podhorské toky (Klouček, 2008).

3.4.3 FOTOGRAFICKÉ KATALOGY

Fotografické katalogy poskytují obecnou představu o vzhledu koryt toků a mohou usnadnit výběr součinitele drsnosti n různých typů koryt. Fotografie se vztahuje k místu, kde byl na základě měření stanoven reprezentativní úsekový součinitel drsnosti koryta. Lze využít mnoha (především

zahraničních) fotografických katalogů v knižní podobě (Chow, 1959), (Barnes, 1967), (Jarrett, 1985), (Arcement, 1989), (Coon, 1995), (Gillen, 1996), (Hicks, 1998), (Phillips, 1998) atd., ve webové podobě (Barnes, 1967), (Gillen, 1996), [26] atd. nebo v digitální formě (Lang, 2004), [25], [26] atd.

V některých fotografických katalozích jsou uvedeny v jedné lokalitě součinitelé drsnosti pro celé spektrum vodních stavů, ale fotografie pouze jednoho vodního stavu. Problémem zejména starších publikací bývají nekvalitní fotografie. Lze se setkat s případy, kdy jsou fotografie pořízeny z velké dálky nebo naopak zachycují jen detail koryta. Někdy bývá pro ukázkou zvolena nevhodná lokalita s nesourodými fotografiemi, které působí, jako by se jednalo o dvě rozdílné lokality (Hicks, 1998), (Lang, 2004). Zahraniční katalogy obsahují i fotografie typů povrchů, které jsou pro region střední Evropy neobvyklé (zejména velká šířka a hloubka, zrnitost dna, druhy trav a keřů, materiál umělých kanálů, apod.) (Klouček, 2008). V současnosti v ČR vzniká neveřejný katalog na ČVUT v Praze (Matoušek, 2012) a veřejný katalog na VUT v Brně (Smelík, 2012a). K rozšíření těchto katalogů by bylo možné využít výsledků měření z českých a slovenských toků, které jsou nyní součástí nejrozličnějších projektů a výzkumných prací, např. (Martinec, 1958). Při návrhu koryta se často uvažuje součinitel drsnosti navrženého (ideálního) stavu beze změn ve dně, geometrii a vegetaci (Žic, 2009). Pro extrémní povodňové události se nevhodně uvažují součinitelé drsnosti kalibrované pro nižší vodní stavy (Yen, 1991).

3.4.4 COWANOVA METODA

Cowanova metoda (Cowan, 1956) představuje přístup ke stanovení součinitele drsnosti, při kterém se různým charakteristikám koryta přiřazují v šesti tematických kategoriích doporučené dílčí součinitelé drsnosti na základě slovního popisu (Chow, 1959). Výsledný součinitel drsnosti se počítá dle rovnice

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5, \quad (30)$$

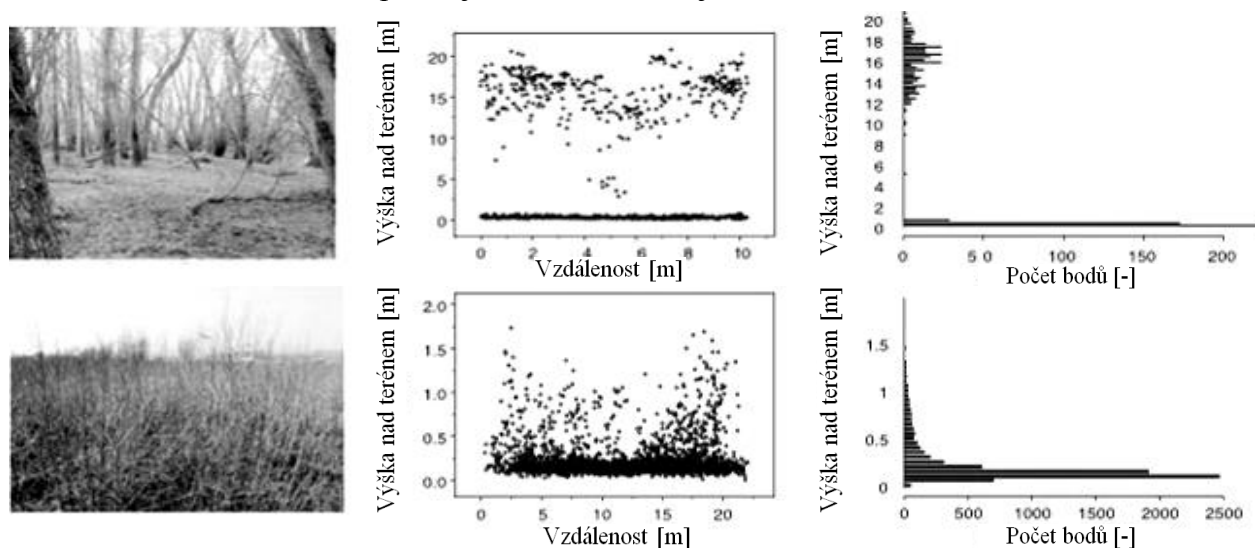
ve které vyjadřuje n_0 základní hodnotu součinitele drsnosti dle velikosti materiálu povrchu koryta, n_1 nerovnosti omočeného obvodu, n_2 změny průtočného profilu po délce toku, n_3 množství překážek v korytě, n_4 typ korytové vegetace a m_5 míru meandrování. Metoda byla odvozena z měření v malých a středních odvodňovacích kanálech a malých přirozených tocích s $R < 4,5$ m bez pohybu splavenin (Macura, 1990). Pro široká koryta s hrubým materiálem je metoda vhodná pouze k informativním výpočtům (Chow, 1959), (Brachtel, 1962).

3.4.5 MĚŘENÍ VE VODNÍCH TOCÍCH

Stanovení součinitele drsnosti měřením ve vodních tocích je komplexním souborem vhodně zvolených metod měření, měřicích přístrojů včetně ověřování jejich přesnosti, metodiky měření, vyhodnocení a porovnání výsledků měření (Bumbálek, 1989). Měřením v terénu lze postihnout vlastnosti proudění, se kterými se v laboratoři neuvažuje (Limerinos, 1970). Taková měření jsou ale velmi zdlouhavá a nákladná. Pro stanovení součinitele drsnosti konkrétního úseku toku je nutné

provést zaměření koryta, hladin, stanovení průměrné profilové rychlosti a následné stanovení součinitele drsnosti (viz kapitoly 3.6 a 4.1.6).

Geometrické rozměry příčných profilů lze získat v případě malých hloubek (broditelné koryto) nivelací, tachymetrií a v případě velkých hloubek (z plavidla, lávky nebo mostu) ultrazvukovými metodami. Zaměření inundace lze provést fotogrammetrií nebo laserovým skenováním. Pro měření by se měl vybírat přímý úsek toku bez peřejí a tůní (Gordon, 1992). V případě tachymetrického zaměření koryta by měly být body, které tvoří příčný profil, voleny s ohledem na dobu zaměření tak, aby co nejlépe vystihovaly tvar koryta. Doporučuje se zaměřit alespoň deset bodů příčného profilu a zaměřovat body ve vzdálenosti od 1 m do 2 m nebo lépe v místech, kde v příčném profilu dochází ke změně tvaru dna. Měrná lať by se neměla umisťovat na výstupky ve dně (např. balvany). Je-li inundace zaměřena pomocí fotogrammetrie, přesnost měření závisí na vzdálenosti přístroje od měřeného objektu.



Obr. 8 Ukázka výstupů laserového skenování pro les a náletové dřeviny

Zaměření pomocí laserového leteckého skenování je rychlé, podrobné, ale nákladnější. Výstupem leteckého skenování je tzv. mračno bodů, pomocí kterého lze stanovit úroveň terénu, výšku a hustotu olistění a typ vegetace v různých výškových úrovních, viz Obr. 8 (Straatsma, 2006). Znalost typu vegetace nebo zástavby lze využít při přiřazování součinitele drsnosti jednotlivým částem rozsáhlého území. Toho se využívá ve 2D modelování. Laserovým skenováním se hůře identifikují hrany terénu (ovšem lépe než u fotogrammetrie). Zaměření nelze provádět pod vodou (Asselman, 2002), (Smart, 2004).

Stanovení podélného sklonu hladiny i_H je důležitou součástí zaměření, protože i drobné odchylky od skutečnosti při zaměření úrovní hladin mohou zapříčinit významnou chybu ve výpočtu. Při rozvlněné hladině se měří střední úrovně hladin v krátkém časovém úseku a z nich se stanovuje i_H . Zaměření úrovní hladin kulminačních průtoků lze většinou provést dodatečně na základě polehlé trávy nebo podle zašpinění nebo vlhkosti svislých konstrukcí.

Stanovení bodové rychlosti proudění se provádí v korytě s dostatečnou hloubkou např. pomocí vhodné (tvar, stoupání) hydrometrické vrtule, která musí být pravidelně kalibrována

(Žoužela, 2005). Měření se provádí v několika svislicích, které jsou rovnoměrně rozmístěny po šířce toku. Měření se provádí v každé svislici v několika výškových úrovních (měrných bodech) v závislosti na hloubce vody a zvolené metodě (jednobodová až šestibodová, hladinová, integrační). Doba měření v každém měrném bodě by měla být alespoň 30 s (Žoužela, 2005), (Králík, 2007). Vyhodnocení bodových rychlostí se provádí dle normy ČSN EN ISO 748. Měření při nízkých rychlostech je zatíženo relativně velkou chybou. V případě velkých hloubek se dnes často využívá ultrazvukového měření rychlosti (ADCP). Ultrazvukové zařízení pluje na hladině na plováku a z mostu nebo břehu je taženo lanem přes celou šířku koryta.

3.5 PROBLEMATIKA VÝPOČTU

Výpočet průtoku v otevřeném korytě vyžaduje přijetí zjednodušujících předpokladů, volbu vhodné metody výpočtu, znalost výpočtového softwaru a vstupních parametrů. Bez uvedených znalostí může dojít např. při návrhu úpravy koryta k poddimenzování kapacity koryta a následným škodám, při předimenzování kapacity koryta k prodražení stavby.

3.5.1 VÝPOČTOVÉ MODEL Y

Podle dimenze modelu (výpočtová náročnost, míra podobnosti se skutečností) lze zvolit mezi 1D (jednoduché, hrubá předpověď), 1,5D (zohledňuje dění napříč korytem), 2D (vhodné pro proudění inundací) nebo 3D modelováním (náročné, přesné, závislé na kvalitě vstupních dat) (Krupička, 2007). V praxi se často vytváří kombinovaný 1D + 2D model, kde se nejdříve kalibruje 1D model proudění v korytě a pak se přidá 2D model proudění v inundaci.

Vstupní data pro drsnost jsou v 1D modelu většinou charakterizována Manningovým součinitelem drsnosti, který zahrnuje veškeré ztráty, případně ještě součinitelem místních ztrát.

Ve 2D modelech je zadáván nejen součinitel drsnosti (zahrnuje mikrodrsnost a makrodrsnost, která není zaměřena), ale také turbulenci, která závisí na hloubce, průměrné svislicové rychlosti a smykovém napětí (turbulentní viskozita μ_t) (Dvořák, 2011). Z praktických zkušeností pracovníků DHI a.s. vyplývá, že hodnota součinitele drsnosti zadávaného do 2D modelu je o cca 30 % nižší (většinou o 20 % až 40 %) než hodnota součinitele drsnosti zadávaná do 1D modelu. Tato zkušenost ovšem souvisí s volbou 1D a 2D modelu a možnostmi zadávání místních ztrát.

Výpočtový model je většinou založen na ustáleném průtoku pro návrhový stav. Pro výpočet lze použít některý z mnoha softwarů (Noordam, 2005), [1], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [23]:

1D - HEC-RAS, HYDROCHECK 1, MIKE 11, FLUSS-1D, SOBEK D-Flow 1D Open W.,

2D - FLO-2D, MIKE 21, FLUSS-2D, TUFLOW (1D/2D), SOBEK D-Flow 2D Overland,

3D - MIKE 3, TUFLOW FV (2D/3D), Delft3D, Flow-3D.

3.5.2 EKVIVALENTNÍ SOUČINITEĽ DRSNOSTI

V případě složeného profilu koryta se očekává jak rozdílný součinitel drsnosti v kynetě a bermě, tak na dně a svazích koryta. Průtočný profil je také z důvodu odlišného charakteru proudění v hlubších a mělčích částech vhodné rozdělit na několik částí. Dělení se provádí pomocí svislic, diagonál, nebo horizontál na rozhraní kynety a bermy (nadhodnocuje průtok o cca 10 %), ve všech zlomech nebo v místech změny součinitele drsnosti (Krupička, 2007). Svislice se v závislosti na zvolené metodě mohou nebo nemusí započítávat do omočeného obvodu (Krupička, 2007). Protože je smykové napětí na hladině zanedbatelné, hladina se s výjimkou vysokorychlostního proudění nezapočítává do omočeného obvodu (Jirka, 2009).

Ekvivalentní hodnota celkového součinitele drsnosti n_c pro dílčí části koryta (kyneta, berma, inundace) se počítá podle obecné rovnice

$$n_c = \left(\frac{\sum (n_i^A \cdot B_i)}{B} \right)^{\frac{1}{A}}, \quad (31)$$

kde n_i je dílčí součinitel drsnosti, A je exponent a B je zástupný parametr, viz Tab. 4 (Yen, 1991), (Havlík, 2005).

Tab. 4 Kombinace parametrů a exponentů rovnice (31)

Autor	-	Horton	Pavlovskii	U.S. Army	Colebatch	-	-
$A [-]$	1	3/2	2	1	3/2	1	1
$B [-]$	O			A		$O \cdot R^{\frac{1}{3}}$	$O \cdot R^{\frac{1}{6}}$

Na základě vlastní analýzy rovnice (31) při výběru omočeného obvodu O jako zástupného parametru B vyplývá, že na n_c má zásadní vliv exponent A následovaný součiniteli drsnosti n_i a naopak parametr O_i měl překvapivě velmi malý vliv.

3.5.3 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY

Pro výpočet jednorozměrného proudění (1D) v korytech toků se v rámci této práce využívá Metoda po úsecích. Jsou používána následující zjednodušení a předpoklady (Golík, 2006):

- ustálené proudění o volné hladině v říčním režimu (malý podélný sklon koryta),
- proudnice rovnoběžné se dnem,
- neměnné průtočné profily koryta a součinitel drsnosti v čase,
- zanedbání složek rychlosti kolmých na směr proudění,
- použití Chézyho rovnice pro výpočet rychlosti proudění,
- nestlačitelnost vody, konstantní hustota vody
- konstantní Coriolisovo číslo α a součinitel místních ztrát ζ .

3.5.4 PARAMETRICKÁ ANALÝZA

V této kapitole jsou uvedeny parametry, které ovlivňují výslednou hodnotu rychlosti v (Yen 1991). Pro přímé prismatické koryto stálého sklonu jsou mnohé parametry rovny hodnotě 1.

Zn.	Název	Jednotka
ρ	hustota vody	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_s	hustota zrn	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
γ	měrná tíha	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-3}]$
μ	dynamická viskozita	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}]$
v	průměrná profilová rychlost	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
h	reprezentativní hloubka	$[\text{m}]$
d_x	reprezentativní rozměr sedimentu	$[\text{m}]$
i_H	sklon vodní hladiny	$[-]$
i_D	sklon dna koryta	$[-]$
U	neustálenost proudu	$[-]$
η	vyjádření tvaru profilu	$[-]$
η'	podélné změny profilu koryta	$[-]$
Ω	uspořádání koryta (meandrování)	$[-]$
Γ	osa profilu koryta ve vztahu k $\frac{di_D}{dx}$	$[-]$
G_c	změna rozměru zrn nebo součinitele drsnosti stěn	$[-]$
ξ	tvar zrn	$[-]$
G	změna velikosti zrn	$[-]$
C_s	koncentrace zrn v suspenzi	$[-]$
δ_p	příčné proudění	$[-]$
χ	soudržnost zrn (koheze)	$[-]$
Re	Reynoldsovo číslo (viskozita)	$[-]$
Fr	Froudovo číslo (gravitace)	$[-]$
$\frac{\Delta\rho_s}{\rho}$	změna útvarů dna v čase	$[-]$

3.5.5 VYJÁDŘENÍ DRSNOSTI

V hydraulice otevřených koryt se lze setkat s různými možnostmi pro vyjádření drsnosti, které jsou odvozeny na základě různých principů. Mnohá lze při rovnoměrném a plně turbulentním proudění převést na Manningův součinitel drsnosti pomocí rovnosti rovnic (Macura, 1990):

$$\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} = \frac{v}{v_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n \cdot \sqrt{g}}. \quad (32)$$

Nejčastěji používaná vyjádření drsnosti povrchu jsou uvedena níže.

Součinitel ztrát třením po délce - λ [-]

Často se vyjadřuje Colebrook-Whiteovou rovnicí. Směrodatný zdroj pro stanovení λ (někdy značen jako f) je modifikovaný Moodyho diagram (závislost λ na Re a $\frac{\Delta}{R}$), konkrétně pásmo kvadratického turbulentního proudění, do kterého lze většinou proudění v tocích zařadit (Chow, 1959), (Boor, 1968), (Yen, 1991), (Jandora, 2002).

Absolutní drsnost - k [m]

Absolutní drsnost nesouvisí s křivkou zrnitosti. Vyjadřuje střední výšku výstupků povrchu, která je jednoznačná pouze u geometricky homogenních povrchů. Měla by se tedy používat jen u technických potrubí (Smetana, 1957), (Boor, 1968), (Makovec, 1998), kde nevyjadřuje měřitelnou velikost výstupků povrchu, ale teoretickou výšku výstupků, při které je ztráta třením shodná se skutečně naměřenou ztrátou (Makovec, 1998). Někdy se značí symbolem Δ . Pro přepočet na součinitel drsnosti se občas používá rovnice

$$n = \frac{1}{k}, \quad (33)$$

se kterou ale nelze souhlasit, protože se stoupajícím rozměrem zrna součinitel drsnosti klesá. Dle [24] je k_s dnová drsnost a platí $k = k_s$.

Stricklerova hydraulická drsnost - k_s, k_{st} [m]

Stricklerova hydraulická drsnost vychází z křivky zrnitosti, představuje určitý násobek zvoleného kvantilu d_x a počítá se rovnicí

$$k_s = k_{st} = m \cdot d_x. \quad (34)$$

Koeficient m se liší dle různých autorů, viz Tab. 5 (Hey, 1982), (Macura, 1990). Stricklerova hydraulická drsnost k_s se dosazuje do mnoha empirických rovnic. Obecně jsou koeficienty m odvozeny z výzkumu mikrodrsnosti. V současné době je Stricklerova hydraulická drsnost používána i pro makrodrsnost (Morvan, 2008).

Tab. 5 Hodnoty koeficientu m dle různých autorů v závislosti na velikosti zrna

d_{35}	d_{50}				d_{ef}	d_{65}			d_{75}	d_{80}	d_{84}						d_{90}			
1,25	1,0	2,0	3,3	6,6	2,5	1,0	1,5	2,0	3,2	2,5	1,0	1,5	2,8	2,95	3,5	3,9	5,1	2,0	3,0	3,5
1 - Ackers-White (1973)																				
3 - Keulegan (1938)																				
4 - Thompson a Campbell (1979)																				
5 - Strickler																				
6 - Hammond (1984)																				
8 - Engelund a Hansen (1967)																				
10 - Einstein a Barbarossa (1952)																				
11 - Irmay (1949)																				
12 - Engelund a Hansen (1967)																				
14 - Lane and Carlson (1953)																				
16 - Gladki (1979)																				
18 - Simons a Richardson																				
19 - Ikeda (1983)																				
20 - Limerinos (1970)																				
21 - Whiting a Dietrich (1990)																				
22 - Hey																				
23 - Leopold (1964)																				
24 - Mahmood (1971)																				
26 - Kamhuis (1974)																				
27 - van Rijn (1982)																				
28 - Hey (1979) = Charlton																				

Uvádí se, že na součinitel drsnosti lze Stricklerovu hydraulickou drsnost přepočítat obdobně jako u absolutní drsnosti k dle rovnice

$$n = \frac{1}{k_{st}}, \quad (35)$$

která již dává poměrně věrohodné výsledky, použije-li se rovnice [25]

$$k_{st} = \frac{25,68}{k^{\frac{1}{6}}}. \quad (36)$$

Je potřeba si uvědomit, že Stricklerova hydraulická drsnost k_s by měla být ze své podstaty vztažena k ose c zrna, která se ve většině případů v korytě nachází ve svislém směru C . Křivka zrnitosti stanovená ze síťového rozboru ale vychází z prostředního rozměru zrna b .

Hydraulická drsnost Nikuradseho - k_N [m]

Nikuradseho hydraulická drsnost (Nikuradseho ekvivalentní písková drsnostní výška) (Knight, 1979) byla poprvé definována Johannem Nikuradsem pro účely studia odporů v kruhových potrubích pomocí nalepeného písku rozměru 0,8 mm (Libý, 1970). Někdy je nazývána ekvivalentní pískovou drsností. Pro vyjádření k_N se uvažuje přímo některý kvantil křivky zrnitosti - obvykle d_{50} . Z Nikuradsovy hydraulické drsnosti lze vypočítat Manningův součinitel drsnosti z rovnice [2]

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{18 \cdot \log \left(12,2 \cdot \frac{R}{k_N} \right)}. \quad (37)$$

Relativní drsnost - $\Delta/R, k_s/R$ [-]

Relativní drsnost je závislost drsnosti nebo velikosti zrna materiálu dna na charakteristickém rozměru koryta (hloubka, hydraulický poloměr). Tento poměr je zahrnut v mnoha rovnicích. Využívá se znalost některého kvantilu křivky zrnitosti d_x nebo charakteristické velikosti zrna dle rovnice (Limerinos, 1970)

$$d_w = 0,1 \cdot d_{16} + 0,3 \cdot d_{50} + 0,6 \cdot d_{84}. \quad (38)$$

Součinitel drsnosti - n [-]

Součinitel drsnosti, dříve nazývaný stupeň drsnosti, je zřejmě nejpoužívanější možností pro vyjádření drsnosti, který vyniká svou jednoduchostí a vyhovujícími výsledky při použití v praktických aplikacích (Chow, 1959). Součinitel drsnosti byl poprvé představen francouzským inženýrem Philippem Gaucklerem v roce 1867 a v roce 1890 jeho upravenou formu představil Robert Manning [10]. Součinitel drsnosti je konvenčně považován za konstantní (nezávislý na vodním stavu) (Yen, 1991). Uvažuje se bezrozměrný (Chow, 1959), (Gordon, 1992), přestože fyzikální rozměr je $[s \cdot m^{-y}]$ (Havlík, 2005), kde exponent y závisí na autorovi, viz Tab. 6. Právě proměnnost exponentu vnáší do jednotky nejednotu, a proto se doporučuje bezrozměrná jednotka.

Tab. 6 Přehled hodnot exponentů y různých autorů (Havlík, 2005)

Autor	Manning	Forchheimer	Lacey	Pavlovský	Bazin	Kutter
Exponent y	1/3	3/10	1/4	proměnný	1/4	

V jedné hodnotě součinitele drsnosti n jsou zahrnuty všechny typy hydraulických odporů (materiál dna, dnové útvary, zakřivení koryta, vliv vegetace, překážek, atd.). Pro většinu koryt se součinitel drsnosti pohybuje v rozmezí od 0,010 do 0,300 (Kondolf, 2003), (Havlík, 2005). Kromě Manninga se součinitelem drsnosti zabývalo mnoho dalších autorů (např. Bazin jej označil jako m).

Rychlostní součinitel - C [$m^{1/2} \cdot s^{-1}$]

Rychlostní součinitel je teoretický parametr používaný k vyjádření odporů proudění. Rychlostní součinitel se stanovuje empirickými rovnicemi, které prošly historickým vývojem (Martinec, 1958), (Brachtel, 1962), (Boor, 1968), (Mattas, 2003). Nejčastěji se používá rovnice (Jandora, 2002)

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}. \quad (39)$$

Exponent hydraulického poloměru $\frac{1}{6}$ není obecně konstantou a liší se podle autora (Chow, 1959).

3.5.6 NEJISTOTY VE STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI

Nejrůznější vlivy, které vycházejí z přirozené náhodnosti fyzikálních jevů, nedokonalosti přístrojů, metod vyhodnocení a lidské omylnosti, způsobují odchylky mezi naměřenými a skutečnými hodnotami sledované veličiny. Tyto odchylky nelze zcela odstranit (Mays, 1999), ale je potřebné vědět, které dílčí nejistoty nejvíce ovlivňují výslednou nejistotu. Nejistotu typu A (vyjádřena směrodatnou odchylkou) lze zmenšit opakovaným měřením dané veličiny.

Nejistota typu B (stanovena kalibračními listy, technickými normami, údaji výrobce, odhadem) je ovlivněna proměnlivostí veličiny v čase, vlivy okolního prostředí, zvolenou metodou vyhodnocení a omyly a nelze ji omezit opakováním měření (Říha, 2005), (Golík, 2006). Nejistotu typu B lze zmenšit používáním přesnějších přístrojů, dodržováním metodik, stabilizací okolních podmínek atd. Nejistotu lze vyjádřit pomocí rozdělení pravděpodobnosti (normální, trojúhelníkové, lichoběžníkové, rovnoměrné) (Starý, 2007).

Před vlastním vyhodnocením je potřeba jednotlivé vlivy, které ovlivňují nejistotu, analyzovat. Po soupisu a identifikaci jednotlivých nejistot se provede kvantifikace jejich dopadu na výsledky a nakonec výklad nejistoty v modelu. Aniž si to někdy projektant uvědomuje, je nejistota skryta již v návrhu vodního díla (převýšení břehové čáry, vyšší hodnoty součinitele drsnosti, zvýšení návrhového průtoku) (Golík, 2006).

3.6 ZAMĚŘENÍ TOKŮ

Pro potřeby následných analýz bylo potřeba shromáždit dostatek dat z měření ve vodních tocích, zejména Manningův součinitel drsnosti n , průtok Q , průměrnou profilovou rychlost v , průměrnou hloubku h , šířku v hladině B , průtočnou plochu A , omočený obvod O , hydraulický poloměr R , podélný sklon hladiny i_H , podélný sklon čáry energie i_E , kvantily křivky zrnitosti d_{16} , d_{35} , d_{50} , d_{55} , d_{65} , d_{75} , d_{80} , d_{84} , d_{90} , d_{ef} a fotografie lokality. Pro tyto účely bylo provedeno 138 vlastních měření na moravských vodních tocích v okolí Brna a Frýdku-Místku (Smelík, 2012a). Přehled 27 dlouhodobě sledovaných lokalit uvádí Tab. 7. Podrobnější informace o sledovaných lokalitách vč. fotografií obsahuje Příloha 1, 2 a 3.

Tab. 7 Seznam dlouhodobě sledovaných lokalit

Lokalita - Vodní tok	Lokalita - Vodní tok	Lokalita - Vodní tok
Bílovice nad Svitavou - Svitava	Mohelno - Jihlava	Rychmanov - Litava
Brno-Poříčí - Svratka	Morávka-VD - Morávka	Skalní Mlýn - Punkva
Čeladná - Čeladénka	Moravský Krumlov-limnigraf - Rokytá	Skryje - Loučka
Dolní Loučky - Loučka	Moravský Krumlov-město - Rokytá	Šance-VD - Ostravice
Frýdek-Místek - Ostravice	Ochoz u Brna - Říčka	Veverská Bítýška - Svratka
Jedovnice - Jedovnický potok	Oslavany - Oslava	Vyšní Lhoty - Morávka
Kozlovice - Ondřejnice	Palkovice - Olešná	Vyšní Lhoty - Žermanický přivaděč
Křtiny - Křtinský potok	Petřvald - Lubina	Želešice - Bobrava
Lomnička - Besének	Raškovice - Mohelnice	Židlochovice - Svratka

Databáze vlastních měření byla doplněna 1 685 externími měřeními z následujících zdrojů: (Martinec, 1958), (Fasken, 1963), (Martinec, 1966), (Barnes, 1967), (Aldridge, 1973), (Jarrett, 1985), (Coon, 1995), (Gillen, 1996), (Hicks, 1998), (Phillips, 1998), (Spreafico, 2001), (Lang, 2004), (Dostál, 2007), (Matoušek, 2012) a [26].

3.6.1 ZAMĚŘENÍ PŘÍČNÝCH PROFILŮ A HLADIN

Pro dlouhodobě sledované lokality vodních toků byly vybírány takové úseky, které se nacházejí poblíž limnigrafických stanic a které nejsou výrazně ovlivněny překážkami, spádovými stupni a oblouky. Teoretickým cílem tedy bylo nalézt prismatické úseky.

V každé lokalitě proběhlo tachymetrické zaměření čtyř příčných profilů teodolitem, viz Příloha 2. S odstupem času lze konstatovat, že použitím lepší techniky by bylo možné v úseku stejné vzdálenosti zaměřit více příčných profilů a také více bodů v příčných profilech, čímž by se podrobnost modelu zvětšila. Také výběr lokalit v jarních měsících nebyl ideální, protože zvýšená úroveň hladiny vody neumožňovala odhalit mělčiny, tůně, drobné peřeje a průběh podélného sklonu dna (místy záporný sklon dna). Výběr lokalit je proto vhodnější provést na konci léta (srpen, září), kdy lze očekávat nižší vodní stavy. Opětovné vytýčení profilů pro účely nivelace hladin by se nemuselo provádět, pokud by byly profily voleny v místech s výraznými prvky (strom, kámen). V každé lokalitě by bylo vhodné z důvodu

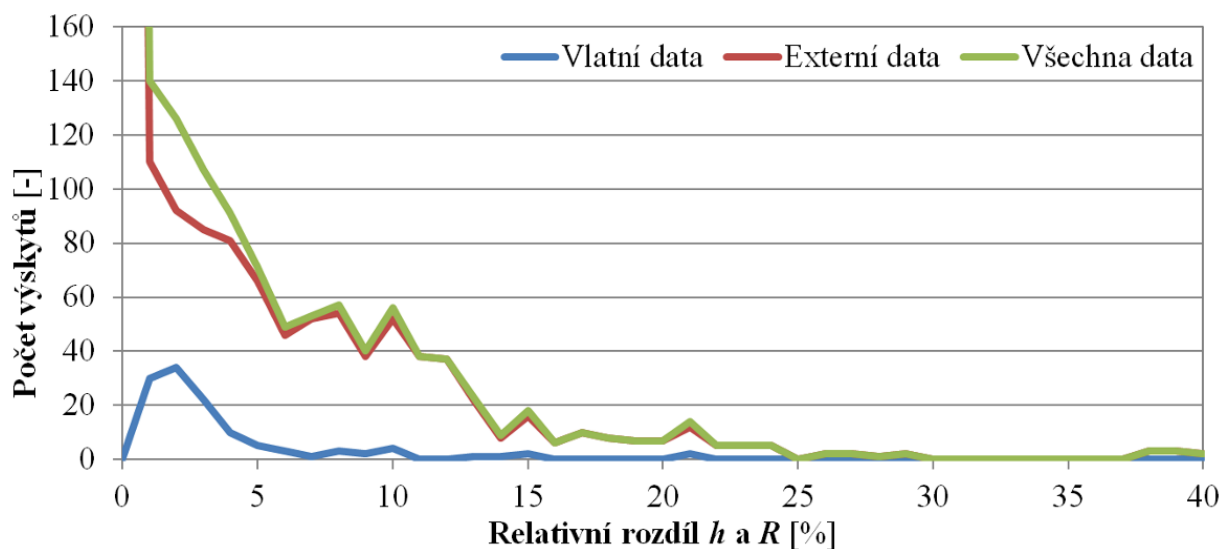
možného poškození a urychlení práce při nivelaci používat alespoň dva (první u břehové hrany, druhý mírně nad hladinou) kolíky, ke kterým je vztažena nadmořská výška.

Zaměřením a následnou nivelací hladin jsou v tříletém období (nikdy nebyla zamrzlá hladina) zachyceny podprůměrné, běžné a zvýšené vodní stavy. V každé z 27 lokalit proběhlo alespoň pět zaměření hladin, viz Příloha 2. Z časových důvodů nebo nepřítomnosti v ČR nebylo možné některé zvýšené hladiny zaměřit. Ve sledovaném období se předpokládá neměnný příčný profil. Předpoklad, že materiál dna nebyl v pohybu, byl ověřen Shieldsovým kritériem. Pouze u lokality Rychmanov lze u vyšších průtoků očekávat pohyb materiálu dna.

3.6.2 PROBLEMATIKA PODÉLNÉHO SKLONU A HLOUBKY

Získané zkušenosti potvrdily, že stanovení podélného sklonu dna je náročné. Také každá nepatrná chyba vzniklá nesprávným zaměřením hladiny může mít podstatný vliv na podélný sklon hladiny (Martinec, 1958). I rozdíly několika milimetrů mohou při malých podélných sklonech hladiny způsobit značnou chybu ve výpočtu průtoku. V přirozených tocích nelze předpokládat rovnoměrné proudění. Podélný sklon dna i_D , hladiny i_H a čáry energie i_E tedy nejsou navzájem rovnoběžné. Tůň pod peřejemi mohou vytvořit záporný podélný sklon dna. Ve výpočtech se proto doporučuje nepoužívat podélný sklon dna a místo toho uvažovat podélný sklon hladiny nebo čáry energie. Záporný sklon hladiny nebo čáry energie při říčním proudění indikuje chybu zaměření nebo vyhodnocení. Při srovnání hodnot i_H a i_E jednotlivých měření se ukazuje, že rozdíly jsou ve většině případů v jednotkách procent a jsou výraznější pouze u proudění s velkými rychlostmi a malými hloubkami. Zvýšená obezřetnost je potřeba v případě zvýšených vodních stavů, kdy může docházet ke změnám podélného sklonu dna, rychlým změnám úrovně hladiny a intenzivnímu vlnění hladiny.

Ze srovnání průměrných hloubek h a hydraulických poloměrů R vlastních měření vyplývá, že se veličiny téměř neliší (většina relativních rozdílů je do 5 %), viz Obr. 9 (svislá osa končí pro přehlednost v hodnotě 160, ale 1038 externích dat má relativní rozdíl do 1 %).



Obr. 9 Relativní rozdíly hloubek a hydraulických poloměrů použitých dat

Lze konstatovat, že v případě neznalosti jednoho z parametrů (h , R) je lze považovat za ekvivalentní. To je také důvod, proč má v případě externích měření nejvíce dat (1 038) odchylku mezi 0 % až 1 %. Tato odchylka není způsobena přirozenou shodou obou parametrů, ale právě doplněním neznámého parametru známým parametrem. Je-li odchylka výraznější, může to značit chybu v měření nebo ve výpočtu.

3.7 ZRNITOST MATERIÁLU DŇA

Problematika stanovení zrnitosti materiálu dna je stručně zmíněna v kapitole 3.3.1. Tato kapitola se zaměří na poznatky a zkušenosti z vlastních odběrů, měření rozměrů zrn materiálu a vyhodnocení zrnitostních křivek. Je-li koryto široké nebo je-li vodní stav podprůměrný, má na celkový součinitel drsnosti koryta převažující vliv materiál dna. Nachází-li se na dně kameny, valouny nebo balvany, je potřeba věnovat stanovení křivky zrnitosti zvýšenou pozornost. Zrnitostní křivka vyjadřuje hmotností zastoupení velikostí zrn materiálu dna. Velikost zrna je vztažena ke střednímu rozměru b , aby byla zachována vzájemná porovnatelnost výsledků metod. Požadavek vychází ze síťového rozboru, kde zrno propadá sítím svými dvěma nejmenšími rozměry (c , b), kde se uvažuje větší z nich, tedy b .

Do některých empirických rovnic se dosazuje zrno velikosti d nebo střední zrno d_s , ovšem není blíže specifikováno, jejich stanovení. Některé zdroje uvádí, že se za d_s dosazuje d_{55} , jiné uvádějí d_{50} nebo d_{ef} . Pro přehlednost se v takových případech dosazoval kvantil d_{50} .

3.7.1 SÍTOVÝ ROZBOR

Sítový rozbor je známou metodou, která je založena na lokálním odběru reprezentativního vzorku materiálu dna (dle velikosti největšího zrna, ale obvykle s hmotností od 5 kg do 20 kg). Pro účely stanovení součinitele drsnosti je potřeba pro odběr vybrat úsek vodního toku bez sesuvu svahu, nánosů nebo skalnatého dna a vyvarovat se odběru spodní vrstvy společně s krycí vrstvou dna. Po rychlém odběru (cca 5 minut) probíhá jeden až dva dny vysoušení odebraných vzorků v peci při teplotě 105°C, následně se kartáčem rozpojí drobná zrna od větších, provede se prosévání (většinou vibrační) na normalizované sadě sítí, zjistí se hmotnost jednotlivých frakcí (Příloha 4) a vynese se křivka zrnitosti, což zabere cca jednu až dvě hodiny. Ukázka jemnozrného a hrubozrného materiálu dna po provedení síťového rozboru je na Obr. 10 a Obr. 11.

Modelování splaveninových procesů je citlivé na přesnost stanovení zastoupení jemnozrných frakcí, a protože hrubozrné frakce se nepodílejí na splaveninovém režimu, nemusí být jejich stanovení tak důsledné. Sítový rozbor lze pro stanovení součinitele drsnosti lze vhodně použít v případě jemnozrného materiálu, kde minimální velikost zrna je 0,063 mm a maximální velikost zrna odpovídá z praktických důvodů cca horní mezi frakce šterku (32 mm). Zrnitostní křivka hrubozrného materiálu je zatížena značnou chybou, kterou již nelze akceptovat, protože součinitel drsnosti je nejvíce ovlivněn nejvyššími frakcemi

materiálu dna. Sítový rozbor by bylo teoreticky možné použít i pro hrubozrnný materiál, ale odebrané množství by se pohybovalo v desítkách až stovkách kilogramů.

Hmotnost odebraných vzorků materiálu dna ve sledovaných lokalitách byla od 2 kg do 15 kg a průměrná hmotnost byla 7 kg. V případě některých lokalit bylo provedeno srovnání sítových rozborů s (Martinec, 1958) a (Veselý, 2002).



Obr. 10 Odebraný jemnozrnný materiál dna z lokality Rychmanov po sítovém rozboru



Obr. 11 Odebraný hrubozrnný materiál dna z lokality Skryje po sítovém rozboru

3.7.2 WOLMANOVA METODA

Wolmanova metoda je založena na měření rozměru náhodně zvoleného zrna přímo v toku. Postupuje se korytem ve směru proudnice ve čtvrtině, polovině a třech čtvrtinách šířky koryta. Každé 2 kroky se položí palec ruky na špičku boty a vybere se z vody zrno, kterého se ukazováček ruky dotkne jako první a změří se jeho střední rozměr pomocí délkového měřidla nebo speciální pomůcky. Takto se odeberou, změří a zapíše (Příloha 5) rozměry 100 zrn (Wolman, 1954), což dle zkušeností trvá 1 osobě (měří i zapisuje) 1,5 až 2 hodiny, 2 osobám (jeden měří, druhý zapisuje) 45 až 60 minut a 3 osobám (dva měří, jeden zapisuje) 20 až 30 minut. Zrna se vrátí do koryta. Je-li zrno příliš těžké, změří se jeho rozměr pod vodou. Neměřitelná drobná zrna se klasifikují pohledem jako písek (0,063 mm až 2 mm) nebo jíl (menší než 0,063 mm). Wolmanovu metodu lze doporučit pro materiál od dolní meze frakce šterku (2 mm) a pro toky s hloubkou vody do 0,6 m. Wolmanova metoda umožňuje v porovnání se síťovým rozborem postihnout větší úsek toku. Zvolený úsek by neměl být z pohledu zastoupení frakcí zrn materiálu poměrně homogenní a odběr by měl eliminovat zrna sesunutého opevnění svahu a zrna hluboce zabořená ve dně.

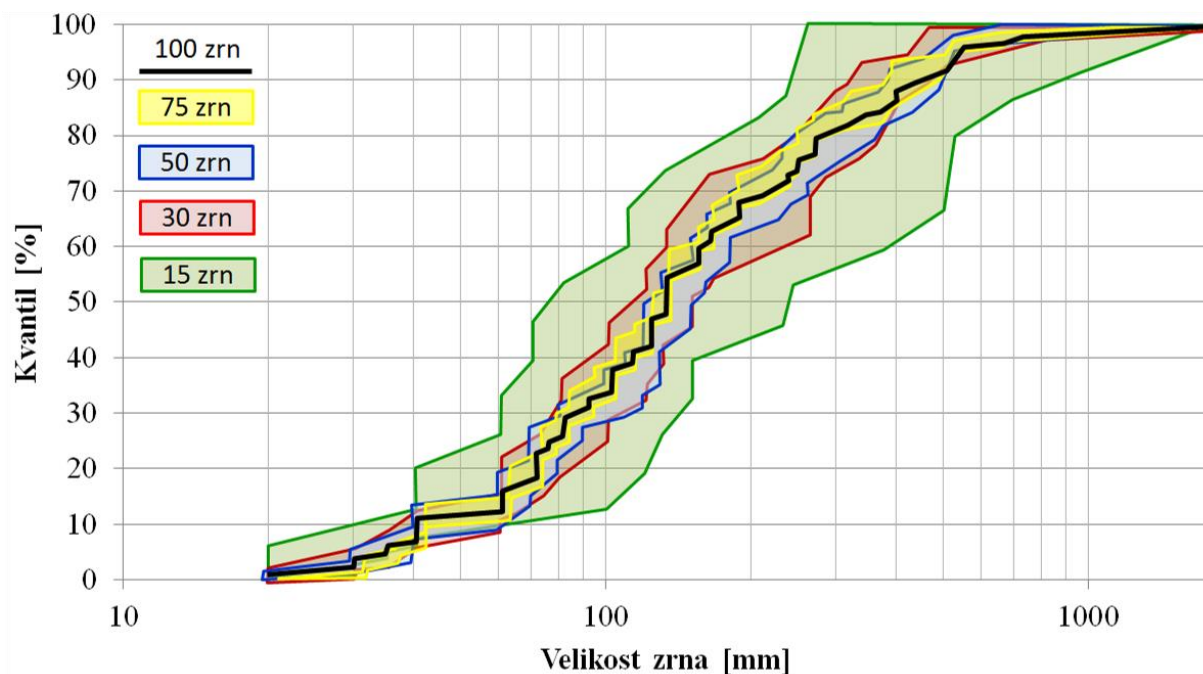
Metoda je založena na náhodném odběru, ale největší zrna dna (zejména valouny a balvany) by se měly do odběru zahrnout. Největší zrna nemusí významně ovlivnit stanovení součinitele drsnosti, protože největší uvažovaný rozměr v empirických rovnicích je d_{90} . Největší zrna budou zohledněna ve velikosti efektivního zrna d_{ef} počítaného ze všech zrn.

Odběr vzorku materiálu dna má zahrnovat 100 zrn (Wolman, 1954). Protože je měření časově náročné, voda bývá chladná, dno kluzké a nerovné, byla provedena analýza vlivu počtu odebraných zrn na průběh zrnitostních křivek, kdy se pro stanovení křivek zrnitosti náhodně (viz níže) vybralo pouze 75, 50, 30 nebo 15 zrn. Na Obr. 12 je ukázka stanovení křivky zrnitosti pro různé počty zrn jemnozrnného materiálu - lokalita Rychmanov. Na Obr. 13 je ukázka stanovení křivky zrnitosti pro různé počty zrn hrubozrnného materiálu - lokalita Morávka-VD). Lze konstatovat, že:

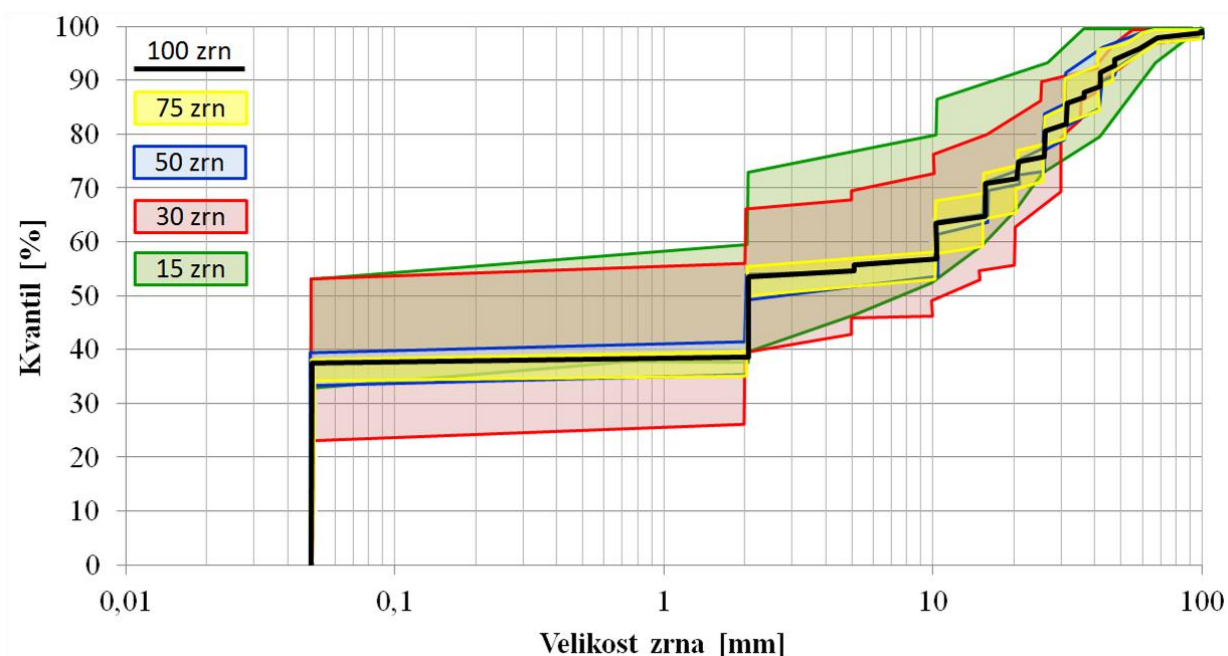
- 75 a 50 zrn dává téměř stejné výsledky jako 100 zrn,
- 30 zrn dává dostatečné kvalitní výsledky, zejména pro hrubozrnný materiál,
- 15 zrn slouží pro orientační účely a nelze jej doporučit.

V Obr. 12 a Obr. 13 jsou vyneseny obalové čáry zrnitostních křivek vytvořených z hodnot středních rozměrů méně než 100 zrn, tedy pro 75, 50, 30 a 15 zrn. Zrna se z celkového počtu 100 zrn vybírala pomocí generátoru náhodných čísel (funkce „náhčíslo“ v MS Excel). Z každého množství zrn (75, 50, 30, 15) bylo vytvořeno 5 náhodných výběrů, respektive 5 zrnitostních křivek. Plochy mezi okrajovými zrnitostními křivkami (obalovými čarami) vyjadřují rozptyl mezi jednotlivými náhodnými výběry. Plochy mají příslušnou barvu (viz legenda v Obr. 12 a Obr. 13) podle toho, z kolika náhodně vybraných zrn byly vytvořeny. Předpokládá se, že čím více zrn se vybere, tím více se obalové čáry budou blížit křivce zrnitosti stanovené Wolmanovou metodou ze 100 zrn (černá čára). V případě jemnozrnného

materiálu (Obr. 12) se ukazuje, že výběr 75 zrn vykazuje větší rozptyl (dál od černé čáry, žlutá plocha překrývá modrou plochu) než výběr 50 zrn, což je způsobeno malým počtem náhodných výběrů. V případě hrubozrnného materiálu (Obr. 13) se šířky ploch mezi obalovými čarami postupně zmenšují, což odpovídá výše uvedenému předpokladu.



Obr. 12 Ukázka stanovení křivky zrnitosti pro různé počty zrn jemnozrnného materiálu - lokalita Rychmanov



Obr. 13 Ukázka stanovení křivky zrnitosti pro různé počty zrn hrubozrnného materiálu - lokalita Morávka-VD

3.7.3 SUBJEKTIVNÍ ODHAD

Subjektivní odhad, resp. expertní odhad středního rozměru zrna s doporučeným postupem, je rychlá (jednotky minut), jednoduchá a relativně přesná bezkontaktní metoda, pomocí které lze vizuálně odhadnout procentuální přítomnost frakcí (jíl, písek, štěrk, kameny, valouny, balvany) na dně koryta. Subjektivní odhad lze provést, je-li vidět na dno, přímo u toku nebo podle reprezentativních fotografií úseku toku s dostatečnou vypovídací schopností. Je-li voda zakalená a hloubka není velká, lze se po dně koryta projít v holinkách a odhad provést hmatem (jíl - boření, písek - měkký, štěrk - pevné a rovné, kameny - výstupky, valouny - velké nerovnosti, balvany - nutno obejít).

Pro lepší představu byly jednotlivé frakce zvoleny tak, aby je bylo možné lépe slovně definovat bez měření, viz Tab. 8. Frakci jílu lze alternativně pojmenovat jako „bahno“ nebo „hlína“. Pro účely součinitele drsnosti koryta mají zásadní vliv největší frakce. Proto je přiřazení názvů a rozměrů frakcí tomuto účelu uzpůsobeno, a proto neodpovídá klasickým tabulkám mechaniky zemin (Gordon, 1992) nebo normě ČSN ISO 14688_1. Nově byl zaveden pojem kámen. Pojem valoun ve zdejším pojetí označuje pouze velikost zrna a nemá žádnou souvislost se zaobleným tvarem zrn.

Tab. 8 *Orientační rozdělení materiálu dna koryta na jednotlivé frakce*

Název frakce	J - jíl	P - písek	Š - štěrk	K - kameny	V - valouny	B - balvany
Rozměr [mm]	< 0,0625	0,0625 až 2	2 až 32	32 až 128	128 až 512	> 512
Slovní popis	okem nelze rozlišit zrna	okem lze rozlišit zrna	velikost palce ruky	lze udržet v jedné ruce	nelze udržet v jedné ruce	nelze zvednout

Při vlastním Subjektivním odhadu jednotlivých frakcí je vhodné řídit se následujícími zásadami. Jsou-li ve sledovaném úseku toku (úsek do cca do 20 m) alespoň tři největší zrna (balvany, sesuv opevnění, suť) obdobných rozměrů, nepovažují se za osamělá, a tudíž se nemají eliminovat. Přítomnost peřeje nebo dnové dlažby výrazně ovlivňuje výsledky odhadu. Odhaduje se procentuální zastoupení středního rozměru zrna b . Je potřeba mít na paměti, že křivka zrnitosti je stanovena na základě hmotnostních podílů frakcí, ne na základě plošného rozdělení frakcí. Procentuálně se proto podíl frakce jílu a písku (nízká vrstva, velká plocha, malá hmotnost) výrazněji potlačuje nebo vůbec neuvažuje a podíl největších frakcí se u jemnozrnných materiálů mírně zmenšuje a u hrubozrnných materiálů se zvětšuje. U středních frakcí (štěrk, kameny) bývají odhady většinou v pořádku. Pokud nedojde k úpravám procentuálních zastoupení, lze u nižších kvantilů křivky zrnitosti očekávat menší rozměry zrn a u vyšších kvantilů větší rozměry zrn v porovnání se skutečností. Odstraněním zastoupení nejmenších frakcí se výpočet téměř neovlivní, protože nejmenší kvantil, který vstupuje do výpočtů, je d_{35} . Výsledky Subjektivních odhadů tří osob jsou v Příloze 6.

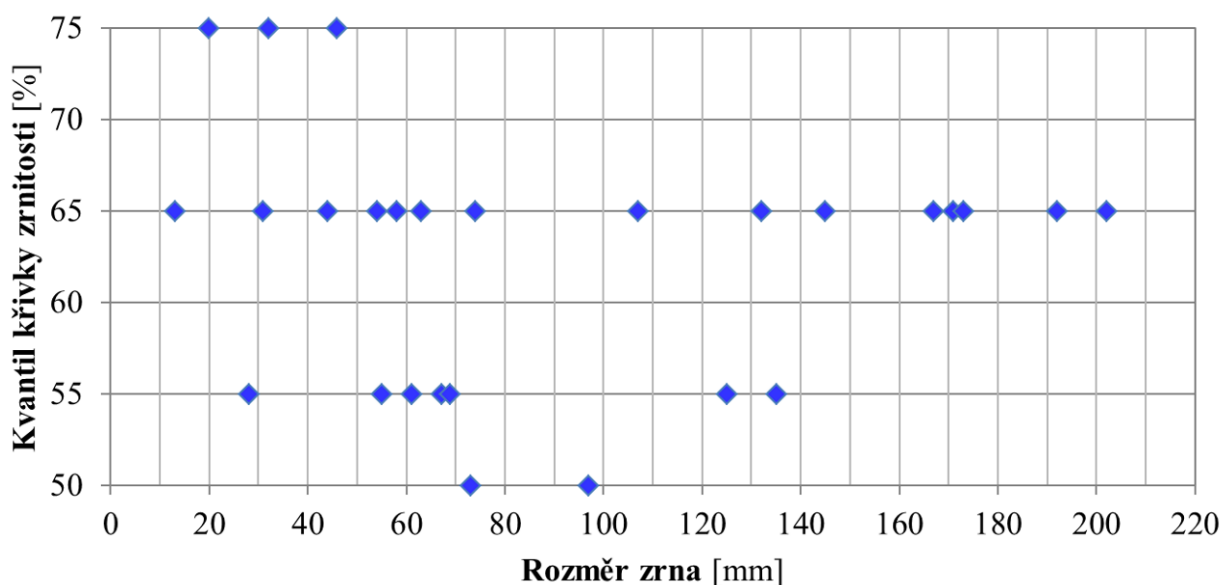
3.7.4 OBECNÉ POZNATKY

Z celkových 27 sledovaných lokalit byl proveden na 23 lokalitách síťový rozbor odebraných vzorků materiálu celkové vrstvy dna (dva vzorky z každé lokality), na 25 lokalitách odběr zrn pro stanovení zrnitosti Wolmanovou metodou a na 25 lokalitách Subjektivní odhad. Síťový rozbor nebyl proveden u lokalit s valouny a balvany, Wolmanova metoda u hlubokých toků a Subjektivní odhad u zakalených nebo hlubokých toků. V rámci Wolmanovy metody byly měřeny velikosti všech tří os odebraných zrn pro vybrané analýzy. Geometrické vlastnosti zrn (sféricita, Coreyho tvarový faktor, tvarové indexy) (Hey, 1982), (Gordon, 1992), (Bunte, 2001) nebylo potřeba pro účely práce znát, a tak nebyly provedeny.

Stanovení efektivního zrna se provádí výpočtem ze všech frakcí. Přiřadí-li se vypočítaným hodnotám d_{ef} z vlastních odběrů Wolmanovou metodou nejbližší kvantily křivky zrnitosti, pak vychází, že nejčastěji se hodnoty pohybují kolem d_{65} , viz Tab. 9. Použitím kvantilu d_{65} nebo mírně nižším (d_{60} , d_{55}) místo d_{ef} by nemělo dojít k výraznému ovlivnění výpočtu součinitele drsnosti. Na Obr. 14, který souvisí s Tab. 9, je na základě vlastních měření znázorněno modrými body přiřazení rozměru zrna d_{ef} k nejbližším kvantilům (viz kapitola 4.2).

Tab. 9 Blízkost d_{ef} ke kvantilům křivky zrnitosti

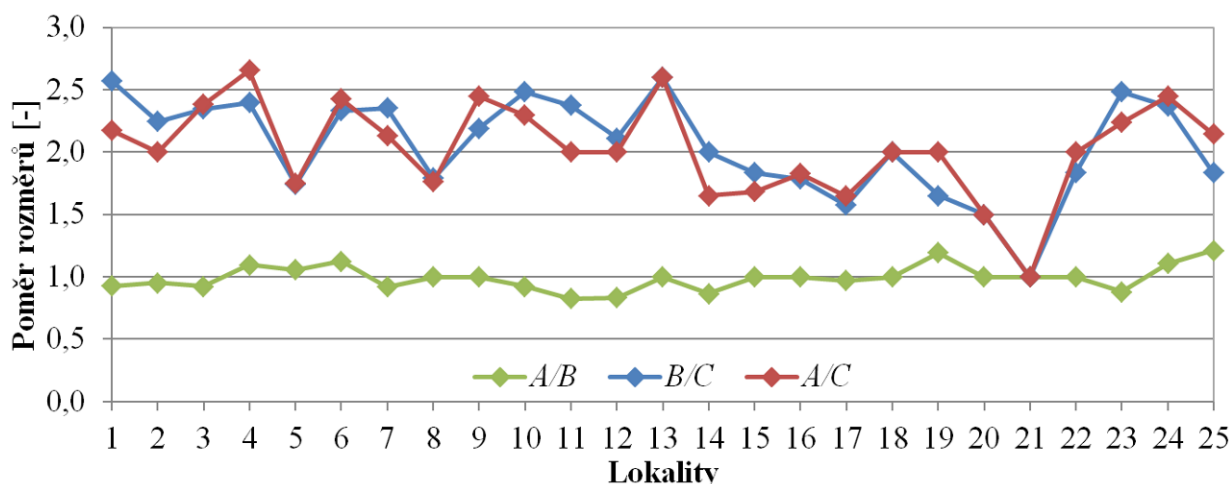
Kvantil zrna	d_{50}	d_{55}	d_{65}	d_{75}
Četnost	2	7	15	3



Obr. 14 Přiřazení rozměru zrna d_{ef} k nejbližšímu kvantilu

Bylo provedeno srovnání mediánů velikostí 100 odebraných zrn podle uložení v jednotlivých směrech A, B, C (viz kapitola 3.2). Pomocí hodnot poměrů A/B, B/C, A/C v jednotlivých lokalitách (1 až 25) lze na Obr. 15 vidět, že natočení zrna nejdelší osou a lze očekávat přibližně se stejnou pravděpodobností ve směru A (vodorovně, ve směru proudění)

i ve směru *B* (vodorovně, kolmo ke směru proudění). Z porovnání jasně vyplývá, že ve směru *C* (vertikální, kolmý ke směru proudění) lze očekávat nejmenší velikost zrna *c*. Při bližším zkoumání lze dle Tab. 10 konstatovat, že největší rozměr zrna *a* se u jemnozrnných materiálů (menší medián velikosti zrn) častěji vyskytuje ve směru *A*, u hrubozrnných materiálů (větší medián velikosti zrn) častěji ve směru *B*. V Tab. 10 značí černé písmo zcela jasně převládající směr uložení zrn a menší šedé písmo mírně převládající směr uložení zrn.



Obr. 15 Porovnání poměrů velikostí zrn podle uložení v toku

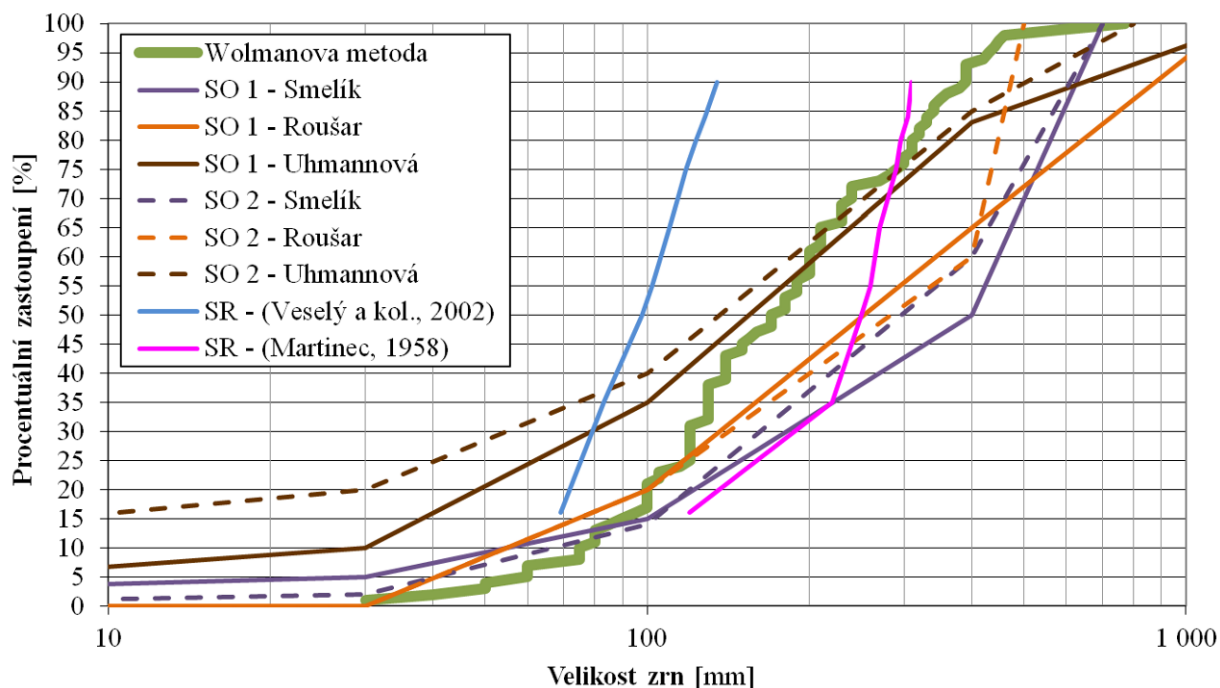
Tab. 10 Mediány největších rozměrů zrn *a* u sledovaných lokalit dle směru uložení

Uložení rozměru <i>a</i>		Mediány největších rozměrů zrn <i>a</i> jednotlivých lokalit [mm]														Medián [mm]
<i>d</i> ₅₀	A	2	15	25	30	55	40	50	65	70	80	120				50
	B	35	50	55	55	65	70	95	120	120	125	130	130	150	170	108
<i>d</i> ₈₄	A	30	50	60	75	80	100	100	120	130	180	240				100
	B	60	80	85	90	150	120	190	210	210	250	250	300	330	330	200

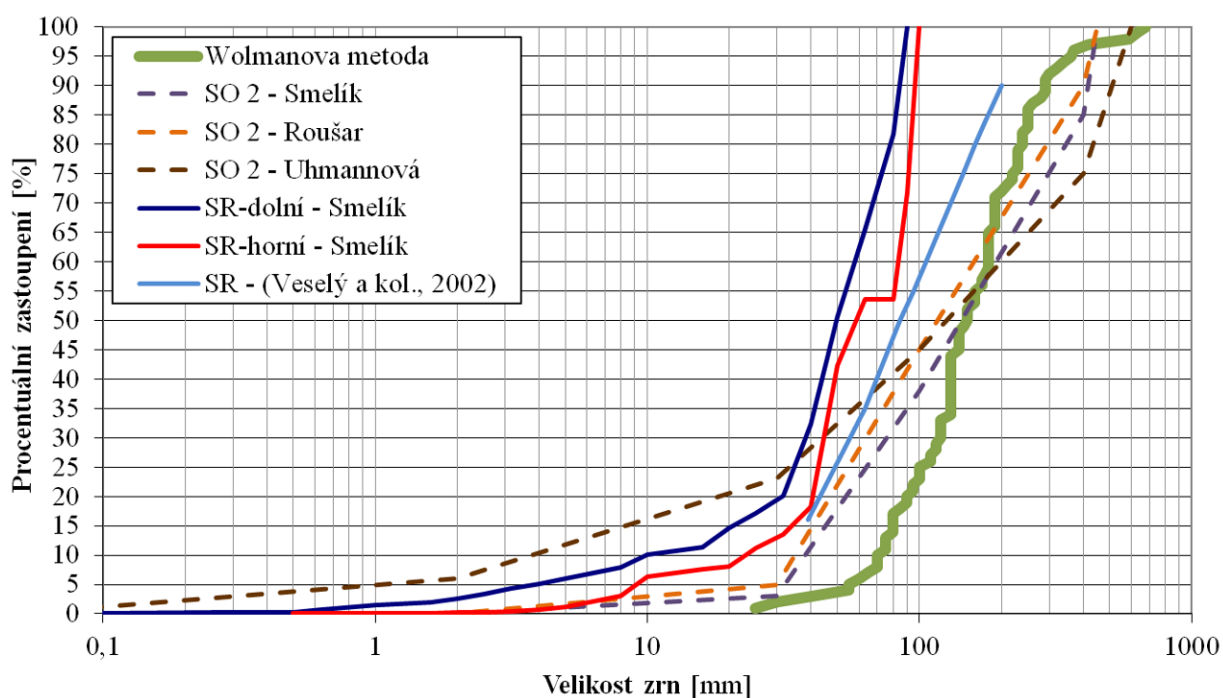
Na Obr. 16 jsou znázorněny průběhy zrnitostních křivek stanovených různými autory a metodami (SO - Subjektivní odhad, SR - síťový rozbor, Wolmanova metoda). Doporučení pro subjektivní odhady prošly vývojem. Pro SO 1 byly podíly frakcí stanovovány z fotografií bez metodického vedení. Následně byly odhady vyhodnoceny a bylo sestaveno několik doporučení, která jsou uvedena v kapitole 3.7.3, a podle kterých se odhady SO 2 provedly přímo u toku nebo opět na základě fotografií.

Pro srovnání byla vybrána lokalita Šance-VD (nejvíce autorů). Síťový rozbor zde provedl ještě před výstavbou (1964 až 1969) VD Šance (Martinec, 1958), [11] a během výstavby VD v roce 1965 pro účely stanovení vlastností sedimentů (Veselý, 2002). V případě (Martinec, 1958), kde neznáme odebrané množství zrn, se hodnoty vyšších kvantilů poměrně dobře shodují s Wolmanovou metodou, která je uvažována za referenční. V případě (Veselý, 2002) se hodnoty vyšších kvantilů výrazněji liší, což je zřejmě způsobeno účelem odběru a zřejmě i odebraným množstvím do 20 kg. (Veselý, 2002) měřil také v lokalitách

Frýdek-Místek, Palkovice, Petřvald a Vyšní Lhoty (Morávka), kde se křivky zrnitosti téměř shodují s křivkami Wolmanovy metody. V lokalitě Morávka-VD ale zrnitostní křivka dle (Veselý, 2002) naopak inklinuje k výrazně menším zrnům. Odchyly mohly také vzniknout tím, že křivky zrnitosti se nevztahují k totožnému staničení (TPE). Přitoky výše po toku mohou výrazně ovlivnit zrnitostní křivku zkoumané lokality. Složení materiálu dna závisí na době, která uplynula od poslední povodně. Zrnitost materiálu dna se mění v čase.



Obr. 16 Zrnitostní křivky stanovené různými metodami a autory v lokalitě Šance-VD



Obr. 17 Zrnitostní křivky stanovené různými metodami a autory v lokalitě Vyšní Lhoty (Mor.)

Typický příklad průběhů zrnitostních křivek je na Obr. 17 pro lokalitu Vyšní Lhoty na řece Morávce. Z grafu je patrné, že obě vlastní křivky zrnitosti stanovené síťovým rozbořem (na začátku a na konci sledovaného úseku toku) jsou výrazně podhodnoceny a odchýleny k menším zrnům. Vzorky z této lokality měly hmotnosti 7,9 kg a 9,1 kg, což je nereprezentativní hmotnost. Odběr potřebného množství materiálu dna nebylo možné provést z důvodu omezených prostředků. Podle doporučení z Tab. 1 by odebrané vzorky ($d_{\max}$ je cca 700 mm) měly mít alespoň 500 kg. Síťový rozbor se dle (Veselý, 2002) také odchyluje k menším zrnům, ale Veselý díky zkušenostem odebral materiál tak, že křivka zrnitosti má poměrně dobrou vypovídací hodnotu. Zároveň se (Veselý, 2002) snaží potlačit výskyt nepůvodních zrn (poškozené opevnění svahu, odplavený materiál balvanitého skluzu, suť apod.) Srovnání křivek je provedeno vzhledem k Wolmanově metodě, která je z výše uvedených důvodů stanovena jako reprezentativní pro hrubozrnné toky (Smelík, 2012b), což je většina vlastních sledovaných lokalit. Je zajímavé, že Subjektivní odhady u vyšších kvantilů poměrně dobře vystihují průběh reprezentativní křivky zrnitosti a lze předpokládat spíše nadhodnocení velikosti zrn u vyšších kvantilů. Z výše uvedených důvodů lze konstatovat, že ke stanovení křivek zrnitosti lze v běžné praxi použít Subjektivní odhad. Síťový rozbor lze využít pro jemnozrnný materiál do velikosti štěrku a pro hrubozrnný materiál je vhodné použít Wolmanovu metodu.

Byla také provedena analýza vlastních měření za účelem stanovení, zda při daném vodním stavu má materiál dna mikrodrsnostní, mesodrsnostní nebo makrodrsnostní účinek na proudění vody. Makrodrsnost se obvykle předpokládá jen u dnových útvarů. Uvažují-li se pouze geometrické podmínky dle (Marešová, 1992) nebo (Dubois, 1999), lze obecně předpokládat makrodrsnost u toků s valouny a balvany. (Dubois, 1999) uvádí, že při poměru $h/D < 4$ se jedná o makrodrsnost, při větším poměru lze pro výpočet součinitele drsnosti použít Manningovu rovnici (4). Laboratorní výzkum (Dubois, 1999) ale proběhl na pravidelných kuličkách o průměru D . V podmínkách dle (Marešová, 1992) zahrnuje podmínka pro mikrodrsnost a makrodrsnost poměr průměrné hloubky h a velikosti kvantilu d_{50} , c_{50} nebo d_{84} s tím, že mezní hodnoty jsou cca poloviční, než udává (Dubois, 1999). Při nízkém vodním stavu tak může i pro koryto s jemnozrnným materiálem dna vycházet, že jej ovlivňuje makrodrsnost. Jedna lokalita se může během různých vodních stavů nacházet ve všech třech kategoriích (mikro-, meso- i makro-drsnost), jak je tomu u lokalit Jedovnice, Palkovice a Petřvald. Kromě poměru hloubky a velikosti zrna by bylo vhodné zahrnout např. Reynoldsovo kritérium Re , kterým by se vliv makrodrsnosti vyloučil u lokalit, kde není plně vyvinuto turbulentní proudění (vodní stavy v období sucha, tj. hodnoty cca $Re < 10\,000$).

3.8 PRŮTOK

Pro usnadnění práce byly vybrány lokality na vodních tocích v blízkosti vodoměrných stanic (limnigrafů) ve správě ČHMÚ, které zaznamenávají kolísání hladiny (vodních stavů) vodního toku v daném profilu. Data jsou v limnigrafických stanicích zaznamenávána

analogově v podobě grafu na otáčející se buben s papírem, digitálně nebo je digitální informace přímo přenášena k provozovateli stanice. Údaje o vodních stavech jsou v případě stanic s dálkovým přenosem posílány do ČHMÚ každých 10 minut, ale na portálu ČHMÚ [13] se objevují údaje pouze v celou hodinu. Starší limnigrafy zaznamenávají vodní stav pomocí plováku, v současnosti již ale převažuje měření tlakovými sondami. Pracovníci ČHMÚ provádějí hydrometrická měření několikrát ročně hydrometrickou vrtulí nebo pomocí ultrazvukových měřidel ADCP, kde se přesnost stanovení průtoku pohybuje v rozmezí $\pm 5 \%$.

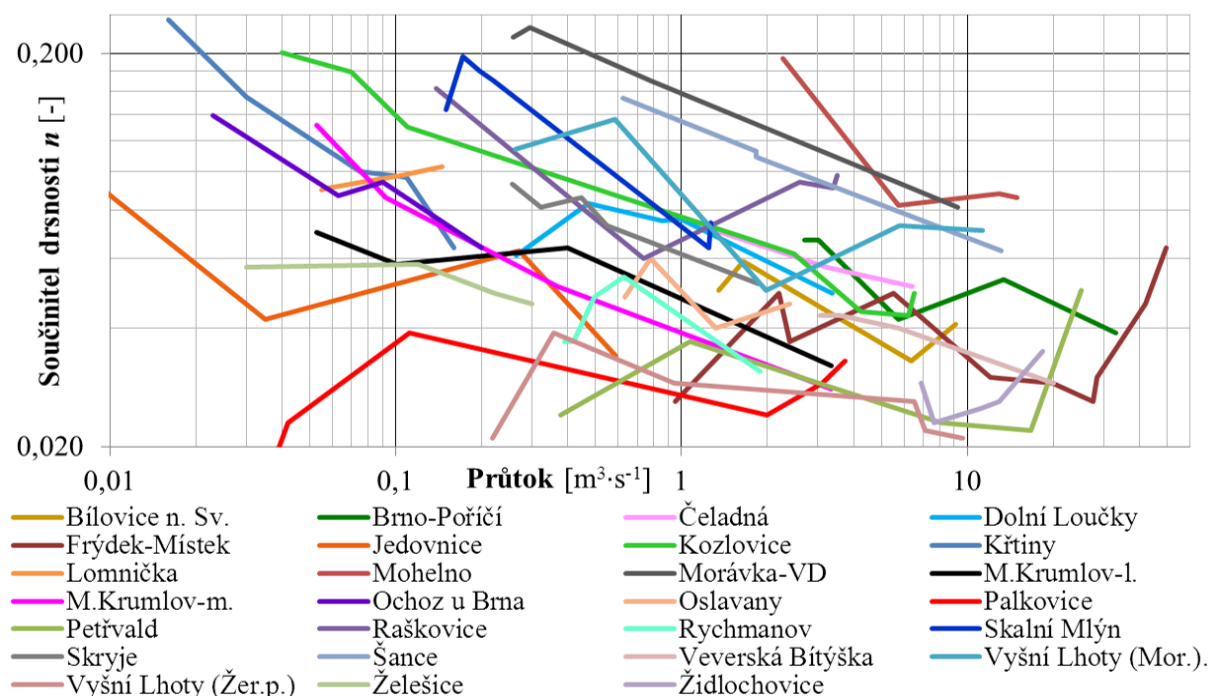
Protože během roku dochází k menším či větším změnám vlastností profilů (vymílání dna za povodně, usazování splavenin během roku, zarůstání dna vodními rostlinami, sezonní změny vegetace na svazích, ledové jevy), slouží pravidelná hydrometrická měření ke kontrole a opravám měrné křivky limnigrafu. Protože se většinou vodoměrných stanic mění měrná křivka i několikrát v roce, může nastat situace, kdy je při stejném vodním stavu jednou udáván průtok nižší a podruhé průtok vyšší nebo naopak. To je způsobeno změnami měrné křivky v průběhu času. Uvedená situace může být způsobena i nesprávným provedením nivelace (velké vlny na hladině), změnou parametrů příčných profilů na lokalitě nebo chybou při odečtu z vodočtu. Pro objasnění situace mohou pomoci fotografie úrovní hladin v jednotlivých profilech, které lze vzájemně porovnat vůči pevnému prvku (kořen, keř, strom, kámen). Protože limnigraf zaznamenává úroveň hladin po 1 cm, může se v případě velmi nízkých vodních stavů drobná změna úrovně hladiny výrazně projevit na hodnotě průtoku.

Dodatečně byly od ČHMÚ (pobočka Brno a Ostrava) získány informace o průtocích v době, kdy na dané lokalitě probíhalo zaměření úrovní hladin. Údaje zaznamenané limnigrafem jsou uváděny v čase UTC (nutné pamatovat při zápisu). Zprvu byl zapisován pouze čas zaměření hladin. Po konzultaci s pracovníkem ČHMÚ byla pro kontrolu (funkčnost, oprava limnigrafu nebo úprava profilu limnigrafu) vodních stavů měřených vodoměrnou stanicí kromě času zapisována a fotografována i úroveň hladiny na vodočetné lati. K rychlým změnám úrovní hladin dochází během povodní, manipulací na vodních dílech (Šance, Morávka, Mohelno) a provozu špičkové vodní elektrárny (Brno, Židlochovice). V takových případech je vhodné odečítat z vodočtu před a po zaměření úrovní hladin. Pro orientační informaci byl po příjezdu z měření zapsán průtok uvedený na internetových stránkách ČHMÚ [13], Povodí Moravy, s.p. [14] nebo Povodí Odry, s.p. [15]. Odečítání z vodočtů není někdy jednoduché, viz vodoměrná stanice Mohelnice na Obr. 18.

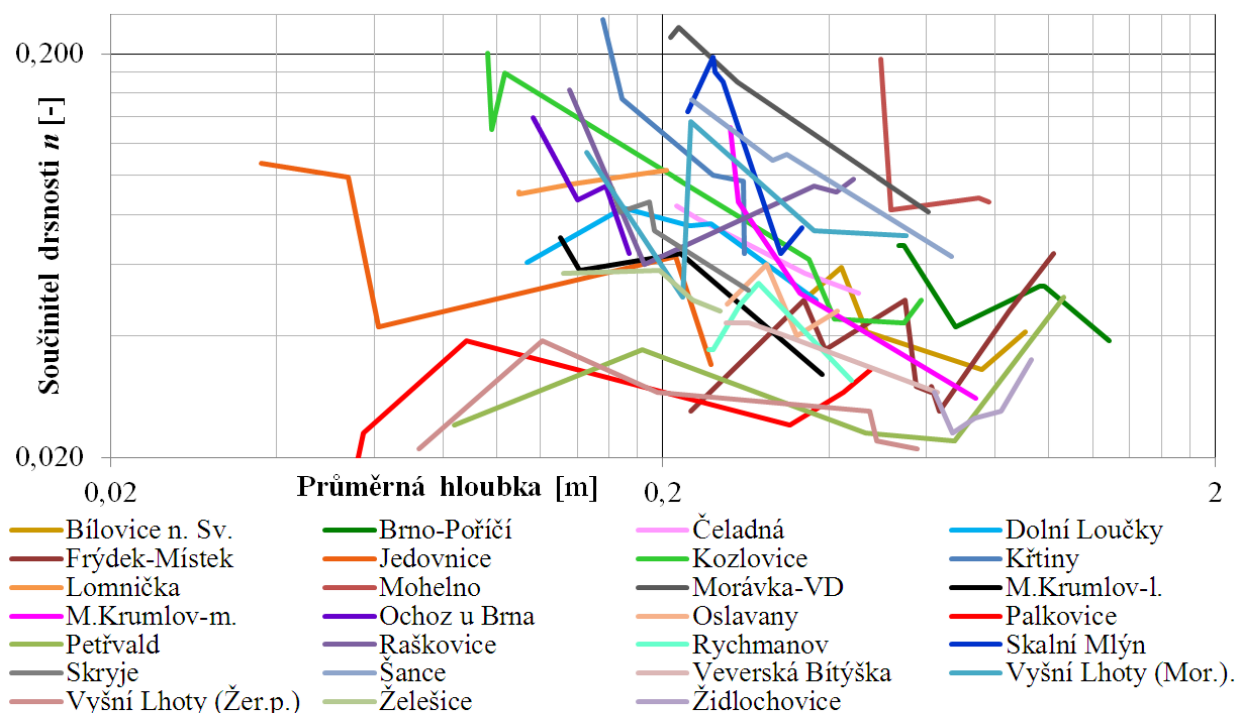


Obr. 18 Vodočetná lať na Mohelnici v Raškovicích za zvýšeného vodního stavu

Závislost průtoku Q a průměrné hloubky h na součiniteli drsnosti n není lineární. Někdy může mít tato závislost vrchol nebo sedlo, což může nebo nemusí značit chybu měření úrovní hladin nebo vyhodnocení součinitele drsnosti. Závislost n na Q a h ve sledovaných lokalitách ukazuje Obr. 19 a Obr. 20. V grafech lze vysledovat převažující trend klesajícího součinitele drsnosti jak na průtoku, tak na hloubce. Závislost n na Q , R nebo i_D lze vysledovat i v (Jarret, 1985), (Gillen, 1996), (Coon, 1998), (Hicks, 1998), (Phillips, 1998), (Lang, 2004).



Obr. 19 Závislost součinitele drsnosti a průtoku ve sledovaných lokalitách



Obr. 20 Závislost součinitele drsnosti a průměrné hloubky ve sledovaných lokalitách

3.9 EXTERNÍ DATA

Pro doplnění vlastních měření na sledovaných lokalitách byla použita externí data, aby mohly v následujících kapitolách proběhnout potřebné analýzy. Většinou byla externí data převzata z fotografických katalogů. Protože není zcela známo, jak externí autoři měřili a vyhodnocovali svá data, bylo nutné provést korekci nebo odstranění některých dat. Stejně jako u vlastních měření nebyla použita ta měření, u kterých není součinitel drsnosti v rozmezí od 0,015 do 0,300 (20 násobek hodnoty 0,015) a které jsou u vodních toků považovány za nestandardní. Lze očekávat, že hodnoty blízké 0,300 se mohou vyskytovat u toků s velkými rozměry zrn (balvany) a velmi nízkých vodních stavů. S hodnotami součinitele drsnosti vyššími než 0,300 se obecně nedoporučuje pracovat, protože představují de facto neprůtočný profil s výrazným 3D efektem proudění.

U některých katalogů může dojít k omylu nebo mohou nastat nejasnosti v interpretaci některých veličin. Občas symbol d označuje hloubku (depth), někdy průměr zrna (diameter). Např. v (Gillen, 1996) je „Gage height“ zřejmě úroveň hladiny vodočtu, kterou nelze použít. V některých případech se uváděné hodnoty průměrných profilových rychlostí mírně liší od rychlostí stanovených rovnicí

$$v = \frac{Q}{A}. \quad (40)$$

Proto byly hodnoty rychlostí stanoveny rovnicí (40). V případech, kdy byl ze dvou parametrů (hloubka h a hydraulický poloměr R) uveden pouze jeden, byl druhý z nich uvažován stejnou hodnotou dle ekvivalentního principu, viz kapitola 3.6.2. Kontrolovalo se, zda má omočený obvod O větší hodnotu než šířka v hladině B . V některých případech (Martinec, 1958), (Barnes, 1967), (Hicks, 1998) není uvedena celá křivka zrnitosti (případně má zvláštní průběh) nebo chybí potřebné kvantily. V případě lokality „Gowan at Lake Rotorua“ (Hicks, 1998) zřejmě došlo k chybě, kdy je uvažován výsledný součinitel drsnosti lokality $n = 0,047$, přestože byl pro 4 různé vodní stavy jednotlivě dosažen součinitel drsnosti maximálně 0,046.

4. METODY PRO STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI

4.1 STANOVENÍ SOUČINITELE DRSNOSTI EMPIRICKÝMI ROVNICEMI

Ke stanovení Manningova součinitele drsnosti lze použít empirické rovnice, pro které se využívají pouze měřitelné parametry. V odborné literatuře se lze setkat se stovkami empirických rovnic, protože proběhlo velké množství původních a mnoho následných ověřovacích a rozšiřovacích výzkumů, které většinou pouze upravily koeficienty a exponenty použité v původních rovnicích. Použitím více rovnic při výpočtu součinitele drsnosti se může předejít chybě, ke které by došlo při použití jediné nevhodné rovnice.

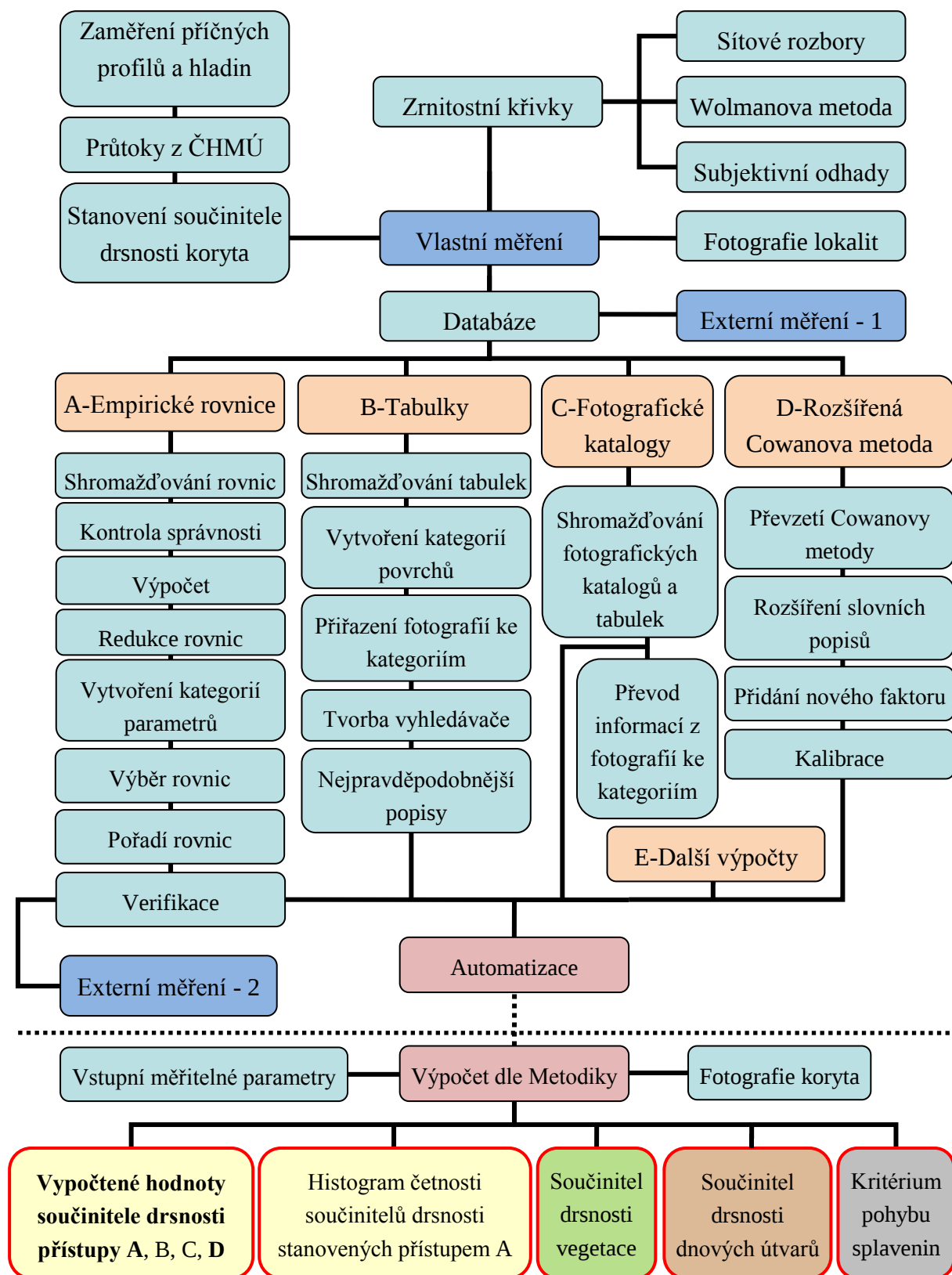
Během rešeršní fáze disertační práce bylo shromážděno přes 300 rovnic, ze kterých bylo nakonec použito 275. Důvody selekce jsou zmíněny v kapitole 3.6.2. Na základě vlastních a externích dat proběhla analýza výsledků výpočtů rovnicemi. Rovnice, jejichž výsledky se příliš neliší od hodnot součinitele drsnosti stanovených z měření, byly následně použity pro výpočet součinitele drsnosti Metodikou. Na základě hodnot výběrových směrodatných odchylek a mediánů a četnosti výběru rovnic pro jednotlivé typy toků (univerzálnost) bylo stanoveno pořadí empirických rovnic. Obdobné srovnání zvolili někteří autoři, kteří se pokusili hodnoty vypočítané empirickými rovnicemi srovnat s výsledky vlastních měření (Marešová, 1992) nebo s daty starších výzkumných prací. Dosavadní výzkumy součinitele drsnosti nebyly většinou podloženy dostatečným experimentálním výzkumem v přírodních podmínkách, a proto byly mnohdy nahrazovány převzatými výsledky laboratorních experimentů. Je třeba si uvědomit, že odvození rovnic většinou probíhalo v podmínkách rovnoměrného proudění (Mattas, 2003).

Tím, že zkoumaných rovnic bylo velké množství, byly pouze převzaty z literatury, ve které byly nalezeny. Tento postup mohl způsobit, že byla použita pozměněná rovnice. Předchozím a vlastním opisováním mohly v empirických rovnicích vzniknout chyby, mohlo dojít k opomenutí podmínek, pro které byla rovnice odvozena, opomenutí uvedení metrického systému (SI, US) nebo ke špatnému výkladu symbolů. V Příloze 7 jsou uvedeny empirické rovnice použité v Metodice včetně své zkratky stanovené ze jména autora rovnice, případně čísla (autor vytvořil větší množství empirických rovnic). Bude-li potřeba v textu zmínit některou rovnici použitou v Metodice, bude uvedena její zkratka s podtržením (např. STR3).

V ideálním případě by bylo vhodné u každé rovnice uvádět:

- autora rovnice, rok, vysvětlení jednotlivých vstupních veličin, jednotky u veličin,
- charakter koryta (přírodní koryto, umělý kanál, laboratorní žlab),
- počet měření pro vytvoření rovnice, rozsah proměnných parametrů (h , B , Q , i_H , apod.), podmínky použitelnosti rovnice,
- míru vlivu dna a svahů (opevnění, vegetace).

Tvorba Metodiky a výpočet součinitele drsnosti navrženou Metodikou (červená ohraničení v dolní části diagramu) jsou uvedeny na Obr. 21 s tím, že doporučené přístupy jsou vyznačeny **tučným písmem**.



Obr. 21 Diagram tvorby a výpočtu součinitele drsnosti navrženou Metodikou

4.1.1 TYPY ROVNIC

Přestože bylo shromážděno velké množství rovnic, většinou se jedná jen o několik základních typů, které se liší pouze koeficientem, exponentem nebo použitým kvantilem křivky zrnitosti, viz Tab. 12. Občas dochází k zaokrouhlování nebo úpravám exponentů, kde např. 0,179 se změní na 0,18 nebo zlomek $2/3$ se převede na číslo 0,667, které se zaokrouhlí na hodnotu 0,7. Bližší analýzou si lze všimnout, že některé zdánlivě odlišné rovnice jsou jen rozdílným vyjádřením stejné rovnice. Například rovnice

$$C = 16 \cdot \left(\frac{R}{d} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (41)$$

$$\frac{v}{v_*} = \frac{21,1}{\sqrt{g}} \cdot \left(\frac{R}{d_{50}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (42)$$

vypadají na první pohled odlišně, ale při uvažování rovnice (32) je lze zařadit ke stejnému typu. Po analýze všech shromážděných rovnic byly odstraněny duplicitní rovnice. Příslušnost rovnice k některému typu může v případě špatného opsání rovnice pomoci k odhalení chyby. Pro další výpočty nebyly použity rovnice, pro které nebylo možné stanovit některý z parametrů, jako např. v rovnici

$$v = \left(17,7 \cdot \log \frac{R}{d_n} + 13,6 \right) \cdot \sqrt{R \cdot i_H}, \quad (43)$$

kde

$$d_n = 0,263 \cdot \frac{A_{\max}}{A_{\min}} - 0,322, \quad (44)$$

kde $A_{\max}$ je maximální a $A_{\min}$ je minimální průtočná plocha profilů ve sledovaném úseku toku nebo rovnice Heye (Marešová, 1992)

$$\frac{v}{v_*} = 5,62 \cdot \log \left(\frac{a \cdot R}{3,5 \cdot d_{84}} \right), \quad (45)$$

kde

$$a = 11,1 \cdot \left(\frac{R}{h_{\max}} \right)^{-0,314}, \quad (46)$$

kde $h_{\max}$ je kolmá vzdálenost od příčného profilu k místu s největší bodovou rychlostí.

Symbyly rovnic následně prošly sjednocením. Podélný sklon dna je v této práci označen i_D , podélný sklon hladiny i_H a podélný sklon čáry energie i_E . V jiných odborných

podkladech se lze setkat s různým značením veličin. Platí, že $S_0 = J_0 = i_D$, $S_w = J_w = S = J = i_H$ a $S_f = J_f = i_E$.

Vzhledem k problémům zmíněným v kapitole 3.6.2 je v rovnicích i_D nahrazen i_H . V mnoha rovnicích se vyskytuje parametr Stricklerovy hydraulické drsnosti k_s , pro který byl uvažován výpočet dle rovnice (34) s koeficienty z Tab. 5. Protože pro absolutní drsnost k není k dispozici žádný měřitelný údaj, bylo v tomto případě definováno $k = k_s$, viz kap. 3.5.5.

Nalezené rovnice byly zařazeny do jedné z 15 kategorií. Typovou kategorií je nazývána taková, pro kterou byly nalezeny 4 a více rovnic stejného typu. Nezařazené rovnice jsou v kategorii „Ostatní“. Typové rovnice jsou uvedeny v Tab. 12. Je zajímavé, že pro výpočet typovými rovnicemi je potřeba znát jen hydraulický poloměr R [m] nebo průměrnou hloubku h [m], podélný sklon i_D [-], i_H [-] nebo i_E [-], některý kvantil d_x [m] křivky zrnitosti a průměrnou profilovou rychlost v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. V případě hodnot koeficientů c_1 , c_2 , c_3 a c_4 neplatí, že by byly stejné pro různé typy rovnic. Přepočet na Manningův součinitel drsnosti se provádí rovnicí (32), kde jsou potřebné parametry pro přepočet označeny v Tab. 12 šedě. Kvalita jednotlivých typů empirických rovnic je uvedena v Tab. 26.

Velké množství empirických rovnic zahrnuje typová rovnice A1, tzv. rovnice Stricklerova typu (47) nebo (48). Vliv koeficientu c_1 (min - minimum, med - medián, max - maximum) pro nejčastěji používané kvantily křivky zrnitosti na součinitele drsnosti n pro 2 křivky, je-li koeficient $c_2 = \frac{1}{6}$, jsou uvedeny v Tab. 11. Lze si všimnout, že se součinitelé drsnosti u mediánových hodnot c_1 výrazně neliší.

Tab. 11 Vliv koeficientu c_1 na součinitel drsnosti v rovnicích typu A1

Kvantil	d_{50}			d_{65}			d_{75}			d_{90}		
c_1 [-]	min	med	max	min	med	max	min	med	max	min	med	max
	14,0	24,1	76,9	24,0	26,6	76,9	21,1	29,3	38,5	15,3	26,2	40,2
Zrnitostní křivka 1 [mm]	2			15			20			40		
n_1 [-]	0,025	0,015	0,005	0,021	0,019	0,006	0,025	0,018	0,014	0,038	0,022	0,015
Zrnitostní křivka 2 [mm]	150			180			220			290		
n_2 [-]	0,052	0,030	0,009	0,031	0,028	0,010	0,037	0,027	0,020	0,053	0,031	0,020

Tab. 12 *Typové empirické rovnice pro výpočet součinitele drsnosti*

Typ	Vstupní parametry pro výpočet součinitele drsnosti n	Počet exponentů a koeficientů	Typová empirická rovnice
A1	d_x nebo k nebo k_s	2	$n = c_1 \cdot d_x^{\frac{1}{c_2}}$ (47), $n = \frac{c_2 \sqrt{d_x}}{c_3}$ (48); kde $\frac{1}{c_3}$ z druhé rovnice je c_1 v první rovnici
A2	i_H nebo i_D nebo i_E	2	$n = c_1 \cdot i_H^{c_2}$ (49)
A3	i_H nebo i_E , R	3	$n = c_1 \cdot i_H^{c_2} \cdot R^{c_3}$ (50)
A4	d_x nebo k , R nebo h	3	$n = \frac{c_1 \cdot R^{\frac{1}{6}}}{c_2 + c_3 \cdot \log\left(\frac{R}{d_x}\right)}$ (51)
B1	R/d_x , R	2	$C = c_1 \cdot \left(\frac{R}{d_x}\right)^{c_2}$ (52)
B2	R/d_x nebo R/k nebo h/k , R	2	$C = c_1 \cdot \log\left(\frac{c_2 \cdot R}{d_x}\right)$ (53)
B3	R/d_x nebo h/k , R	2	$C = c_1 + c_2 \cdot \log\left(\frac{R}{d_x}\right)$ (54)
C1	i_H nebo i_E , R nebo h , R , i_H	3	$v = c_1 \cdot i_H^{c_2} \cdot R^{c_3}$ (55)
C2	i_H , R , R , i_H	2	$v = C \cdot i_H^{c_1} \cdot R^{c_2}$ (56)
C3	d_x nebo k , i_H , R , R , i_H	4	$v = \frac{c_1}{d_x^{c_2}} \cdot i_H^{c_3} \cdot R^{c_4}$ (57)
C4	d_x nebo k , R nebo h , R	3	$\frac{v}{v_*} = c_1 + c_2 \cdot \log\left(\frac{c_3 \cdot R}{d_x}\right)$ (58)
D1	d_x , R nebo h , R	2	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = c_1 \cdot \left(\frac{R}{d_x}\right)^{c_2}$ (59)
D2	R/k nebo h/d_x nebo h/k , R	2	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = c_1 \cdot \log\left(\frac{c_2 \cdot R}{d_x}\right)$ (60)
D3	R/d_x nebo R/k nebo h/d_x , R	2	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = c_1 + c_2 \cdot \log\left(\frac{R}{k}\right)$ (61)
D4	R , v (pro Re), k , R	3	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -c_1 \cdot \log\left(\frac{k}{c_2 \cdot R} + \frac{c_3}{4 \cdot Re \cdot \sqrt{\lambda}}\right)$ (62)
Ostatní	-	-	-

4.1.2 ANALÝZA VYBRANÝCH ROVNIC

Na následujících několika příkladech je demonstrováno, že převzaté empirické rovnice mohou obsahovat chyby, které by byly bez kritického náhledu na problematiku začleněny do výpočtu součinitele drsnosti a také, že výrazná změna hodnoty některého koeficientu v empirické rovnici se téměř neprojeví ve změně součinitele drsnosti. Pro přepočet rovnici (32) se používá Chézyho rychlostní součinitel C , který se běžně počítá rovnicí (39). Exponent $1/6$ není pevný a může dle různých autorů nabývat různých hodnot. Změna exponentu ale nemá na výsledný součinitel drsnosti zásadní vliv. Změna exponentu z $1/4$ na $1/8$ by zvýšila součinitel drsnosti jen o cca 10 %. Zajímavé jsou rovnice typu D2 a D3, které jsou většinou uváděny ve formátu $D2=D3$. U rovnic L-W a LIM4 (viz Příloha 7) se zjistilo, že pro originální zadání se neshodují výsledky D2 a D3. Místo hydraulického poloměru R byl v rovnici D2 chybně uváděn koeficient c_1 rovnice D3. V Colebrook-Whiteově rovnici (typ D4) je koeficient c_1 závislý na tvaru příčného profilu stanoveném jako poměr R/h a většinou nabývá hodnoty 2,00 (široká obdélníková koryta) nebo 2,03 (široká ostatní koryta) (Yen, 1991), (Klouček, 2008). Analýzou vlivu změny koeficientu c_1 (2,00 a 2,03) na součinitel drsnosti bylo zjištěno, že tato změna je nepatrná a pohybuje se řádově v desetinách nebo jednotkách procent hodnoty součinitele drsnosti. Rovnice FOR1

$$v = C \cdot R^{0,7} \cdot i_H^{0,5} \quad (63)$$

a FOR2

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{0,7} \cdot i_H^{0,5} \quad (64)$$

jsou sice použity v Metodice (viz Příloha 7), ale odporují si, protože $C \neq \frac{1}{n}$.

4.1.3 PODMÍNKY POUŽITÍ ROVNIC

U některých empirických rovnic jsou stanoveny podmínky použití, které jsou vyjádřeny slovně (např. horské toky, šterkové dno, toky bez splaveninového režimu, pro balvany, široké koryto, apod.) nebo hodnotově (např. $R/d_{50} < 2$, apod.). Hodnotově vyjádřené podmínky vycházejí ze vstupních dat a většinou se zaměřují na rozmezí některé veličiny nebo poměru veličin. Podmínky rovnic by se měly respektovat, protože vychází z měření, ze kterých byla rovnice stanovena. Přesto se někdy stává, že ze zdroje, odkud je rovnice přebírána, nejsou originální podmínky uvedeny. Použitím rovnice pro vstupní parametry, které nejsou v doporučených mezích, nelze zaručit dostatečně přesné výsledky výpočtu součinitele drsnosti. Podmínky rovnic jsou občas velmi tvrdé, což způsobuje, že některé rovnice nevyhovují parametrům žádného měření. Obecně jsou empirické rovnice bez podmínek zatíženy nejistotou, protože není zcela jasné, v jakém rozsahu vstupních parametrů,

z jak velkého množství měření, za jakých podmínek (žlab, kanál, upravené, přírodní koryto) a za jakých vodních stavů byly empirické rovnice odvozeny. Rovněž není zcela jasná míra ovlivnění proudění vegetací na svazích nebo jinými faktory koryta. Rozmezí veličin na základě všech měření všech sledovaných lokalit je uvedeno v Tab. 13.

Tab. 13 Rozmezí veličin vlastních a externích měření

Veličina	Vlastní měření (S)		Externí měření (E)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Nadmořská výška [m n. m.]	178	505	-	-
Šířka v hladině [m]	0,49	48,2	2,02	658
Průměrná hloubka [m]	0,01	1,34	0,06	16,8
Hydraulický poloměr [m]	0,01	1,24	0,06	16,4
Průtočná plocha [m ²]	0,01	49,8	0,13	8 509
Omočený obvod [m]	0,50	48,6	2,02	658
Podélný sklon hladiny [‰]	0,04	21,9	0,003	930
Podélný sklon čáry energie [‰]	0,01	24,7	0,02	106
Průtok [m ³ ·s ⁻¹]	0,005	49,8	0,01	28 323
Průměrná profilová rychlost [m·s ⁻¹]	0,02	1,71	0,02	5,10
50% kvantil křivky zrnitosti [mm]	2,00	170	0,1	397
90% kvantil křivky zrnitosti [mm]	40,0	420	1,0	1 080
Velikost zrna [mm]	0,10	1 710	0,1	1 080

4.1.4 KATEGORIE POPISNÝCH PARAMETRŮ KORYTA

Z prvotních analýz, které se zabývaly kvalitou odhadu součinitele drsnosti empirickými rovnicemi seřazenými podle nejnížších mediánů chyb (rozdíl mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami součinitele drsnosti) vyplynulo, že i nejvhodnější rovnice nejsou univerzální pro všechny typy koryt. Předpokládalo se, že některé rovnice jsou vhodné jen pro specifický typ koryta (velikost, podélný sklon, zrnitost) a některé rovnice jsou vhodné pro více typů vodních toků - jsou univerzálnější.

Bylo zavedeno **9 kategorií** popisných (vstupních) parametrů (B , R , i_H , v , Q , d_{50} , d_{84} , R/d_{50} a R/d_{84}) a v každé kategorii stanoveny **3 podkategorie** (malá, střední a velká hodnota parametru kategorie) - celkem tedy 27 podkategorií. Volba kategorií úzce souvisí nejčastějšími parametry typových rovnic a s faktory, které ovlivňují součinitel drsnosti a které

lze rozměrově postihnout. V případě parametrů R (zastupuje hloubku) a d_{50} (zastupuje materiál dna) je použití R/d_{50} (relativní hloubka) vhodné pro vyjádření dvou zcela odlišných typů koryt. Je-li jedno koryto 3 m hluboké s valouny o velikosti 150 mm a druhé koryto 0,3 m hluboké s pískem o velikosti 15 mm, tak je sice poměr R/d_{50} stejný, tj. 20, ale proudění mohou faktory (vegetace, mikro- a makro-drsnost, příčné proudění) ovlivňovat v jiné míře. Přestože jsou veličiny R , d_{50} a R/d_{50} hodnotami geometricky propojené, hydraulicky mohou vyjadřovat jiné vlastnosti koryta. Rozměrová analýza parametrů kategorií nebyla provedena.

Rozmezí podkategorií uvedených v Tab. 14 bylo voleno s ohledem na rovnoměrné zastoupení dat v každé kategorii, výstižnost popisu zvolených hodnot parametrů a zapamatovatelnost (číslo obsahuje hodnotu 1, 2, 5 (kromě R) a násobky hodnot jsou 2, 3, 4, 5, 20). Slovní popis podkategorií (malá, střední, velká hodnota parametrů kategorie) je tedy subjektivní a relativní, protože vychází z charakteristik typických vodních toků na území České republiky, resp. střední Evropy (toky v ČR nelze velikostně srovnávat např. s toky v Rusku). Následné analýzy (kapitola 4.1.6) kvality rovnic proběhly zvlášť pro data z vlastních měření, pro externí data a pro všechna data.

Pro kategorii šířky v hladině B bylo použito netypické rozmezí hodnot z důvodu nedostatku měření s šířkou v hladině > 30 m, která je běžná v tabulkách součinitelů drsností (velké toky se šířkou v hladině > 30 m za povodně (Havlík, 1994)). Lze polemizovat, zda do této kategorie lze zařadit řeku (např. lokalita Mohelno), která má šířku i za běžného nebo mírně zvýšeného vodního stavu větší než 30 m nebo řeku (lokalita Frýdek-Místek), která má za povodně šířku v hladině větší než 30 m a za běžného stavu menší než 30 m.

Tab. 14 Rozmezí hodnot parametrů v jednotlivých podkategoriích

	B	R	i_H	v	Q	d_{50}	d_{84}	R/d_{50}	R/d_{84}
	[m]	[m]	[-]	[m·s ⁻¹]	[m ³ ·s ⁻¹]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Malá	< 5	< 0,25	< 0,001	< 0,5	< 1	< 20	< 50	< 5	< 2
Střední	5 - 20	0,25 - 0,75	0,001 - 0,005	0,5 - 2,0	1 - 20	20 - 100	50 - 200	5 - 20	2 - 10
Velká	> 20	> 0,75	> 0,005	> 2,0	> 20	> 100	> 200	> 20	> 10

4.1.5 STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI Z MĚŘENÍ V TOCÍCH

Manningův součinitel drsnosti z měření byl stanoven 1D modelem proudění vytvořeném programem HEC-RAS 4.1. Po zadání příčných profilů, průtoku Q (1. okrajová podmínka OP1) a hladiny v dolním profilu (2. okrajová podmínka OP2) byl volen jako jediný neznámý parametr součinitel drsnosti n . Součinitel drsnosti konkrétního měření byl hledán metodou nejmenších čtverců (MNC), kdy se porovnávaly odchylky Δ_i naměřených a vypočtených hladin jednotlivých příčných profilů. Součinitel drsnosti, u kterého je hodnota Δ_i nejmenší, je prohlášen za charakteristický (reprezentativní) pro dané měření a lokalitu.

Dojde-li k situaci, že pro kalibrovaný součinitel drsnosti jsou ve třech ze čtyř příčných profilů výškové úrovně naměřených $h_{i,m}$ (Příloha 3) a vypočtených hladin $h_{i,v}$ téměř stejné a jen v jednom profilu se výrazněji liší, dochází k velkému ovlivnění kalibrovaného součinitele drsnosti jedním profilem. Tato situace je způsobena rovnicí pro výpočet MNČ

$$\sum (h_{i,m} - h_{i,v})^2 = \sum \Delta_i^2 = \min, \quad (65)$$

kde výraznější odchylka Δ_i ve druhé mocnině způsobuje ve výsledku kalibrovaného součinitele drsnosti velký rozdíl. Tento rozdíl vznikne proto, že MNČ upravuje součinitele drsnosti tak, aby druhá mocnina jedné výrazné odchylky jednoho profilu byla rozložena do čtyř menších druhých mocnin odchylek čtyř profilů. Problém lze eliminovat kontrolou jednotlivých odchylek Δ_i nebo odstraněním problémového příčného profilu (např. lokalita Oslavany, viz Tab. 15). V Tab. 15 je uvedeno, jak se po odstranění horního profilu č. 1, který je v Oslavanech nad balvanitým skluzem, sníží hodnota součinitele drsnosti (z červené na zelenou hodnotu). V profilu č. 4 je dolní okrajová podmínka OP1. Odstraněním profilu se do výpočtu vnese subjektivní prvek. V odůvodněných případech je oprávněný.

Tab. 15 Nalezení reprezentativního součinitele drsnosti pomocí MNČ

n	$h_{1,m}$	$h_{1,v}$	Δ_1	$h_{2,m}$	$h_{2,v}$	Δ_2	$h_{3,m}$	$h_{3,v}$	Δ_3	$h_{4,m}$	$\sum \Delta_i^2 \cdot 1\,000$	
[-]	[m n. m.]	[m n. m.]	[m]	[m n. m.]	[m n. m.]	[m]	[m n. m.]	[m n. m.]	[m]	[m n. m.]	1+2+3+4	2+3+4
0,040	209,100	209,026	0,074	208,873	208,865	0,008	208,832	208,836	-0,004	208,829	7,773	0,080
0,044					208,871	0,002		208,837	-0,005			0,029
0,045					208,872	0,001		208,837	-0,005			0,026
0,046					208,874	-0,001		208,838	-0,006			0,037
0,050					208,879	-0,006		208,839	-0,007			0,085
0,080		209,044	0,056		208,917	-0,044		208,851	-0,019		6,848	6,758
0,090		209,047	0,053		208,929	-0,056		208,856	-0,024		6,798	
0,092		209,049	0,051		208,931	-0,058		208,857	-0,025		6,776	
0,093		209,050	0,050		208,932	-0,059		208,858	-0,026		6,930	
0,094		209,060	0,040		208,933	-0,060		208,858	-0,026			
0,100					208,940	-0,067		208,861	-0,029			

Obvykle se stanovuje úsekový součinitel drsnost (na soustavě dílčích profilů). Teoreticky lze stanovit i profilový součinitel drsnost (minimálně mezi třemi příčnými profily, resp. na krátkém úseku toku) (Macura, 1990) a pak např. provést zprůměrování několika profilových součinitelů drsnosti a stanovit tak úsekový součinitel drsnosti. V takovém případě by se sice nemusela používat MNČ a výpočtově by se ihned projevila změna součinitele drsnosti, ale hodnoty součinitelů drsnosti by pak pro jednu lokalitu a měření mohly mít značný rozptyl. Profilový součinitel drsnosti by pak mohl být snadno ovlivněn ději nad nebo pod tímto úsekem. Pro účely praxe se proto používá úsekový součinitel drsnosti.

K velkým odchylkám mezi vypočítanou a naměřenou hladinou (nad 5 cm mezi dvěma profily) dochází zejména u toků s podélným sklonem $> 10\%$ (podhorské a horské toky). Průběh hladin výrazně ovlivňuje přítomnost peřejí a hrubozrnného materiálu. Odchylky menší

než 20 mm mohly být způsobeny nivelací hladin (vlnění hladiny, nedokonalost přístroje, čtení z měrné latě). V Tab. 16 je uvedena četnost maximálních odchylek (největší odchylka naměřené a vypočtené hladiny pro dané měření a lokalitu). Lze vidět, že cca polovina (42 %) všech odchylek je do **20 mm**. Výjimečně se lze setkat s odchylkami většími než 5 cm, což je pro přírodní vodní toky stále přijatelná hodnota chyby.

Tab. 16 Četnost výskytů absolutních rozdílů vypočtených a naměřených úrovní hladin

Rozmezí Δ_a pro $h_{i,m}$ a $h_{i,v}$ [mm]	≤ 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 75	≥ 75
Četnost [-]	18	18	17	15	34	16	11	9	2
Suma četností [%]	15	29	30	42	69	82	91	98	100

Jsou-li podélné sklony hladin malé, může se stát, že se MNČ nezíská absolutní minimum, ale pro několik po sobě se zvětšujících hodnot součinitele drsnosti (zvětšování po 0,001) se nemění hodnota $\sum \Delta_i^2$ (65), případně se nemění s kvadratickou závislostí. V takovém případě se pro stanovení součinitele drsnosti použije suma absolutních hodnot rozdílů naměřených a vypočtených hladin, tj. $\sum |\Delta_i|$. Pokud nebude výsledek stále jasný, uvedou se hodnoty $\sum \Delta_i^2$ (65) v pořadí zvětšujícího se součinitele drsnosti a zvolí se:

- v případě lichého počtu stejných hodnot prostřední hodnota součinitele drsnosti,
- v případě sudého počtu stejných hodnot nižší hodnota součinitele drsnosti.

Stanovení součinitelů drsnosti z měření proběhlo v programu HEC-RAS. Je nutné podotknout, že použitím jiného softwaru by mohlo dojít ke stanovení mírně odlišných výsledků. V programu HEC-RAS 4.1 je výchozí hodnota součinitele rozšíření nastavena na hodnotu 0,3 a součinitele zúžení na hodnotu 0,1. Byl analyzován vliv extrémů hodnot součinitelů, tj. **min** - minimální (oba mají hodnotu 0,0) a **max** - maximální (oba mají hodnotu 1,0) na úrovně vypočítaných hladin. Rozdíly jednotlivých úrovní vypočítaných hladin, tj. **min-max** [m] vybraných měření jsou uvedeny v Tab. 17. Pro doplnění jsou modře uvedeny rozdíly nivelací stanovených úrovní hladin H_i a H_{i+1} mezi jednotlivými příčnými profily PF_i . Lze konstatovat, že změna součinitelů místních ztrát nemá na změnu vypočítaných úrovní hladin zásadní vliv. Rozdíly jsou v řádu milimetrů.

Tab. 17 Vliv součinitelů zúžení a rozšíření na výpočet úrovní hladin v programu HEC-RAS

Měření	Čeladná - 4		Křtiny - 1		Morávka - 2		Rychmanov - 4	
Profil	min-max	$H_i - H_{i+1}$	min-max	$H_i - H_{i+1}$	min-max	$H_i - H_{i+1}$	min-max	$H_i - H_{i+1}$
PF1	0,004	0,414	0,000	0,166	0,012	0,177	0,007	0,025
PF2	0,003	0,302	0,001	0,066	0,008	0,207	0,005	0,022
PF3	0,007	0,375	0,001	0,079	0,003	0,248	0,001	0,024

Mnohem větší vliv na výpočet mají interpolované profily, které se vkládají mezi zadané profily pro hladší průběh vypočtených hladin. Interpolace se používá zejména

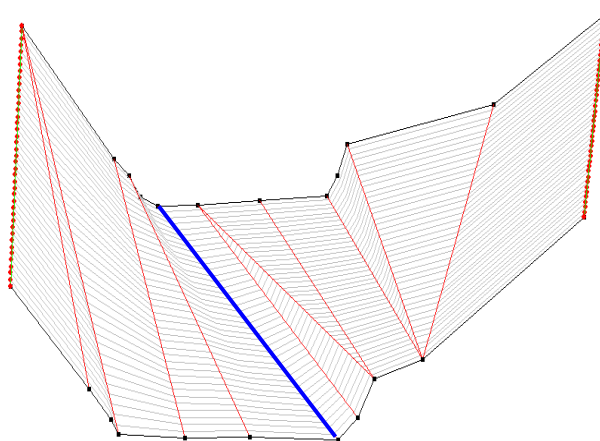
v korytech s výraznou změnou sklonu hladiny. Mezi zaměřenými profilem na 27 lokalitách je minimální vzdálenost 6 m (Ochoz u Brna), medián vzdálenosti je 21 m a maximální vzdálenost mezi profilem je 41 m (Bílovice nad Svitavou).

Byla provedena analýza vlivu vkládání interpolovaných profilů na výpočet průběhu hladin v programu HEC-RAS 4.1. V Tab. 18 je provedeno srovnání zaměřených úrovní hladin s vypočtenými úrovněmi hladin z modelu bez interpolovaných profilů a modelů, kde je vzdálenost mezi vloženými (interpolovanými) příčnými profilem 5,0 m, 1,0 m a 0,1 m. Je-li provedena interpolace, pak už průběhy hladin výrazně neovlivňuje vzdálenost mezi interpolovanými profilem. Níže uvedené příklady jsou převzaty ze stanovení úsekových součinitelů drsnosti pomocí metody nejmenších čtverců. V průbězích hladin je použití interpolace znatelné zejména na tocích s větším podélným sklonem hladiny.

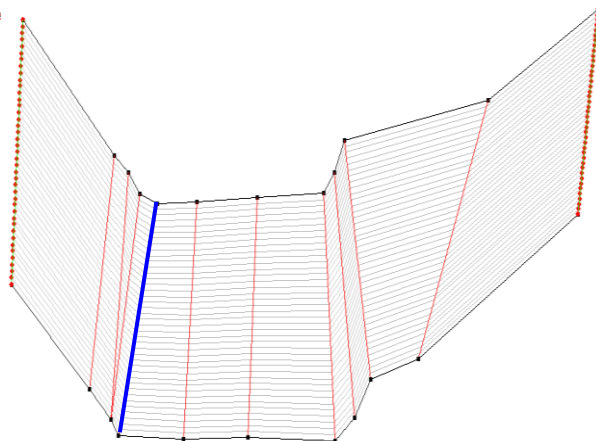
Tab. 18 Vliv interpolovaných příčných profilů na průběhy hladin

	měřeno	bez	5,0 m	1,0 m	0,1 m	měřeno	bez	5,0 m	1,0 m	0,1 m
	[m n. m.]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m n. m.]	[m]	[m]	[m]	[m]
	Čeladná - 4					Křtiny - 1				
PF1	505,126	0,001	0,074	0,074	0,075	395,337	0,025	0,044	0,043	0,044
PF2	504,865	-0,082	-0,080	-0,079	-0,078	395,220	-0,016	-0,006	-0,005	-0,004
PF3	504,494	-0,046	-0,015	-0,012	-0,009	395,190	-0,042	-0,041	-0,041	-0,040
	Morávka - 2					Rychmanov - 4				
PF1	471,032	0,062	0,060	0,063	0,064	187,729	0,003	0,014	0,015	0,015
PF2	470,896	0,030	0,024	0,023	0,023	187,726	-0,014	-0,008	-0,007	-0,007
PF3	470,770	-0,065	-0,063	-0,060	-0,059	187,704	-0,011	-0,009	-0,008	-0,008

Během stanovování součinitele drsnosti v tocích se členitým dnem bylo zjištěno, že automatická interpolace, kterou program HEC-RAS 4.1 nabízí, je v některých případech nevyhovující. Program totiž mezi příčnými profilem nejprve spojuje body ve dně s nejnižší nadmořskou výškou (modrá čára v Obr. 22) a pak teprve ostatní body. Je-li např. nejnižší místo horního profilu poblíž PB a nejnižší místo dolního profilu u LB, program uměle vytvoří neexistující překážku, která zásadně omezuje proudění, viz Obr. 24.

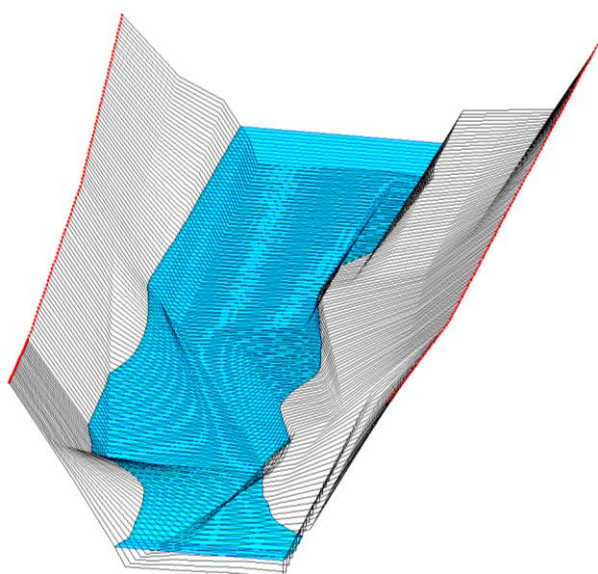


Obr. 22 Nesprávně interpolovaný příčný řez

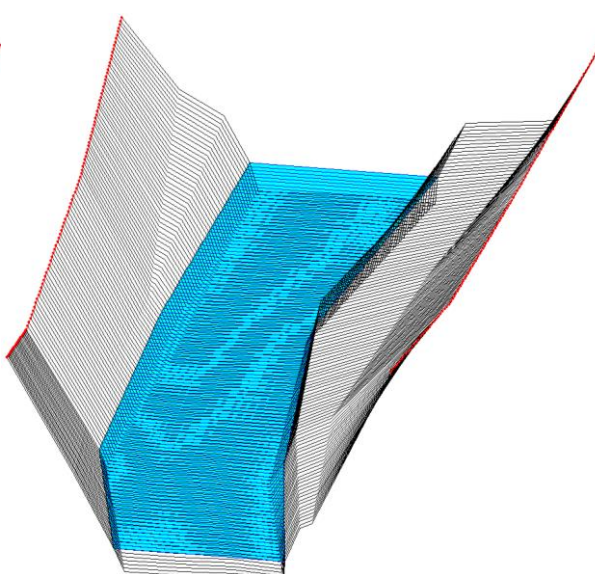


Obr. 23 Správně interpolovaný příčný řez

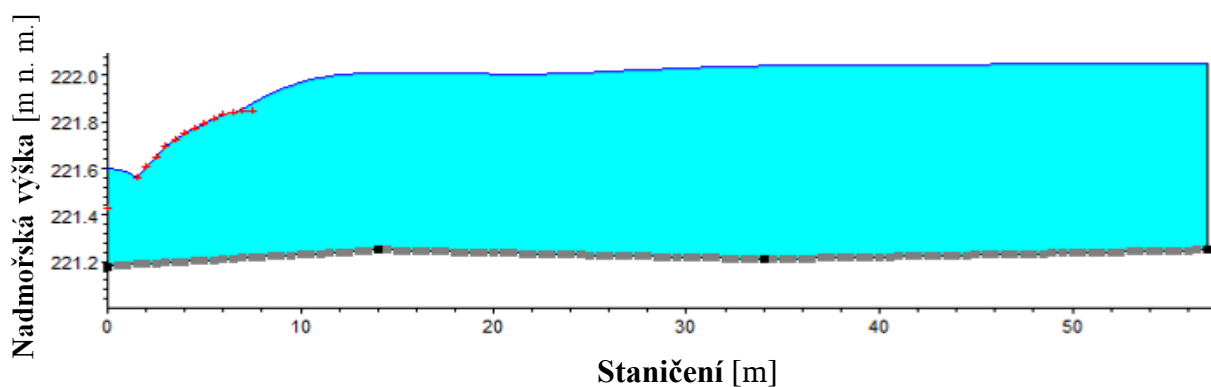
V pohledu nebo půdorysu, který je vytvořen z nesprávně interpolovaných profilů, lze najít zúžené hrdlo, viz Obr. 24. V podélném řezu se nesprávná interpolace projeví bezdůvodným vznikem vodního skoku, viz Obr. 26. Zejména u menšího toku s malým podélným sklonem nabývá součinitel drsnosti vlivem vzdutí velmi malých hodnot, které jsou obvykle menší než 0,010. U hrubozrnného dna takové výsledky na první pohled značí chybu. Vyskytnou-li se výše zmíněné problémy, je nutné interpolaci provést manuálně, jak ukazuje Obr. 23, Obr. 25 a Obr. 27.



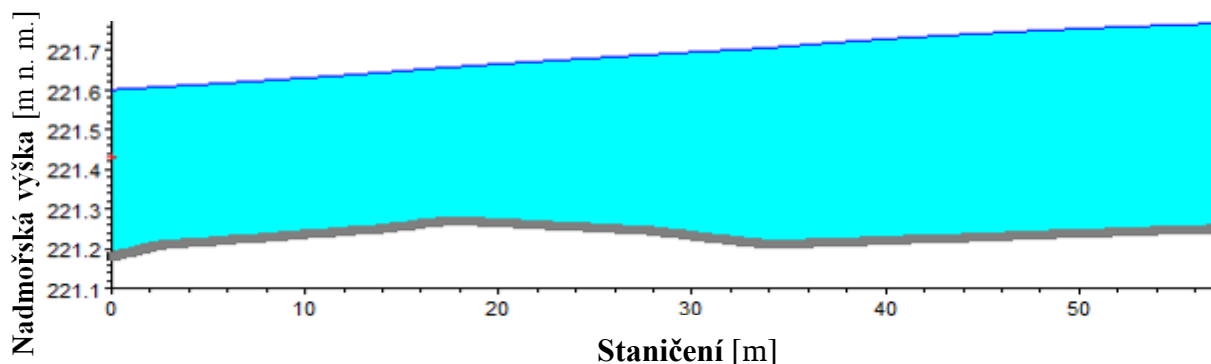
Obr. 24 Nesprávně interpolovaný úsek toku



Obr. 25 Správně interpolovaný úsek toku



Obr. 26 Vodní skok indikující v podélném řezu nesprávnou interpolací mezi příčnými profily



Obr. 27 Podélný řez se správnou interpolací mezi příčnými profily

4.1.6 VÝPOČET SOUČINITELE DRSNOSTI, VÝBĚR EMPIRICKÝCH ROVNIC

Pro použití vstupních dat pro výpočet součinitele drsnosti empirickými rovnicemi bylo stanoveno několik zásad:

- Byly použity hodnoty kvantilů (16, 35, 50, 55, 65, 75, 80, 84, 90, *ef*) ze zrnitostních křivek stanovených Wolmanovou met. (kapitola 4.7.4). V lokalitách Oslavany (dolní odběr) a Židlochovice (oba odběry) byly použity křivky zrnitosti ze síťových rozborů.
- U vlastních měření byly stanoveny a použity průměrné hodnoty veličin ze čtyř příčných profilů (*B*, *Q*, *h*, *A*, *O*, *R*, *i_H*, *i_E*, *v*). Rozdíly vypočtených součinitelů drsnosti stanovených z průměrných veličin a z veličin jednotlivých profilů jsou sice výrazné, ale nejsou dále uvažovány, protože byl stanoven úsekový součinitel drsnosti, viz kapitola 4.1.5.
- Hodnoty vstupních veličin uvedené v jednotkách soustavy US byly převedeny na jednotky SI. K převodu došlo i u parametrů, které se běžně uvažují konstantní, jako je např. tíhové zrychlení *g* ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} = 32,185 \text{ ft}\cdot\text{s}^{-2}$) nebo kinematická viskozita *ν* ($1 \text{ ft}^2\cdot\text{s}^{-1} = 0,0929 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$). Tyto parametry jsou obsaženy také ve Froudově čísle *r* (*g*, *ν*) a Reynoldsově čísle *Re* (*ν*).

Jsou-li známy všechny vstupní údaje a součinitelé drsnosti stanovené z měření, je možné provést výpočet součinitele drsnosti empirickými rovnicemi. Následně je možné vybrat nejvhodnější empirické rovnice na základě hodnot vypočtených a z měření stanovených součinitelů drsnosti. Pro výpočet bylo použito 275 rovnic. Podrobnější informace o počtu použitých rovnic uvádí Tab. 19.

Pro výpočet součinitele drsnosti v empirických rovnicích, které obsahují parametr *k* nebo *k_s*, se používá rovnice $k_s = k = m \cdot d_x$ (34). Nejsou-li *d_x* ani *m* u rovnice uvedeny, je možné pro výpočet zvolit až 21 kombinací (**stavů**) koeficientu *m* a příslušného kvantilu *d_x*, viz Tab. 5. Příklad je uveden pod Tab. 24.

Tab. 19 Počty použitých rovnic a stavů

Parametr zrnitosti	Počet rovnic	Počet stavů	Celkem stavů
<i>d_x</i>	231	231	1 137
<i>k_s</i>	16	318	
<i>k</i>	28	588	

Následné vyhodnocení kvality rovnic je provedeno pro relativní rozdíly Δ_r z měření stanovených n_m a vypočtených n_v součinitelů drsnosti, tedy

$$\Delta_r = \frac{|n_m - n_v|}{n_m}. \quad (66)$$

Kdyby se srovnávaly absolutní rozdíly Δ_a stanovených n_m a vypočtených n_v součinitelů drsnosti rovnicí

$$\Delta_a = |n_m - n_v|, \quad (67)$$

došlo by k ovlivnění výsledků vyššími hodnotami n_m , u kterých bývá i větší rozdíl od n_v . V následujících analýzách byly použity hodnoty $0,015 \leq n_v \leq 0,300$, viz kapitola 3.9, které nejsou považovány za chybové. Procentuální rozložení jednotlivých rozdílů (z celkových 692 799 hodnot) je uvedeno v Tab. 20, kde jsou přerušovanou čarou podtrženy hodnoty přesahující 95% hranici (zanedbatelné množství).

Tab. 20 Procentuální rozložení relativních a absolutních rozdílů n_m a n_v

Δ_r [%]	Četnost [%]	Suma četnosti [%]	Δ_a [-]	Četnost [%]	Suma četnosti [%]
0	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00
0 - 5	7,17	7,17	0,000 - 0,005	18,77	18,77
5 - 10	6,69	13,86	0,005 - 0,010	15,07	33,85
10 - 20	13,05	26,90	0,010 - 0,020	20,04	53,89
20 - 30	12,64	39,55	0,020 - 0,030	12,54	66,43
30 - 40	11,92	51,47	0,030 - 0,040	8,60	75,03
40 - 50	11,35	62,82	0,040 - 0,050	5,77	80,80
50 - 60	11,01	73,83	0,050 - 0,060	4,03	84,83
60 - 70	10,02	83,85	0,060 - 0,070	3,13	87,96
70 - 80	6,73	90,58	0,070 - 0,080	2,17	90,13
80 - 90	4,03	94,60	0,080 - 0,090	1,36	91,50
90 - 100	0,88	95,48	0,090 - 0,100	1,13	92,63
100 - 125	0,92	96,40	0,100 - 0,125	2,20	94,83
125 - 150	0,65	97,05	0,125 - 0,150	2,21	97,04
150 - 200	0,85	97,90	0,150 - 0,200	2,07	99,11
200 - 250	0,53	98,43	0,200 - 0,250	0,83	99,94
250 - 300	0,37	98,80	0,250 - 0,300	0,06	100,00
300 - 350	0,30	99,10			
350 - 400	0,23	99,34			
400 - 500	0,33	99,66			
500 - 750	0,29	99,95			
750 - 1 000	0,03	99,99			
1 000 - 1 500	0,01	100,00			

Statistická analýza byla prováděna zvlášť pro jednotlivé podkategorie (celkem 27) a zdroje dat z měření (vlastní, externí, vše). V Tab. 21 jsou **dle hodnot jednotlivých veličin - kategorií** (Tab. 14) **uvedeny počty měření** pro jednotlivé podkategorie a zdroje. Lze vidět, jaké množství vstupních dat bylo v jednotlivých podkategoriích. Pro každou veličinu (kategorií) je u vlastních dat vyznačen tučným písmem minimální počet měření.

V Tab. 22 jsou uvedeny **počty vypočítaných hodnot součinitelů drsnosti empirickými rovnicemi** v jednotlivých podkategoriích a zdrojích. Z pohledu statistického vyhodnocení je tato informace důležitější. Přestože jsou hodnoty v tabulkách ve většině případů shodné, občas vzniknout u externích dat rozdíly (podtržené hodnoty), které jsou způsobeny rovnicemi, které pro výpočet nepotřebují uvedenou veličinu nebo u měření uvedená veličina chybí.

Tab. 21 Počet vstupních dat (měření) v jednotlivých podkategoriích a zdrojích

Pod-kategorie	Kategorie	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>i_H</i>	<i>v</i>	<i>Q</i>	<i>d</i> ₅₀	<i>d</i> ₈₄	<i>R/d</i> ₅₀	<i>R/d</i> ₈₄
	Zdroj	[m]	[m]	[-]	[m·s ⁻¹]	[m ³ ·s ⁻¹]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Malá	Vlastní	27	62	20	87	68	14	14	77	61
	Externí	93	108	<u>757</u>	<u>487</u>	173	<u>273</u>	<u>194</u>	204	120
	Vše	120	170	<u>777</u>	<u>574</u>	241	<u>287</u>	<u>208</u>	281	181
Střední	Vlastní	79	66	60	34	63	85	86	49	69
	Externí	887	553	<u>586</u>	680	849	397	303	312	251
	Vše	966	619	<u>646</u>	714	912	482	389	361	320
Velká	Vlastní	32	10	58	17	7	39	38	12	8
	Externí	705	1 024	328	486	663	259	179	<u>413</u>	<u>305</u>
	Vše	737	1 034	386	503	670	298	217	<u>425</u>	<u>313</u>
Celkově	Vlastní	138								
	Externí	1 685	1 685	1 671	1 653	1 685	929	676	929	676
	Vše	1 823	1 823	1 809	1 791	1 823	1 067	814	1 067	814

Tab. 22 Počet vypočítaných hodnot souč. drsnosti v jednotlivých podkategoriích a zdrojích

Pod-kategorie	Kategorie	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>i_H</i>	<i>v</i>	<i>Q</i>	<i>d</i> ₅₀	<i>d</i> ₈₄	<i>R/d</i> ₅₀	<i>R/d</i> ₈₄
	Zdroj	[m]	[m]	[-]	[m·s ⁻¹]	[m ³ ·s ⁻¹]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Malá	Vlastní	27	62	20	87	68	14	14	77	61
	Externí	93	108	<u>768</u>	<u>519</u>	173	<u>1 029</u>	<u>1 203</u>	204	120
	Vše	120	170	<u>788</u>	<u>606</u>	241	<u>1 043</u>	<u>1 217</u>	281	181
Střední	Vlastní	79	66	60	34	63	85	86	49	69
	Externí	887	553	<u>589</u>	680	849	397	303	312	251
	Vše	966	619	<u>649</u>	714	912	482	389	361	320
Velká	Vlastní	32	10	58	17	7	39	38	12	8
	Externí	705	1 024	328	486	663	259	179	<u>1 169</u>	<u>1 314</u>
	Vše	737	1 034	386	503	670	298	217	<u>1 181</u>	<u>1 322</u>
Celkově	Vlastní	138	138	138	138	138	138	138	138	138
	Externí	1 685	1 685	1 685	1 685	1 685	1 685	1 685	1 685	1 685
	Vše	1 823	1 823	1 823	1 823	1 823	1 823	1 823	1 823	1 823

Pro srovnání relativních rozdílů Δ_r (66) a následná statistická vyhodnocení jsou použity následující funkce a uvedeny příklady jejich použití:

- **suma** - počet měření N v dané kategorii, podkategorii a zdroji dat, viz Tab. 21,
- **min** - minimální hodnota; pro informativní účely,
- **small** - výběr x -té nejmenší hodnoty výběrové směrodatné odchylky nebo mediánu pro stanovení pořadí nejvhodnějších rovnic,
- **průměr** - průměrná hodnota; pro informativní účely,
- **trimmean** - robustnost; průměrná hodnota relativních rozdílů Δ_r dané podkategorie a zdroje, u které nejsou uvažovány okrajové hodnoty (extrémy); bylo zvoleno 10% odstranění extrémů (5 % zleva, 5 % zprava); pro informativní účely,
- **median** (MED) - medián hodnot relativních rozdílů Δ_r dané podkategorie a zdroje,
- **max** - maximální počet použitých měření v dané podkategorii a zdroji,
- **výběrová směrodatná odchylka** (VSO) (68) - pro výběr nejvhodnějších empirických rovnic
a výpočet nejpravděpodobnější hodnoty součinitele drsnosti dle zadaných veličin.

Výše uvedené funkce, které jsou označeny **tučně**, odpovídají názvům funkcí v MS Excel. Podtržené funkce slouží k vlastnímu výběru nejvhodnějších rovnic. Množství N vypočítaných součinitelů drsnosti n_r je zohledněno ve VSO, což je vhodnou vlastností této statistické analýzy. Výběrová směrodatná odchylka se počítá dle rovnice

$$VSO = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta_{r,i}^2}, \quad (68)$$

kde N je počet měření v dané podkategorii a zdroji. Výpočet probíhá jen v případě, že pro danou rovnici jsou v dané podkategorii a zdroji alespoň dvě vypočítané hodnoty součinitele drsnosti. Rovnice (68) je ekvivalentní s rovnicí [12]

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (69)$$

která se ale používá pro vyhodnocení naměřených hodnot jednoho jevu. V tomto případě je ale jevů více (každé měření za jiných podmínek). V Tab. 23 je uvedena ukázka výpočtu VSO.

Tab. 23 Ukázka výpočtu výběrové směrodatné odchylky a mediánu relativních rozdílů z měření stanovených a vypočtených součinitelů drsnosti

i	N	n_m	n_v	$\Delta_{a,i}$	$\Delta_{r,i}$	$\Delta_{r,i}^2$	MED	VSO (68)
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]
1	3	0,025	0,040	0,015	0,600	0,360	0,273	0,584
2		0,100	0,085	0,015	0,150	0,023		
3		0,055	0,070	0,015	0,273	0,074		

Jsou-li vypočítány MED a VSO ve všech 27 podkategoriích a 3 zdrojích dat, je možné přistoupit k **výběru nejvhodnějších empirických rovnic dle Metodiky**, který má 3 fáze:

- 1. fáze: výběr 30 nejvhodnějších empirických rovnic v každé z 27 podkategorií,
- 2. fáze: odstranění rovnic vybraných jen v jedné z 27 podkategorií (vyloučení náhody),
- 3. fáze: stanovení pořadí nejvhodnějších empirických rovnic jednotlivých podkategorií.

V **1. fázi** se pro každou z 27 podkategorií vybírají nejvhodnější rovnice dle provázaného systému výpočtů, který funguje iteračně v následujících krocích, viz Tab. 24:

- náhodná volba tzv. x-té hodnoty (oranžový obdélník); kde x je např. 128. nejmenší hodnota MED nebo VSO,
- nalezení x-tých nejmenších hodnot MED nebo VSO jednotlivých zdrojů dat S, E, V (modrý obdélník) ze všech MED nebo VSO empirických rovnic (světle modrý obdélník) u konkrétní podkategorie,
- ověření výběrových podmínek: splňuje-li konkrétní rovnice alespoň jednu výběrovou podmínku, zapíše se u rovnice „1“, v opačném případě „0“ (zelený obdélník),
- zápis vybraných rovnic; je-li alespoň u jedné z výběrových podmínek konkrétní rovnice hodnota „1“, zapíše se do fialového obdélníku „1“, v opačném případě „0“,
- počet nejvhodnějších rovnic (červený obdélník); součet čísel fialového obdélníku,
- iterační úprava x-té hodnoty (oranžový obdélník) tak, aby suma nejvhodnějších rovnic jedné podkategorie byla 30.

Tab. 24 Ukázka výběru nejvhodnějších empirických rovnic jedné podkategorie - 1. fáze

Označení empirické rovnice (zkratka)				RIC-2	BRE7-6	S-A2-19	...
Zvolená podkategorie	MED x-té hodnoty	0,388	Vlastní (S)	0,399	0,255	0,452	...
		0,499	Externí (E)	0,386	0,427	0,607	...
		0,476	Vše (V)	0,399	0,401	0,599	...
	VSO (68) x-té hodnoty	0,633	Vlastní (S)	0,506	0,410	2,578	...
		0,575	Externí (E)	0,548	0,516	0,595	...
		0,651	Vše (V)	0,522	0,464	1,839	...
	x-tá hodnota 128	1A		0	1	0	...
		2A		1	0	0	...
		2B		0	0	0	...
		3A		0	0	0	...
		3B		0	0	0	...
	Počet nejvhodnějších rovnic:		30	1	1	0	...

Pro vysvětlení označení empirických rovnic je uveden následující příklad. Je-li např. u rovnice uvedeno S-A2-19 (viz Tab. 24), znamená to, že autorem (viz Příloha 7) je „Sayre a Albertson“ („S-A“), že se jedná o druhou („2“) rovnici autorů v databázi a že se pro stanovení k_s do rovnice $k_s = m \cdot d_x$ (34) dle Tab. 5 v případě „19“ dosazuje $d_x = d_{75}$ a $m = 3,2$.

Níže uvedené výběrové podmínky pro hledání nejvhodnějších empirických rovnic prošly dlouhým vývojem. Cílem bylo vybrat rovnice s nejmenšími hodnotami MED a VSO a i když vykazují rovnice u zdroje dat S či E špatné výsledky, do hodnoty 0,6 byla ponechána.

- **1A** - $MED(S, E, V) \leq MED(x-tá); VSO(S, E, V) \leq VSO(x-tá),$
- **2A** - $MED(E, V) \leq MED(x-tá); MED(S) \leq 0,6; VSO(E, V) \leq VSO(x-tá); VSO(S) \leq 0,6,$
- **2B** - $MED(S, V) \leq MED(x-tá); MED(E) \leq 0,6; VSO(S, V) \leq VSO(x-tá); VSO(E) \leq 0,6,$
- **3A** - $MED(E, V) \leq MED(x-tá); MED(S) \leq 0,6; VSO(E, V) \leq VSO(x-tá),$
- **3B** - $MED(S, V) \leq MED(x-tá); MED(E) \leq 0,6; VSO(S, V) \leq VSO(x-tá).$

Vlastní měření jsou dle příjmení autora práce označena zkratkou „S“ (např. v Tab. 24). Hodnota 0,6, která se vyskytuje ve výběrových podmínkách, byla zavedena na základě zjištění, že většina hodnot MED a VSO kvalitních rovnic se pohybuje do této hodnoty. Zvolené číslo 0,6 a rozmezí součinitelů drsnosti ($0,015 \leq n \leq 0,300$) jsou jedinými subjektivně zvolenými hodnotami v Metodice. Číslo 30 bylo pro výběr nejvhodnějších empirických rovnic zvoleno proto, aby již byl dostatečný počet vybraných rovnic a zároveň jich nebylo příliš mnoho. Větší množství empirických rovnic (horší hodnoty MED a VSO) by již zmenšovalo kvalitu výpočtu součinitele drsnosti Metodikou.

Ve **2. fázi** výběru se provedlo vyřazení empirických rovnic, které se vyskytovaly jen v jedné podkategorii. Důvodem je obava, že empirická rovnice není vhodná pro širší použití, a že mohla být vybrána na základě malého množství dat. Empirické rovnice, které vychází jako „vhodné“ pro více podkategorií (Příloha 7), lze označit jako univerzálnější. Pojem „vhodné“ vyjadřuje počet podkategorií z celkových 27, ve kterých byla empirická rovnice vybrána jako jedna z 30 nejvhodnějších.

Jsou-li stanoveny MED, VSO a vybrány nejvhodnějších empirické rovnice ve všech podkategoriích, je možné ve **3. fázi** stanovit šesti zvolenými způsoby **Z** různá pořadí empirických rovnic. U konkrétní rovnice se nejprve zvoleným způsobem **Z** provede výpočet specifické hodnoty, která vyjadřuje kvalitu rovnice. Výpočet již pro jednoduchost neprobíhá zvlášť na jednotlivých zdrojích dat, ale již jen na všech datech. Stanovené specifické hodnoty empirických rovnic se dle poznámek v Tab. 25 seřadí zvoleným způsobem **Z**. Stručné popisy způsobů seřazení **Z1** až **Z6** (pojmy v uvozovkách jsou vysvětleny na následujících straně):

- **Z1** - „medián“ z hodnot MED (V) všech podkategorií empirické rovnice,
- **Z4** - „medián“ z hodnot VSO (V) všech podkategorií empirické rovnice,
- **Z2** - poměr „největšího pořadí“ dle MED (V) k počtu „vhodných“ podkategorií rovnice,
- **Z5** - poměr „největšího pořadí“ dle VSO (V) k počtu „vhodných“ podkategorií rovnice,
- **Z3** - $P_4 = P_1 + \frac{P_2}{P_3 + 1},$ (70)

kde P_1 je počet „shod“ empirické rovnice, P_2 je průměrné pořadí z hodnot MED (V) u „shod“, P_3 je maximální hodnota P_2 stanovená ze všech rovnic jedné podkategorie,

- **Z6** - rovnice (70), P_2 je průměrné pořadí z hodnot VSO (V) u „shod“.

Protože může být výše uvedený krátký popis nejasný, je v Tab. 25 uveden jednoduchý **příklad tří empirických rovnic** (RIC-2, BRE7-6, S-A2-19) **a několika podkategorií**. V části I Tab. 25 jsou uvedeny buď mediány MED nebo výběrové směrodatné odchylky VSO stanovené ze všech dat (V) měření dané podkategorie. V části I Tab. 25 jsou dole počítány „mediány“ z hodnot MED (V) nebo VSO (V) všech podkategorií jedné empirické rovnice (např. modrý rámeček). Pokud se „mediány“ jednotlivých empirických rovnic seřadí vzestupně, vznikne pořadí způsobu **Z1** (zdrojem pro stanovení pořadí byly hodnoty MED (V)) nebo **Z4** (zdrojem pro stanovení pořadí byly hodnoty VSO (V)).

V části II Tab. 25 se nejprve v každé podkategorii stanoví pořadí empirických rovnic na základě nejmenších hodnot MED (V) nebo VSO (V) z části I Tab. 25 (např. oranžový rámeček). Následně se mezi podkategoriemi jedné rovnice (např. fialový rámeček) nalezne nejvyšší číslo - tzv. „největšího pořadí“ a spočítá se počet „vhodných“ podkategorií rovnice (tj. počet míst např. ve fialovém rámečku, která obsahují číslo pořadí). Stanoví se „poměr“ „největšího pořadí“ a počtu „vhodných“ podkategorií. Hodnoty „poměrů“ se seřadí vzestupně a vznikne pořadí způsobů **Z2** nebo **Z5** podle toho, zda byly zdrojem pro výpočet hodnoty MED (V) nebo VSO (V).

Tab. 25 Příklad stanovení pořadí empirických rovnic dle jednotlivých způsobů

I		MED nebo VSO				II		Pořadí dle MED nebo VSO		
Rovnice	RIC-2	BRE7-6	S-A2-19	Rovnice		RIC-2	BRE7-6	S-A2-19		
<i>B</i>	0,20	0,20		→	<i>B</i>	1	1			
<i>B</i>	0,40	0,30		→	<i>B</i>	2	1			
<i>B</i>		0,30		→	<i>B</i>		1			
<i>R</i>	0,20	0,30	0,40	→	<i>R</i>	1	2	3		
...	...	...	...		...	...	...	...		
„medián“	0,20	0,30	0,40		„největší pořadí“	2	2	3		
Z1 nebo Z4	1	2	3		„vhodné“	3	4	1		
Pozn.: seřaď dle nejmenší hodnoty „mediánu“					„poměr“	0,67	0,50	3,00		
Pozn.: seřaď dle nejmenší hodnoty „poměru“					Z2 nebo Z5	2	1	3		
					↓	↓	↓			
III		Vstupní hodnoty veličin				IV		Pořadí dle vstupů a „shod“		
Rovnice	RIC-2	BRE7-6	S-A2-19	Rovnice		RIC-2	BRE7-6	S-A2-19		
<i>B</i>				→	<i>B</i>	<u>2</u>	1			
<i>B</i>	15,00	15,00	15,00	→	<i>B</i>					
<i>B</i>					<i>B</i>					
<i>R</i>	0,10	0,10	0,10		<i>R</i>	<u>1</u>	2	3		
...	...	...	...		...	...	...	...		
					<i>P</i> ₁ - počet „shod“	2	2	1		
					<i>P</i> ₂ - průměrné pořadí	1,50	1,50	3,00		
					<i>P</i> ₃ - maximální <i>P</i> ₂	3,00				
					<i>P</i> ₄ (70)	2,38	2,50	1,75		
Pozn.: seřaď dle největší hodnoty „ <i>P</i> ₄ “					Z3 nebo Z6	2	1	3		

V části **III** Tab. 25 se u jednotlivých kategorií provede přiřazení 9 vstupních parametrů do příslušné podkategorie (malá / střední / velká hodnota parametru) 9 kategorií.

Došlo-li ke „shodě“ (podtržení), provede se na příslušné úrovni v části **IV** Tab. 25 zápis hodnot z části **II** Tab. 25. Jedná se o „shodu“ pozice hodnoty pořadí a hodnoty veličiny. Jsou-li např. ve fialovém i červeném rámečku čísla, provede se zápis podtržených hodnot v části **IV** Tab. 25. Pak se spočítá počet „shod“ P_1 jedné empirické rovnice v podkategoriích (tj. počet čísel např. v zeleném rámečku). Stanoví se průměrné pořadí P_2 z hodnot např. v zeleném rámečku a hodnota P_3 , což je maximální hodnota ze všech hodnot P_2 . Provede se výpočet P_4 dle rovnice (70). Pokud se hodnoty P_4 seřadí sestupně, vznikne pořadí způsobů **Z3** nebo **Z6** podle toho, zda byly zdrojem pro výpočet hodnoty MED (V) nebo VSO (V).

Všechny empirické rovnice z databáze byly rozděleny do tří tříd kvality, viz Tab. 26. (rovnice a stavy vychází z Tab. 19):

- **I. třída** - nejvhodnější, rovnice prošla 2. fází výběru nejvhodnějších rovnic,
- **II. třída** - podmíněně doporučené (nejsou v I. ani III. třídě),
- **III. třída** - nedoporučené rovnice, nejsou „vhodné“ pro žádnou podkategorii.

Tab. 26 Počty jednotlivých typů empirických rovnic a jejich stavů dle tříd kvality

Kvalita	I. třída		II. třída		III. třída	
Typ	Rovnice	Stavy	Rovnice	Stavy	Rovnice	Stavy
A1	6	17	7	12	21	34
A2	1	-	3	-	-	-
A3	4	-	2	-	1	-
A4	2	9	9	14	9	61
B1	1	-	3	-	4	-
B2	-	4	6	2	-	36
B3	1	2	1	11	3	29
C1	7	-	6	-	11	-
C2	7	-	-	-	-	-
C3	1	20	-	9	5	34
C4	-	4	4	11	5	90
D1	2	-	2	-	5	-
D2	-	3	4	8	1	52
D3	6	-	4	2	9	61
D4	-	19	-	12	1	137
Ostatní	9	22	16	41	24	168
Suma	47	100	67	122	99	702
Celkem	1 137					

Pozn.: Tučným písmem je vyznačeno pět nejvíce zastoupených typů empirických rovnic v daných třídách.

Předchozí část Metodiky, tj. 1. až 3. fáze, proběhla celkem na 1 823 datech z vlastních (S) a externích měření (E) v přírodních a upravených vodních tocích. Výběr nejvhodnějších empirických rovnic (kapitola 4.1.6) z vlastních měření proběhl na základě průměrných hodnot veličin příčných profilů. Dle Metodiky popsané v kapitole 4.1.6 bylo vybráno 147 rovnic a stavů (viz Tab. 26, suma I. třídy), které byly použity k verifikaci kvality předpovědní schopnosti jednotlivých způsobů **Z** pro výpočet součinitele drsnosti Metodikou.

4.1.7 VERIFIKACE

Pro verifikaci byla pořízena nová externí verifikační data (E_V) z přírodních toků, upravených toků a z laboratorních měření, která byla získána z (Guy, 1966), (Limerinos, 1970), (Karim, 1995), (Fisher, 2003) a (Roušar, 2012). Absence mnoha kvantilů křivky zrnitosti u vyššího množství dat E_V způsobila, že výpočet součinitele drsnosti neproběhl u mnoha empirických rovnic. Byla zde proto obava, že by výsledky verifikace mohly být zavádějící. Proto byly k verifikaci jednotlivých způsobů **Z** zvoleny všechny tři typy vstupních dat (S, E, E_V), přestože by verifikace měla správně proběhnout jen na datech, která nebyla použita dříve. Verifikace proběhla celkem na 2 968 datech (z toho S - 552, E - 1 672, E_V - 744) ve třech sadách (Tab. 27):

- vlastní data (S) - z hodnot veličin všech čtyř příčných profilů,
- nová externí verifikační data (E_V),
- všechna data (S, E, E_V) - zvolena jako výchozí.

Pro výpočet součinitele drsnosti nejvhodnějšími empirickými rovnicemi Metodikou se používají následující veličiny: Q , B , h , A , R , i_H , i_E , v , T , d_{50} , d_{65} , d_{75} , d_{80} , d_{84} , d_{90} , d_{ef} . Pro výpočet některých z nich lze použít veličiny b , m , O , d_{16} , d_{35} .

V Tab. 27 je uveden postup výběru nejlepších způsobů **Z**, které slouží ke stanovení pořadí empirických rovnic a následnému výpočtu součinitelů drsnosti. Nejlepším způsobem **Z** nebo jejich kombinací se vypočítá doporučený součinitel drsnosti Metodikou. Pro každou sadu vstupních dat je v Tab. 27 uvedeno několik kvantilů (percentilů) relativních rozdílů Δ_r naměřených a vypočtených součinitelů drsnosti. Vypočtený součinitel drsnosti byl stanoven jako medián (med), průměrná (prům) nebo maximální (max) hodnota stanovená z prvních deseti nejvhodnějších empirických rovnic seřazených dle zvoleného způsobu **Z**. Hodnota deset byla zvolena zkušenostmi po předchozích analýzách různých kombinací. V Tab. 27 jsou preferovány větší kvantily, aby byly zachyceny výraznější relativní rozdíly Δ_r , které je žádoucí eliminovat, neboť způsobují největší chybu ve výpočtu kapacity koryta.

Pro každý kvantil bylo z celkových 18 kombinací (6 způsobů **Z** a 3 druhy statistických hodnot z prvních 10 empirických rovnic) stanovení součinitele drsnosti vybráno vždy pět nejmenších hodnot Δ_r (66), které jsou v Tab. 27 podbarveny růžově. V dolní části Tab. 27 je pro každou kombinaci způsobů **Z** uveden „počet“ růžově podbarvených hodnot. Šest nejvyšších hodnot „počtu“ je zvýrazněno tučným písmem. Následně byl stanoven „průměr“

z hodnot relativních rozdílů konkrétního způsobu **Z** a všech typů dat (např. zelený rámeček). Šest nejmenších hodnot „průměrů“ je zvýrazněno tučným písmem. Hodnota šest u „počtu“ a „průměru“ byla zvolena tak, aby ve výsledku došlo k „průniku“ dvou až čtyř kombinací. Výsledkem tohoto postupu je, že byly vybrány tři kombinace způsobů **Z**, u kterých došlo k „průniku“ (shodě) „počtu“ a „průměru“. Mezi třemi vybranými „průniky“ jsou **Z1-prům**, **Z4-max** a **Z5-prům**.

Tab. 27 Volba nejlepších způsobů stanovení součinitele drsnosti

Data	Kvantil	Relativní rozdíly Δ_r naměřených n_m a vypočtených n_v součinitelů drsnosti [%]																	
S	10 %	0,06	0,04	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06
	25 %	0,14	0,12	0,16	0,14	0,11	0,15	0,14	0,11	0,14	0,15	0,12	0,14	0,14	0,11	0,16	0,14	0,12	0,14
	50 %	0,30	0,30	0,29	0,32	0,28	0,28	0,30	0,27	0,26	0,32	0,29	0,28	0,30	0,26	0,28	0,30	0,27	0,26
	70 %	0,60	0,55	0,42	0,62	0,51	0,41	0,52	0,49	0,37	0,60	0,57	0,40	0,55	0,51	0,39	0,52	0,49	0,38
	80 %	0,81	0,73	0,57	0,95	0,76	0,50	0,71	0,65	0,45	0,83	0,75	0,49	0,76	0,68	0,48	0,74	0,65	0,46
	90 %	1,19	1,16	0,93	1,46	1,19	0,74	1,13	0,98	0,63	1,27	1,17	0,73	1,17	1,07	0,70	1,11	0,95	0,62
	95 %	1,97	1,97	1,41	2,25	1,97	1,05	1,69	1,49	0,98	2,03	1,92	1,26	1,86	1,80	0,99	1,69	1,54	0,90
E_v	10 %	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03
	25 %	0,03	0,07	0,06	0,04	0,08	0,07	0,05	0,08	0,08	0,05	0,09	0,05	0,05	0,08	0,07	0,05	0,08	0,08
	50 %	0,11	0,15	0,18	0,14	0,16	0,19	0,14	0,19	0,17	0,15	0,17	0,16	0,14	0,16	0,19	0,14	0,19	0,17
	70 %	0,26	0,29	0,32	0,33	0,27	0,36	0,30	0,33	0,28	0,34	0,28	0,29	0,33	0,27	0,35	0,30	0,33	0,28
	80 %	0,49	0,43	0,42	0,49	0,38	0,54	0,49	0,46	0,37	0,50	0,40	0,39	0,48	0,37	0,55	0,48	0,47	0,37
	90 %	0,74	0,64	0,65	0,74	0,63	0,74	0,99	0,85	0,59	0,73	0,62	0,61	0,73	0,61	0,75	0,98	0,83	0,59
	95 %	1,04	0,89	0,79	1,12	0,91	0,80	1,95	1,88	1,27	1,07	0,93	0,75	1,02	0,83	0,80	1,95	1,82	1,20
S E E_v	10 %	0,00	0,02	0,13	0,17	0,05	0,14	1,89	1,86	1,65	0,17	0,10	0,01	0,18	0,06	0,14	1,88	1,85	1,65
	25 %	0,02	0,08	0,27	0,32	0,13	0,31	2,36	2,31	2,20	0,32	0,21	0,13	0,32	0,15	0,34	2,37	2,38	2,23
	50 %	0,38	0,22	0,40	0,44	0,27	0,66	3,30	3,31	3,16	0,46	0,31	0,31	0,43	0,27	0,69	3,33	3,42	3,19
	70 %	0,69	0,48	0,56	0,69	0,50	0,75	4,03	4,09	3,88	0,66	0,48	0,56	0,69	0,49	0,76	4,15	4,24	3,93
	80 %	0,74	0,60	0,71	0,74	0,61	0,77	4,38	4,40	4,23	0,74	0,58	0,70	0,74	0,61	0,78	4,39	4,45	4,24
	90 %	0,88	0,71	0,78	0,83	0,72	0,82	5,64	5,60	5,35	0,85	0,70	0,76	0,84	0,71	0,82	5,63	5,60	5,35
	95 %	2,16	2,12	1,84	2,34	2,34	2,06	6,41	6,37	6,00	2,14	2,12	1,78	2,33	2,30	2,08	6,44	6,40	6,03
Způsob		Z1			Z2			Z3			Z4			Z5			Z6		
		med	prům	max	med	prům	max	med	prům	max	med	prům	max	med	prům	max	med	prům	max
„Počet“		6	9	4	3	9	6	2	3	8	0	5	14	2	13	7	3	3	8
„Průměr“		0,60	0,55	0,52	0,68	0,57	0,54	1,74	1,70	1,53	0,64	0,57	0,47	0,62	0,54	0,54	1,75	1,72	1,53
„Průnik“			ANO											ANO		ANO			

Správnou předpovědní schopnost vybraných způsobů **Z1-prům**, **Z4-max** a **Z5-prům** umocňuje fakt, že právě u těchto způsobů **Z** převažují růžově podbarvené hodnoty pro případ veškerých dostupných dat z měření (červený rámeček) napříč většinou kvantilů. V Tab. 27 si lze také všimnout, že způsoby **Z3-prům**, **Z3-max**, **Z6-prům** a **Z6-max** (modré rámečky) vychází velmi dobře na vlastních datech (S). To je zřejmě způsobeno tím, že jsou známy veškeré vstupní veličiny, a proto bylo využito největší množství empirických rovnic a podkategorií, což zvýšilo množství „shod“ (viz Tab. 25, část IV, výpočet P_1).

V dolní části Tab. 27 si lze u hodnot „průměrů“ všimnout, že se často vyskytují u způsobů **Z-max**. To může být způsobeno tím, že empirické rovnice (obdobně jako tabulky

součinitelů drsnosti) u nepovodňových vodních stavů většinou předpovídají menší hodnotu součinitele drsnosti, než jaká je ve skutečnosti. Proto nejsou **Z-med** a **Z-prům** tak úspěšné, jako **Z-max**.

Ve výsledné Metodice nebyl použit jen jeden nejlepší způsob - **Z4-max** - ke stanovení součinitele drsnosti n . Při kontrole výsledků vypočítaných součinitelů drsnosti n_v způsobem **Z4-max** se součiniteli drsnosti stanovenými z měření n_m bylo totiž zjištěno, že pouze volba maximální hodnoty z deseti hodnot seřazených dle způsobu Z4 způsobuje, že v některých případech je vypočtený součinitel drsnosti výrazně vyšší, než v případě ostatních způsobů Z.

Nevýhodnost použití pouze jednoho způsobu **Z4-max** je znázorněna v Tab. 28, kde byly srovnávány hodnoty $\sum \Delta_r$ [-] tří vybraných způsobů **Z** a jejich kombinací. Pro získání hodnot n_v jednotlivých kombinací způsobů **Z** byl použit průměr součinitelů drsnosti vypočtených jednotlivými způsoby **Z**. Pro přehlednost v záhlaví Tab. 28 je stanoveno, že pokud jsou hodnoty $\sum \Delta_r$ zapsány modrým písmem, pak platí, že: **Z1 = Z1-prům**, **Z4 = Z4-max** a **Z5 = Z5-prům**.

Pro zajímavost a potvrzení výše definovaného předpokladu, že empirické rovnice předpovídají menší hodnotu součinitele drsnosti, než jaká je ve skutečnosti, byly v Tab. 28 srovnány $\sum \Delta_r$ tří vybraných způsobů **Z-max** a jejich kombinací. Pokud jsou $\sum \Delta_r$ zapsány černým písmem, pak platí, že: **Z1 = Z1-max**, **Z4 = Z4-max** a **Z5 = Z5-max**.

Tři nejmenší hodnoty $\sum \Delta_r$ každého zdroje vstupních dat jsou podtrženy. Nejlépe vychází kombinace způsobů **Z1-prům** a **Z4-max**, viz červený rámeček. Automatický výpočet součinitele drsnosti je popsán v kapitole 5.2.

Tab. 28 Vhodnost různých kombinací jednotlivých způsobů **Z** pro výpočet součinitele drsnosti

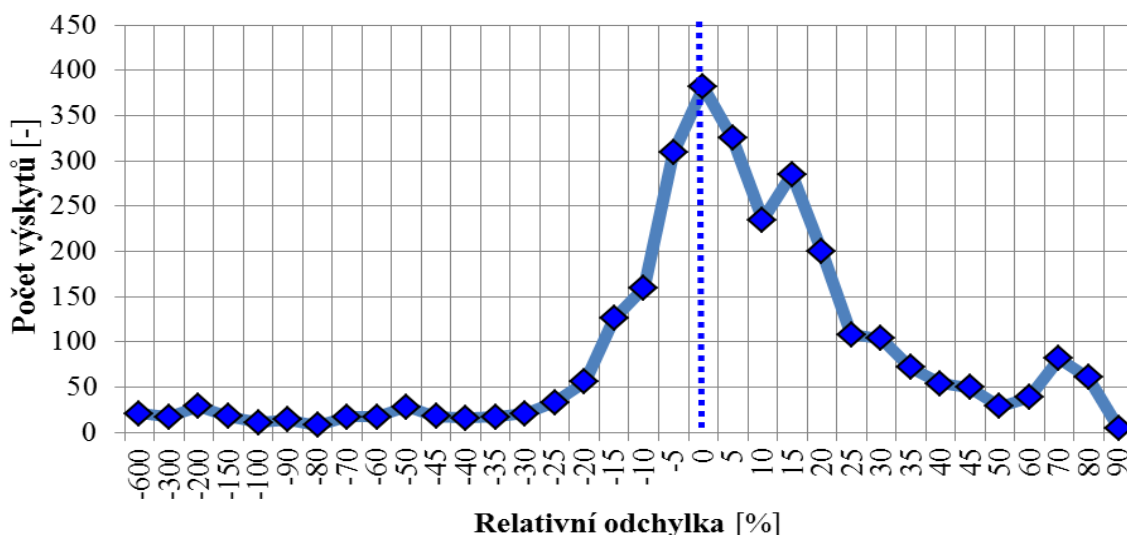
Kombinace způsobů	Z1	Z4	Z5	Z1 + Z4	Z1 + Z5	Z4 + Z5	Z1 + Z4 + Z5
S - vlastní	285	215	261	229	269	222	234
	244	215	203	225	216	204	212
S, E, E _V - všechna	1 224	1 046	1 168	1 010	1 180	1 001	1 029
	1 161	1 046	1 174	1 095	1 173	1 137	1 142
E _V - nová verifikační externí	355	376	384	344	368	357	349
	428	376	524	406	501	488	477

Doporučená hodnota Manningova součinitele drsnosti stanovená empirickými rovnicemi dle Metodiky se počítá jako průměr z:

- průměru prvních 10 (pořadí dle **Z1**) vypočítaných hodnot součinitele drsnosti a
- maxima prvních 10 (pořadí dle **Z4**) vypočítaných hodnot součinitele drsnosti.

Na Obr. 28 je znázorněno rozložení Δ_r (66) z měření stanovených a Metodikou vypočítaných součinitelů drsnosti ze všech vstupních dat (S, E, E_V). Lze si všimnout, že:

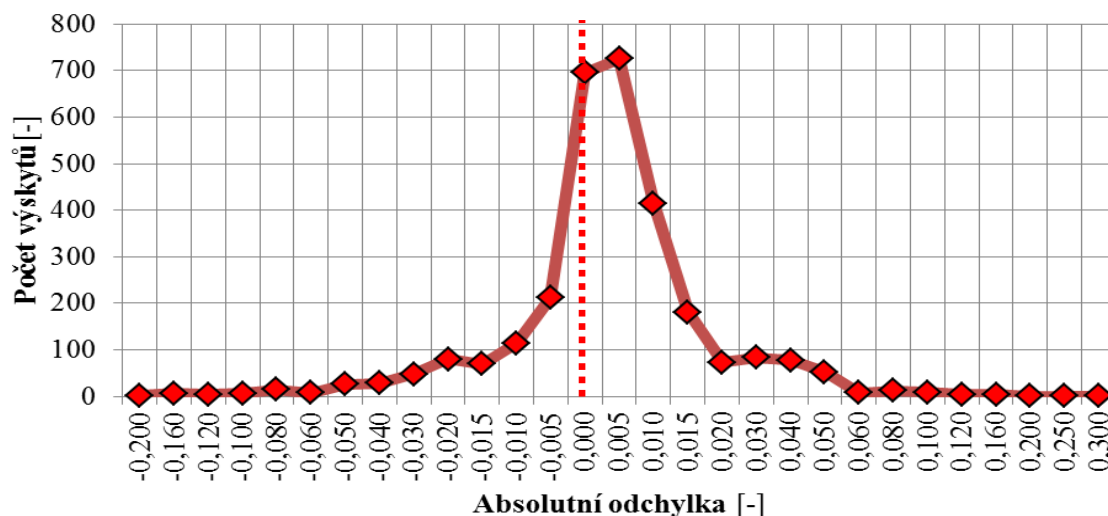
- 48 % případů má relativní rozdíly součinitele drsnosti menší než ± 10 %,
- 75 % případů má relativní rozdíly součinitele drsnosti menší než ± 25 %,
- 89 % případů má relativní rozdíly součinitele drsnosti menší než ± 50 %,
- 97 % případů má relativní rozdíly součinitele drsnosti menší než ± 100 %.



Obr. 28 Rozložení relativních rozdílů z měření stanovených a vypočítaných součinitelů drsnosti empirickými rovnicemi dle Metodiky

Na Obr. 29 je znázorněno rozložení Δ_a (67) z měření stanovených a Metodikou vypočítaných součinitelů drsnosti ze všech vstupních dat (S, E, E_V). Lze si všimnout, že:

- 73 % případů má absolutní rozdíly součinitele drsnosti menší než $\pm 0,010$,
- 87 % případů má absolutní rozdíly součinitele drsnosti menší než $\pm 0,020$,
- 95 % případů má absolutní rozdíly součinitele drsnosti menší než $\pm 0,040$,
- 99 % případů má absolutní rozdíly součinitele drsnosti menší než $\pm 0,080$.



Obr. 29 Rozložení absolutních rozdílů z měření stanovených a vypočítaných součinitelů drsnosti empirickými rovnicemi dle Metodiky

V Tab. 29 je srovnáno rozmezí hodnot součinitelů drsnosti stanovených z měření a rozmezí hodnot součinitele drsnosti stanovených empirickými rovnicemi dle Metodiky na základě parametrů jednotlivých měření v dlouhodobě sledovaných lokalitách. Lze konstatovat, že se z 27 lokalit u:

- 19 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části shodují (zelená barva),
- 5 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti jen částečně shodují (žlutá barva),
- 3 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části neshodují (červená barva).

Hodnoty součinitele drsnosti stanovené empirickými rovnicemi v Tab. 29 se pohybují od 0,026 do 0,252 (medián je 0,056) a hodnoty součinitele drsnosti stanovené měřením ve vodních tocích se pohybují od 0,017 do 0,244 (medián je 0,058).

Tab. 29 Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření a výpočtem empirickými rovnicemi dle Metodiky

Lokalita	$n_{rovnice} [-]$		$n_m [-]$	
	min	max	min	max
Bílovice n. Svitavou	0,032	0,060	0,033	0,059
Brno - Poříčí	0,040	0,061	0,039	0,067
Čeladná	0,053	0,073	0,051	0,084
Dolní Loučky	0,047	0,077	0,049	0,083
Frýdek-Místek	0,036	0,055	0,026	0,064
Jedovnice	0,035	0,142	0,034	0,107
Kozlovice	0,047	0,252	0,043	0,201
Křtiny	0,056	0,164	0,064	0,244
Lomnička	0,083	0,095	0,090	0,103
Mohelno	0,078	0,170	0,082	0,194
Morávka - VD	0,079	0,199	0,081	0,233
M. Krumlov - limnigraf	0,034	0,234	0,032	0,070
M. Krumlov - město	0,051	0,202	0,028	0,131
Ochoz u Brna	0,069	0,172	0,064	0,139
Oslavany	0,031	0,043	0,040	0,060
Palkovice	0,034	0,050	0,017	0,039
Petřvald	0,031	0,050	0,022	0,050
Raškovice	0,073	0,185	0,060	0,163
Rychmanov	0,031	0,049	0,031	0,054
Skalní Mlýn	0,081	0,213	0,064	0,196
Skryje	0,052	0,086	0,052	0,093
Šance -VD	0,060	0,136	0,063	0,154
Veverská Bítýška	0,033	0,046	0,029	0,043
Vyšní Lhoty (Morávka)	0,056	0,130	0,050	0,136
Vyšní Lhoty (Žermanický přivaděč)	0,032	0,037	0,021	0,039
Želešice	0,044	0,072	0,046	0,058
Židlochovice	0,026	0,037	0,023	0,035

4.2 STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI TABULKAMI

Jak již bylo popsáno v kapitole 3.4.2, k přednostem tabulek patří rychlost a snadnost určení součinitele drsnosti, ovšem nevýhodou je subjektivní vnímání obecného slovního popisu, velký rozsah doporučených hodnot součinitelů drsnosti některých typů povrchu nebo neuvažování proměnlivosti součinitele drsnosti v závislosti na vodním stavu. Mohlo by se zdát, že použitím tabulek více autorů a zvýšením počtu druhů povrchů by se měla přesnost odhadu zvýšit. To ale neplatí. Většina autorů sice uvádí téměř shodná rozmezí součinitelů drsnosti pro podobné typy koryt, ale občas lze nalézt tabulky s diametrálně rozdílnými hodnotami součinitele drsnosti, jak lze vidět v Tab. 30 (min = minimum, opt = optimum, max = maximum doporučovaných hodnot součinitele drsnosti konkrétního typu koryta).

Tab. 30 Ukázka rozdílnosti hodnot součinitele drsnosti stejného typu koryta v tabulkách

Autor	Popis v tabulkách	min	opt	max
(Mays, 1999)	čistě, přímé, plné koryto, bez peřejí nebo hlubokých tůní	0,025	0,030	0,033
(Yen, 1991)	koryta v rovině, plný stav, bez peřejí a hlubokých tůní	0,078	0,094	0,103

Problémem tabulek je, že se předpokládá vodní stav plné kapacity koryta toku. Popis koryta tak v mnoha případech zahrnuje dno i svahy nebo naopak jen dno. V případě nezaplňného koryta je poměr šířky dna a délky svahů jiný než u zaplňného koryta. Je-li na dně a na svazích rozdílný součinitel drsnosti, není tato skutečnost v popiscích tabulek zohledněna. Běžně se tak ve výpočtech koryta s vegetací na svazích uvažuje konstantní součinitel drsnosti pro Q_5 , Q_{20} i Q_{100} , přestože za nízkých stavů hladina keřů, stromů nebo větví nedosahuje. Zejména u menších toků (dle šířky) vegetace výrazně ovlivňuje průtočnost.

V některých tabulkách lze nalézt zvlášť součinitel drsnosti pro vegetaci. Kromě typu vegetace (tráva, plevel, podrost, buřň, křoviny, keře, stromy, atd.) se lze v popisu typu povrchu setkat i s dalšími parametry: hloubka, průměrná profilová rychlost, výška porostu, hustota a typ vegetace ve smyslu náchylnosti k ohybu proudem vody nebo způsobu obdělávání. Někdy je popis tak podrobný, že např. u obilí je k dispozici možnost výběru umístění řádků (kolmo nebo rovnoběžně se směrem proudění). Zejména v amerických publikacích se vyskytují názvy jako „Bermudská tráva“, které nejsou v ČR známe.

Velmi často se velikost koryta dělí na malé a velké, kdy velké koryto je většinou definováno jako koryto s šířkou v hladině za povodně větší než 30 m. Malá koryta mívají vyšší hodnoty součinitele drsnosti než velká koryta. Kdyby se šlo úplně do důsledků, mohla by nastat absurdní situace, kdy má koryto např. za povodně s průtokem Q_{20} šířku v hladině 31 m a patří do kategorie velkých koryt. Stejně koryto může mít např. za povodně s průtokem Q_5 šířku v hladině 29 m a patří do kategorie malých koryt, z čehož vyplývá skokové zvýšení součinitele drsnosti.

Tabulky různých autorů (Smetana, 1957), (Chow, 1959), (Boor, 1968), (Výbora, 1981), (Arcement, 1989), (Yen, 1991), (Gordon, 1992), (Havlík, 1994), (Mays, 1999), (Fisher, 2003), (Mattas, 2003), (Říha, 2005), (Jirka, 2009) a [4] byly podkladem pro vytvoření databáze (489 popisů) typů koryt s uvedením rozmezí doporučených součinitelů drsnosti. Jednotlivé popisy byly podle textu, který obsahují, přiřazeny do příslušných kategorií a druhů povrchů, které jsou uvedeny v Tab. 31, Tab. 32 a Tab. 33, kde uvedená čísla znamenají celkový počet výskytů konkrétního druhu povrchu v databázi. Přiřazování je zatíženo subjektivním pohledem, který umocňuje výskyt upřesnění v podobě přídavných jmen a příslovcí „mírný“, „téměř“, „částečný“, „občasný“, „ojedinělý“, „řídý“, „několik“, „poněkud“, „trocha“, atd. Někdy byl nalezen tak obecný popis, např. „drsné koryto“, že nebyl použit.

Protože existuje mnoho druhů povrchů, byly pro přehlednost některé spolu související nebo podobné druhy sdruženy. Zatřídění koryta podle podélného sklonu na rovinné a horské bylo převzato z TNV 75 2102. Velikostí koryta se obvykle myslí šířka v hladině za povodně. Šířka 30 m je hranicí mezi malým a velkým korytem. Protože je uváděna ve většině tabulek, byla převzata, přestože se neshoduje se šířkou v hladině dle Tab. 14. Hraniční hodnota mezi nízkým, vyšším a vysokým průtokem již s hodnotami uvedenými v Tab. 14 souhlasí.

Tab. 31 Základní charakteristiky koryta a profilů

Typ	110	přírodní / přirozené
	151	vyhloubené / kanály / příkopy
Trasa	44	přímé / rovné
	76	zakřivené / zátočiny / oblouky / klikaté
Sklon	67	rovinné / nížinné / $< 0,002$
	20	horské / bystřiny / $\geq 0,002$
Velikost	64	malé / < 30 m / potok / bystřina
	49	velké / ≥ 30 m / řeky / hlavní toky
Průtok	8	nízký / nižší stav / $< 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
	30	plné / vysoký / vyšší stav / $\geq 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Údržba	89	čisté / udržované / bez překážek
	30	znečištěné / neudržované
Podmínky	88	nepravidelné profily / pomalý proud

V Tab. 32 a Tab. 33 by se teoreticky mohly spojit i kategorie „jíl“ a „hlína“, protože tak jemné dělení rozměrů zrn již nemá téměř žádný vliv na změnu součinitele drsnosti. Rozměry jednotlivých frakcí byly převzaty z (Gordon, 1992). Není sjednoceno, zda se pro stanovení frakce materiálu používá některý kvantil křivky zrnitosti nebo procentuálně převažující frakce. Dle zkušeností této práce se doporučuje použít největší známý kvantil křivky zrnitosti, nejvýše ale d_{90} , který postihuje největší zrna a eliminuje extrémní hodnoty.

V programu MS Excel byl vytvořen přehledný systém filtrování popisů na základě zadání hodnoty „1“ do příslušné buňky tabulky, shoduje-li se druh hledaného povrchu s popisem v tabulce. Neshoduje-li se druh hledaného povrchu s popisem v tabulce, zůstává buňka tabulky prázdná. Některé tabulkové popisy vyžadují zadání průtoku Q , průměrné hloubky h , součinu $v \cdot R$ nebo výšky vegetace h_{veg} . Systém filtrování v MS Excelu vyhledá a vypíše několik popisů, které nejlépe odpovídají zadaným vlastnostem popisovaného koryta. Zároveň se změní počet výskytů konkrétního druhu povrchu v databázi. Z hodnot součinitelů drsnosti nalezených popisů se vypočte průměrná hodnota součinitele drsnosti pro min, opt a max. Nevyhledá-li se žádný popis, lze zadat hodnotu tzv. „tolerance“, což je počet druhů popisů (z celkového vybraného množství), které se mohou při vyhledávání lišit.

Tab. 32 Základní vlastnosti svahů koryta

Materiál	8	bahno / jíl / $\leq 0,004$ mm
	7	hlína / zemina / zemní / rašelina / 0,004 mm až 0,063 mm
	1	písek / 0,063 mm až 2 mm
	2	šterk / 2 mm až 32 mm
	1	kameny / 32 mm až 128 mm
	0	valouny / oblázky / 128 mm až 512 mm
	9	balvany / pohoz / zához / rovnanina / kámen na sucho / > 512 mm
	26	skála / beton
	11	kámen na maltu / kamenné zdivo
Vegetace	25	bez vegetace
	10	krátká / nízká tráva
	20	tráva / vysoká tráva / rákos
	94	plevel / zaplevelené / zarostlé / buřeň / houštiny
	9	podrost / omlazení
	32	křoviny / křoví / vrby
	12	keře
	5	stromky
	18	kmeny stromů
Překážky	5	kořeny
	4	ležící dřevo / klády / plávi
	4	sut' / nepořádek
Podmínky	13	pravidelné / čisté
	24	nepravidelné / prohlubně / hrubší / drsný

Tab. 33 Základní vlastnosti dna koryta

Materiál	26	bahno / jíl / $\leq 0,004$ mm
	94	hlína / zemní koryto / rašelina / 0,004 mm až 0,063 mm
	18	písek / 0,063 mm až 2 mm
	42	šterk / 2 mm až 32 mm
	52	kameny / 32 mm až 128 mm
	24	valouny / oblázky / 128 mm až 512 mm
	23	balvany / velké kameny / > 512 mm
	33	skála / beton
Vegetace	24	bez vegetace
	10	řasy / plovoucí rostliny / mechy
	15	tráva / rákos / podvodní / plevel / zarostlé
	2	křoviny / vrby
Podmínky	43	rovné / pravidelné / čisté
	71	nepravidelné / výmoly / tůně / mělčiny / ostrůvky / duny / vlnky
	14	peřeje / brody / prahy / vodopády / přepady
	20	sediment / splaveniny / pohyb materiálu / zanesené

Bylo provedeno srovnání hodnot součinitelů drsnosti z vlastních měření na sledovaných lokalitách n_m s hodnotami stanovenými pomocí výše uvedeného systému filtrování tabulkových popisů $n_{tab-filtr}$ v programu MS Excel. Bohužel výsledky nejsou dostačující, viz Tab. 34, kde lze konstatovat, že se z 27 lokalit u:

- 11 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části shodují (zelená barva),
- 2 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti jen částečně shodují (žlutá barva),
- 14 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části neshodují (červená barva).

V Tab. 34 bylo provedeno také srovnání hodnot součinitelů drsnosti z vlastních měření na sledovaných lokalitách n_m s hodnotami stanovenými pomocí často používaných tabulek n_{tab} autorů Havlík, Marešová (Havlík, 1994), které v podstatné části vychází z překladu tabulek (Chow, 1959). Lze konstatovat, že se z 27 lokalit u:

- 7 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části shodují (zelená barva),
- 2 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti jen částečně shodují (žlutá barva),
- 18 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části neshodují (červená barva).

Součinitelé drsnosti stanovené filtrováním tabulek v Tab. 34 se pohybují od 0,015 do 0,125 (medián je 0,049), hodnoty součinitelů drsnosti stanovené tabulkami (Havlík, 1994) se pohybují od 0,017 do 0,100 (medián optimálních hodnot je 0,043) a hodnoty součinitelů drsnosti stanovené z měření se pohybují od 0,017 do 0,244 (medián je 0,058).

Tab. 34 Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření, filtrováním více tabulek
a vybranými tabulkami

Lokalita	Popis toku dle tabulek	$n_{tab-filtr} [-]$		$n_{tab} [-]$		$n_m [-]$	
		min	max	min	max	min	max
Bílovice n. Svitavou	Přímé, zemní, štěrkové koryto s pravidelným profilem	0,035	0,050	0,022	0,033	0,033	0,059
Brno - Poříčí	Velký, nepravidelný, drsný profil	0,040	0,125	0,035	0,100	0,039	0,067
Čeladná	Malý, horský, štěrky, valouny, ojedinělé balvany, keře	0,050	0,050	0,030	0,050	0,051	0,084
Dolní Loučky	Malé, rovinné, zakřivená trasa, tůň, brody, kameny	0,047	0,049	0,045	0,060	0,049	0,083
Frýdek-Místek	Velký, pravidelný bez balvanů a keřů	0,035	0,067	0,025	0,060	0,026	0,064
Jedovnice	Přímé, zemní, štěrkové koryto s pravidelným profilem	0,048	0,050	0,022	0,033	0,034	0,107
Kozlovice	Malé, rovinné, zakřivená trasa, tůň, brody, kameny	0,015	0,070	0,045	0,060	0,043	0,201
Křtiny	Umělé, kamenná dlažba na sucho	0,048	0,050	0,023	0,035	0,064	0,244
Lomnička	Přímé, zemní, stejnozrný, tráva, málo plevel	0,048	0,048	0,022	0,033	0,090	0,103
Mohelno	Velké, nepravidelné, drsný profil	0,050	0,050	0,035	0,100	0,082	0,194
Morávka - VD	Malý, horský, valouny a balvany, keře a stromy	0,050	0,100	0,040	0,070	0,081	0,233
M. Krumlov - limnigraf	Malé, zakřivené, kameny, plevel, tůň a peřeje / brody	0,047	0,050	0,035	0,050	0,032	0,070
M. Krumlov - město	Přímé, zemní, štěrkové, pravidelný profil	0,035	0,035	0,022	0,030	0,028	0,131
Ochoz u Brna	Zemní křivočaré, kamenité dno, zaplevelené svahy	0,048	0,048	0,025	0,040	0,064	0,139
Oslavany	Malé, zakřivené, kameny, plevel, tůň a peřeje / brody	0,050	0,050	0,035	0,050	0,040	0,060
Palkovice	Umělé, kamenná dlažba na sucho	0,048	0,050	0,023	0,035	0,017	0,039
Petřvald	Malý, rovinný, bez peřejí a tůní, kameny a plevel	0,035	0,049	0,030	0,040	0,022	0,050
Raškovice	Malý, horský, valouny a balvany, keře a stromy	0,050	0,050	0,040	0,070	0,060	0,163
Rychmanov	Přímé, zemní, zarostlé travou, málo plevel	0,035	0,048	0,022	0,033	0,031	0,054
Skalní Mlýn	Malý, horský, štěrky, valouny, ojedinělé balvany, keře	0,050	0,050	0,030	0,050	0,064	0,196
Skryje	Malé, zakřivené, kameny, plevel, tůň a peřeje / brody	0,050	0,050	0,035	0,050	0,052	0,093
Šance -VD	Malý, horský, valouny a balvany, keře a stromy	0,048	0,050	0,040	0,070	0,063	0,154
Veverská Bítýška	Velký, pravidelný bez balvanů a keřů	0,045	0,050	0,025	0,060	0,029	0,043
Vyšní Lhoty (Morávka)	Velký, nepravidelný, drsný profil	0,045	0,050	0,035	0,100	0,050	0,136
Vyšní Lhoty (Žer. př.)	Štěrkové dno se stěnami z hrubého betonu	0,045	0,048	0,017	0,025	0,021	0,039
Želešice	Malé, rovinné, zakřivená trasa, čisté, nižší stav, peřeje	0,048	0,049	0,040	0,055	0,046	0,058
Židlochovice	Velký, pravidelný bez balvanů a keřů	0,035	0,035	0,025	0,060	0,023	0,035

Nepřesnosti mohou být zapříčiněny některými netypicky vysokými hodnotami součinitele drsnosti nebo zadáváním příliš specifického koryta (cca 4 až 7 informací o druhu pokryvu koryta, např. velikost koryta, typ a stav koryta, typ vegetačního porostu, materiál dna atd.) v kombinaci s použitím „tolerance“. Ve většině popisů tabulek se totiž vyskytují jen dvě až čtyři informace o druhu povrchu koryta. Z toho vyplývá, že popisy v tabulkách jsou poměrně úzce vymezené nebo naopak obecné. Lze tedy konstatovat, že tabulky jsou vhodné spíše k orientačnímu stanovení součinitele drsnosti a pro přibližnou kontrolu zvoleného návrhového součinitele drsnosti upraveného koryta. Myšlenka bližšího specifikování koryta se lépe uplatňuje v Cowanově metodě, viz kapitola 4.4.

4.3 STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI FOTOGRAFICKÝMI KATALOGY

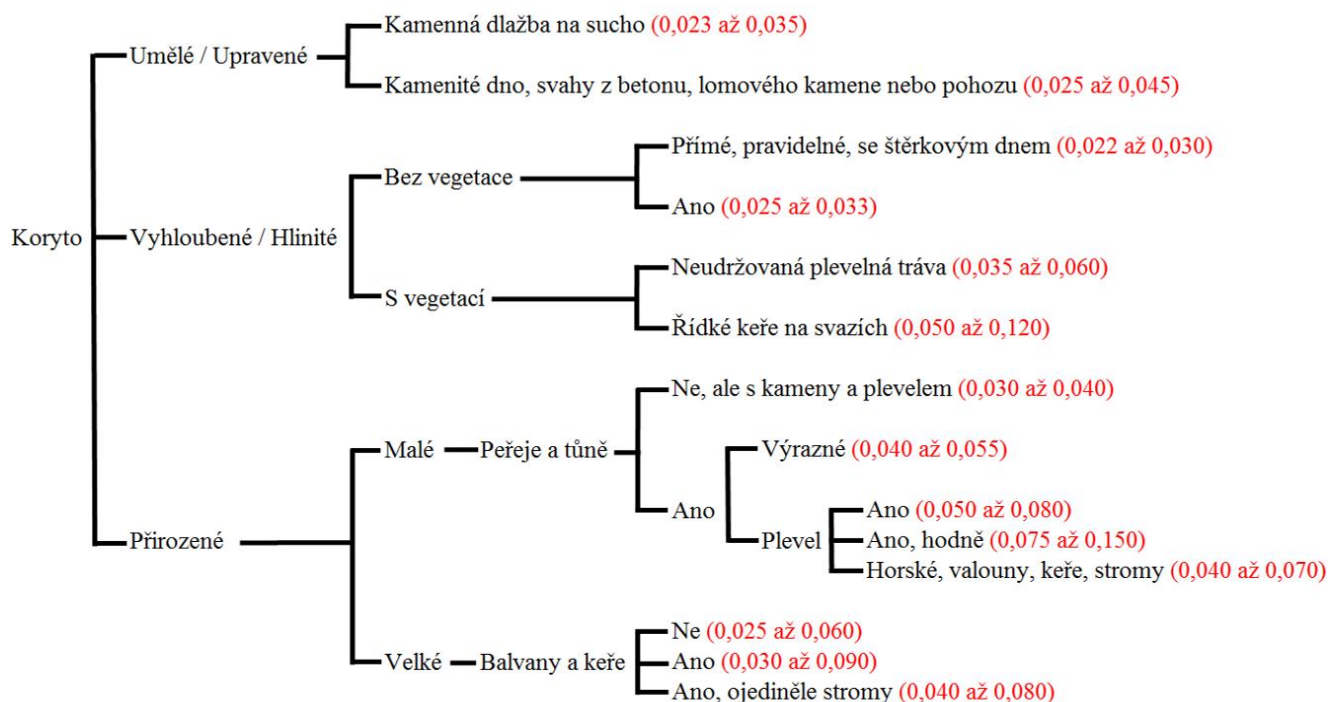
Fotografické katalogy mohou usnadnit výběr součinitele drsnosti, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4.3. K přednostem fotografických katalogů patří vysoká vypovídací hodnota, zejména pro pravidelná udržovaná koryta větších toků, která se většinou vyskytují v intravilánech obcí a měst. U ostatních typů koryt, které mohou být právě důvodem pro použití fotografického katalogu, je nepřesnost ve stanovení součinitele drsnosti obdobná jako u tabulek. Nevýhodou fotografických katalogů je, že na fotografii lze vidět povrch nad hladinou. Tato část koryta ale ve chvíli, kdy byla fotografie pořízena, neovlivňuje součinitel drsnosti. U fotografií by tak měly být uváděny informace o typu povrchu koryta, aby nemusely být odhadovány na základě aproximace viditelné části povrchu koryta. V ideálním případě by pro úplnou představu o povrchu měly být u každé fotografie ještě přiloženy detaily povrchu svahů (tráva, keře, stromy), stěn a dna (tvar a uspořádání materiálu dna) včetně měřítka (svinovací nebo skládací metr, bota, předmět známé velikosti) a zrnitostní křivky dna. Fotografie detailů dna není bohužel možné pořídit v kalné vodě. Nevýhodou takto komplexního přístupu by bylo velké množství prostoru potřebného pro obrazové vyjádření jedné hodnoty součinitele drsnosti. Nedostatkem fotografických katalogů je také absence fotografií, které by zachycovaly vývoj součinitelů drsností jednoho příčného profilu během různých vodních stavů (sucho, běžný, zvýšený, povodňový stav).

Bylo shromážděno množství fotografických katalogů a obdobně jako u tabulek byla v MS Excel vytvořena databáze fotografií, součinitelů drsností a rozměrů koryta jednotlivých měření. Na základě fotografií koryt pak byly k jednotlivým měřením přiřazovány dle Tab. 31, Tab. 32 a Tab. 33 jednotlivé druhy povrchů a koryt. Na základě takto vzniklé databáze měl být po zadání vstupních parametrů do MS Excelu pomocí filtrování vyhledán součinitel drsnosti a fotografie, která se nejvíce podobá hledanému korytu toku. U fotografických katalogů bohužel vyvstává problém s tím, že pro celé spektrum vodních stavů je uvedena buď jen jedna fotografie, nebo více fotografií bez informace, k jakému vodnímu stavu se fotografie vztahují. Proto nelze s dostatečnou jistotou stanovit, co při konkrétním vodním stavu ovlivňuje součinitel drsnosti. Pro konkrétní měření většinou nebylo známo, zda už je

součinitel drsnosti na svazích ovlivněn keři, stromy apod. Toto je první důvod, proč byla myšlenka tohoto přístupu (vyhledání nejpodobnějšího koryta pomocí filtrování databáze) opuštěna. Vzniklá databáze by se totiž zakládala na odhadech a spekulacích.

Podle fotografie lze teoreticky odvodit délku omočeného obvodu dna a svahů. Svahy by bylo možné dále dělit např. část s travní vegetací, která bývá v dolní části nebo po celé výšce svahu a část s dřevní vegetací (keře, stromy, pařezy), která se obvykle vyskytuje v horní části nebo po celé délce svahu. Rozdělení a přiřazení jednotlivých druhů povrchů jednotlivým částem omočeného obvodu by se mohlo využít pro účely ekvivalentního součinitele drsnosti. Délka jednotlivých částí omočeného obvodu by se ale opět zakládala na spekulacích.

Proudění v tocích je komplexní jev a na součinitel drsnosti tak působí mnoho faktorů (viz kapitola 3.3). Aby popisy z tabulek ve fotografických katalozích dostatečně vystihovaly celou řadu druhů povrchů a dějů v korytech toků, musel by být jejich počet vysoký. Většinou se ale lze ve fotografických katalozích, které uvádějí popisy, setkat jen s několika (cca 5 až 20) obecnými popisy, kde pro každý popis je uvedena jedna reprezentativní fotografie a rozmezí doporučených hodnot součinitele drsnosti, které většinou vychází právě z tabulkových hodnot. Pro účely grantového úkolu FRVŠ (Smelík, 2011) byl vytvořen poster se 14 vybranými popisy, ke kterým byly vždy přiřazeny příslušné tři fotografie koryt ze sledovaných lokalit. Pro přehlednost byly popisy zpracovány do rozhodovacího stromu, viz Obr. 30, který lze použít in situ. Hlinitá koryta jsou taková, kde dno je bahnité a část svahů viditelně tvoří zemní materiál. Červené hodnoty v závorkách za popisy jsou minimální a maximální doporučené hodnoty součinitele drsnosti pro daný druh povrchu koryta, které byly stanoveny dle různých popisů tabulek a fotografických katalogů.



Obr. 30 Rozhodovací strom pro volbu součinitele drsnosti

Rovněž volba jediné reprezentativní fotografie pro slovní popis není snadná, protože z malého počtu sledovaných lokalit lze obtížně vybrat fotografii, která by zcela vyhovovala slovnímu popisu, a součinitel drsnosti koryta by ve skutečnosti nebyl ovlivněn dalšími faktory, které se v popisu nevyskytují. V takovém případě by bylo možná vhodnější slovní popis doplnit kvalitní kresbou. Na Obr. 31 (lokalita Petřvald) je ukázáno koryto, u kterého není zcela jasné, do které kategorie popisů povrchů koryta jej lze na základě fotografie a výše uvedeného rozhodovacího stromu zařadit. Mohlo by se jednat o „Upravené koryto s kamenitým dnem a svahy z lomového kamene“ nebo o „Přirozené malé koryto bez peřejí a tůní, ale s kameny a plevelem“. Výše uvedené problémy se stanovením a použitím reprezentativních fotografií jsou druhým důvodem, proč fotografické katalogy nejsou vhodným nástrojem ke stanovení součinitele drsnosti.



Obr. 31 Lokalita Petřvald na řece Lubině

Tabulky a fotografické katalogy, které svými popisy vycházejí z tabulek, jsou zatíženy velkým množstvím nejistot, protože obsahují popisy, které postihují jen některé faktory ovlivňující součinitel drsnosti. V případě tabulek se doporučuje používat jedny osvědčené. Často je v tabulkách k dispozici pro typ „velké koryto“ omezené množství popisů. Obecně neobsahují fotografické katalogy a tabulky dostatek typů koryt a předpovídají nižší hodnoty součinitelů drsnosti, než jaké ve skutečnosti jsou.

V Tab. 35 je srovnáno rozmezí hodnot součinitelů drsností stanovených z měření a rozmezí hodnot součinitelů drsnosti stanovených fotografickým katalogem na základě fotografií vlastních dlouhodobě sledovaných lokalit. Lze konstatovat, že se z 27 lokalit u:

- 10 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části shodují (zelená barva),
- 6 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti jen částečně shodují (žlutá barva),
- 11 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části neshodují (červená barva).

Hodnoty součinitelů drsnosti stanovené fotografickým katalogem v Tab. 35 se pohybují od 0,022 do 0,120 (medián optimálních hodnot je 0,040), hodnoty součinitelů drsnosti stanovené měřením v tocích se pohybují od 0,017 do 0,244 (medián je 0,058).

Tab. 35 Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření a dle fotografického katalogu

Lokalita	Popis koryta toku dle fotografického katalogu	n_{foto} [-]		n_m [-]	
		min	max	min	max
Bílovice n. Svitavou	Hlinité, bez vegetace, přímé, pravidelné, šterkové dno	0,022	0,030	0,033	0,059
Brno - Poříčí	Umělé, kamenité dno, svahy z lomového kamene	0,025	0,045	0,039	0,067
Čeladná	Přirozené, malé, horské, peřeje a tůň, valouny, keře	0,040	0,070	0,051	0,084
Dolní Loučky	Přirozené, malé, bez peřeje a tůň, kameny, plevel	0,030	0,040	0,049	0,083
Frýdek-Místek	Přirozené, velké, bez balvanů a keřů	0,025	0,060	0,026	0,064
Jedovnice	Hlinité, neudržovaná plevelná tráva	0,035	0,060	0,034	0,107
Kozlovice	Přirozené, malé, s peřejemi a tůňmi, plevel	0,050	0,080	0,043	0,201
Křtiny	Umělé, kamenité dno, svahy z lomového kamene	0,025	0,045	0,064	0,244
Lomnička	Hlinité, neudržovaná plevelná tráva	0,035	0,060	0,090	0,103
Mohelno	Přirozené, velké, s balvany a keři	0,030	0,090	0,082	0,194
Morávka - VD	Přirozené, malé, horské, peřeje a tůň, valouny, keře	0,040	0,070	0,081	0,233
M. Krumlov - lim.	Přirozené, malé, bez peřeje a tůň, kameny, plevel	0,030	0,040	0,032	0,070
M. Krumlov - město	Hlinité, bez vegetace, přímé, pravidelné, šterkové dno	0,022	0,030	0,028	0,131
Ochoz u Brna	Hlinité, s vegetací, řídké keře na svazích	0,050	0,120	0,064	0,139
Oslavany	Přirozené, malé, s peřejemi a tůňmi, plevel	0,050	0,080	0,040	0,060
Palkovice	Umělé, kamenité dno, svahy z lomového kamene	0,025	0,040	0,017	0,039
Petřvald	Přirozené, malé, bez peřeje a tůň, kameny, plevel	0,030	0,040	0,022	0,050
Raškovice	Přirozené, malé, horské, peřeje a tůň, valouny, keře	0,040	0,070	0,060	0,163
Rychmanov	Hlinité, neudržovaná plevelná tráva	0,035	0,060	0,031	0,054
Skalní Mlýn	Přirozené, malé, s peřejemi a tůňmi, plevel	0,050	0,080	0,064	0,196
Skryje	Přirozené, malé, s peřejemi a tůňmi, plevel	0,050	0,080	0,052	0,093
Šance -VD	Přirozené, malé, horské, peřeje a tůň, valouny, keře	0,040	0,070	0,063	0,154
Veverská Bítýška	Přirozené, velké, bez balvanů a keřů	0,025	0,060	0,029	0,043
Vyšní Lhoty (Mor.)	Přirozené, velké, s balvany a keři	0,030	0,090	0,050	0,136
Vyšní Lhoty (Žer. př.)	Umělé, kamenité dno, svahy z lomového kamene	0,025	0,045	0,021	0,039
Želešice	Přirozené, malé, bez peřeje a tůň, kameny, plevel	0,030	0,040	0,046	0,058
Židlochovice	Přirozené, velké, bez balvanů a keřů	0,025	0,060	0,023	0,035

Problém fotografických katalogů spočívá v jejich samotné podstatě - výběru reprezentativní fotografie. Tento závěr vychází ze zkušeností s tvorbou fotografického katalogu (Smelík, 2011), prací s externími fotografickými katalogy a z porovnání vlastních naměřených dat, viz Tab. 35. Myšlenka fotografického katalogu je přínosná, ale má-li být fotografický katalog skutečně výstižný, měl by být vytvořen z velkého množství systematicky shromážděných dat z měření, u kterých jsou parametry měřeny a vyhodnoceny dle stejné metodiky. Po následném statistickém vyhodnocení by bylo provedeno rozšíření tabulek a výběr reprezentativních fotografií pro fotografické katalogy.

Tabulky a fotografické katalogy jsou vhodné pro orientační stanovení součinitele drsnosti nebo studenty a začínající projektanty. Nevýhody unifikovaného slovního popisu pak u přírodních koryt lépe řeší Cowanova metoda nebo výpočet na základě empirických rovnic.

4.4 STANOVENÍ SOUČiniteLE DRSNOSTI ROZŠÍŘENOU COWANOVOU METODOU

Cowanova metoda je dalším přístupem, jak lze stanovit součinitel drsnosti. Práce s metodou je poměrně rychlá, snadná a výsledky lze stanovit už v terénu. Na rozdíl od tabulek a fotografických katalogů zahrnuje šest parametrů, které ovlivňují hodnotu součinitele drsnosti, a proto lze lépe definovat specifika konkrétního úseku koryta toku. Popis koryta a poměrů proudění se zaměřuje u Cowanovy metody na materiál dna (hodnota n_0), nerovnosti profilu (hodnota n_1), změny příčných profilů (hodnota n_2), vliv překážek (hodnota n_3), vliv vegetace (hodnota n_4) a meandrovitost koryta (hodnota m_5).

Minimální hodnota součinitele drsnosti, kterou lze vypočítat Cowanovou metodou, je 0,020 a maximální hodnota může být teoreticky 0,345. Nevýhodou tohoto přístupu je nevyhovující přesnost při stanovení součinitele drsnosti pro hladké nebo naopak velmi drsné povrchy. Cowanova metoda totiž uvažuje pro jemný materiál poměrně vysokou hodnotu dílčího součinitele drsnosti - 0,020. Největší zrno, které lze zvolit, je štěrk, a proto pro toky s výrazně hrubozrnným materiálem není Cowanova metoda vhodná. Hodnoty součinitelů drsnosti stanovené Cowanovou metodou n_{Cowan} v Tab. 36 se pohybují od 0,033 do 0,098 (medián je 0,048) a hodnoty součinitelů drsnosti stanovené z měření ve vodních tocích se pohybují od 0,017 do 0,244 (medián je 0,058).

4.4.1 ROZŠÍŘENÁ COWANOVA METODA

Originální Cowanova metoda má některé nedostatky. Tato práce některé části Cowanovy metody upravuje a některé doplňuje. V dalším textu bude tato upravená verze nazývána Rozšířenou Cowanovou metodou a označována Cowan+. Upravená verze, tedy Cowan+, je obsahem Přílohy 8 (světle červeným podbarvením jsou vyznačeny změny vzhledem k přeloženému originálu) a liší se v následujících prvcích:

- doplnění vyšších frakcí materiálu dna a přiřazení součinitelů drsností ve všech frakcích na základě rozboru vlastních měření,
- stanovení velikosti zrna jako d_{90} a není-li k dispozici, tak jako největší dostupný kvantil křivky zrnitosti,
- plynulé stanovení hodnoty n_0 dle velikosti zrna materiálu dna od frakce kámen,
- zkrácení popisného textu a rozšíření textu o další typy povrchu,
- doplnění popisného textu o grafická schémata,
- upozornění, že se uvažuje pouze vegetace skutečně zasažená prouděním vody,
- rozšíření Cowanovy metody o koeficient m_6 (74) - zohledňuje vodní stav (hloubku).

K největším změnám došlo u koeficientu n_0 . Hodnoty součinitele drsnosti byly mírně posunuty směrem k menším frakcím a také výrazněji posunuty k větším frakcím. Nově je vytvořen koeficient m_6 (74), který může nabývat hodnot od 1,0 do 2,0. Jeho funkcí je postihnout vliv vodního stavu na součinitel drsnosti pomocí několika parametrů. Výsledná rovnice pro výpočet součinitele drsnosti metodou Cowan+ je

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \cdot m_6. \quad (71)$$

Stanovení koeficientu m_6 je složitější než stanovení ostatních koeficientů a nelze již předpokládat, že by se metoda Cowan+ mohla bez automatizovaného výpočtu (notebook, tablet) ihned použít v terénu.

Níže uvedené podmínky byly stanoveny tak, že se hledaly parametry, jejich kombinace a hodnoty, které souvisí s největšími Δ_r (66) z měření stanovených a Cowanovou metodou vypočítaných součinitelů drsnosti, a které bylo cílem zlepšit. Pro nalezené parametry se následně stanovovaly koeficienty (MAX_i , MIN_i), které umožní po přepočtu na jednotlivé faktory a po výpočtu výsledného dílčího součinitele drsnosti m_6 zpřesnit stanovení výsledného součinitele drsnosti Rozšířenou Cowanovou metodou.

Výpočet koeficientu m_6 lze rozdělit do 4 kroků:

- stanovení, zda je splněna alespoň 1 ze 2 podmínek:
 - o podmínka 1 (většinou pro horské a podhorské toky): $\frac{B}{R} \geq 40$; $\frac{R}{d_{90}} \leq 0,55$,
 - o podmínka 2 (většinou pro střední a nížinné toky): $\frac{B}{Q} \geq 11$; $i_H \geq 0,0065$,
- výpočet vlivu 4 faktorů podle rovnice

$$f_i = 1 - \frac{MAX_i - F_i}{MAX_i - MIN_i}, \quad (72)$$

kde pro:

- faktor $f_1: F_1 = \frac{B}{R}$; $MIN_1 = 60$; $MAX_1 = 300$,
- faktor $f_2: F_2 = \frac{R}{d_{90}}$; $MIN_2 = 0$; $MAX_2 = 0,35$,
- faktor $f_3: F_3 = \frac{B}{Q}$; $MIN_3 = 5$; $MAX_3 = 100$,
- faktor $f_4: F_4 = i_H$; $MIN_4 = 2$; $MAX_4 = 9$,

- stanovení průměrného vlivu 4 faktorů

$$\bar{f} = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4}{4}, \quad (73)$$

- stanovení m_6 dle rovnice

$$m_6 = 1 + \bar{f}. \quad (74)$$

Zavedením koeficientu m_6 se výsledný součinitel drsnosti n_{Cowan+} zlepšil vzhledem k n_{Cowan} u 38 případů a zhoršil jen u 3 případů. Celkem byl řešen m_6 u 41 případů vlastních měřených dat, kde byla splněna podmínka 1, podmínka 2 nebo podmínka $|n_{Cowan} - n_m| \geq 0,025$ (velké rozdíly). Hodnoty mezi podmínky 1, podmínky 2, MIN_i a MAX_i vzešly z kalibrace. Hodnoty mezi byly stanoveny z malého počtu vstupních dat, a proto by bylo vhodné je zpřesnit a verifikovat na větším množství dat. Obdobně by bylo vhodné zpřesnit koeficient n_0 . Metodou Cowan+ lze vypočítat součinitel drsnosti v rozmezí od 0,016 až teoreticky po 0,767. Teoreticky by bylo možné v případě vegetace na svazích a u materiálu dna stanovit, jaká procentuální část omočeného obvodu jim přísluší a zohlednit tento poměr při výběru koeficientů. Tento předpoklad by se ale musel ověřit na základě dostatečného množství vstupních dat se známým účinkem vegetace.

V Tab. 36 je srovnáno rozmezí hodnot součinitelů drsnosti stanovených z měření n_m , rozmezí hodnot součinitele drsnosti stanovených Cowanovou metodou n_{Cowan} a rozmezí hodnot součinitele drsnosti stanovených Rozšířenou Cowanovou metodou n_{Cowan+} na základě fotografií vlastních dlouhodobě sledovaných lokalit.

Lze konstatovat, že v případě n_{Cowan} se z 27 lokalit u:

- 21 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části shodují (zelená barva),
- 0 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti jen částečně shodují (žlutá barva),
- 6 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části neshodují (červená barva).

Lze konstatovat, že v případě n_{Cowan+} se z 27 lokalit u:

- 20 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části shodují (zelená barva),
- 5 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti jen částečně shodují (žlutá barva),
- 2 lokalit rozmezí součinitelů drsnosti zcela či z větší části neshodují (červená barva).

Tab. 36 Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření, Cowanovou metodou a Rozšířenou Cowanovou metodou

Lokalita	n_{Cowan} [-]		n_{Cowan+} [-]		n_m [-]	
	min	max	min	max	min	max
Bílovice nad Svitavou	0,043	0,048	0,049	0,054	0,033	0,059
Brno - Poříčí	0,036	0,066	0,050	0,080	0,039	0,067
Čeladná	0,057	0,057	0,067	0,096	0,051	0,084
Dolní Loučky	0,043	0,063	0,049	0,069	0,049	0,083
Frýdek-Místek	0,036	0,061	0,049	0,066	0,026	0,064
Jedovnice	0,038	0,063	0,033	0,097	0,034	0,107
Kozlovice	0,056	0,086	0,070	0,151	0,043	0,201
Křtiny	0,053	0,063	0,059	0,121	0,064	0,244
Lomnička	0,048	0,073	0,064	0,088	0,090	0,103
Mohelno	0,057	0,082	0,074	0,099	0,082	0,194
Morávka - VD	0,080	0,115	0,098	0,178	0,081	0,233
M. Krumlov - limnigraf	0,043	0,068	0,046	0,071	0,032	0,070
M. Krumlov - město	0,042	0,062	0,054	0,080	0,028	0,131
Ochoz u Brna	0,063	0,088	0,062	0,088	0,064	0,139
Oslavany	0,043	0,053	0,037	0,047	0,040	0,060
Palkovice	0,033	0,058	0,034	0,044	0,017	0,039
Petřvald	0,033	0,048	0,033	0,048	0,022	0,050
Raškovice	0,072	0,097	0,099	0,159	0,060	0,163
Rychmanov	0,038	0,058	0,031	0,041	0,031	0,054
Skalní Mlýn	0,054	0,069	0,068	0,136	0,064	0,196
Skryje	0,048	0,063	0,064	0,079	0,052	0,093
Šance -VD	0,079	0,094	0,096	0,128	0,063	0,154
Veverská Bítýška	0,038	0,048	0,041	0,051	0,029	0,043
Vyšní Lhoty (Morávka)	0,053	0,108	0,069	0,159	0,050	0,136
Vyšní Lhoty (Žer. př.)	0,028	0,043	0,032	0,047	0,021	0,039
Želešice	0,038	0,043	0,039	0,044	0,046	0,058
Židlochovice	0,033	0,038	0,028	0,033	0,023	0,035

Hodnoty součinitelů drsnosti stanovené Cowanovou metodou v Tab. 36 se pohybují od 0,028 do 0,115 (medián je 0,053), hodnoty součinitelů drsnosti stanovené Rozšířenou Cowanovou metodou v Tab. 36 se pohybují od 0,028 do 0,178 (medián je 0,063) a hodnoty součinitele drsnosti stanovené měřením ve vodních tocích se pohybují od 0,017 do 0,244 (medián je 0,058).

Porovnáním výsledků Cowanovy a Rozšířené Cowanovy metody v Tab. 36 se může na první pohled zdát, že původní Cowanova metoda je lepší. Ovšem, srovnají-li se okrajové hodnoty (min, max), vychází mnohem lépe Rozšířená Cowanova metoda. Rovněž porovnáním výsledků Rozšířené Cowanovy metody v Tab. 36 a výsledků výpočtu empirickými rovnicemi podle Metodiky v Tab. 29 se může zdát, že Rozšířená Cowanova metoda je lepší. Srovnají-li se v Tab. 38 okrajové hodnoty - extrémy (min, max) vypočtených a z měření stanovených součinitelů drsností, vychází lépe empirické rovnice dle Metodiky.

5. VÝSLEDKY

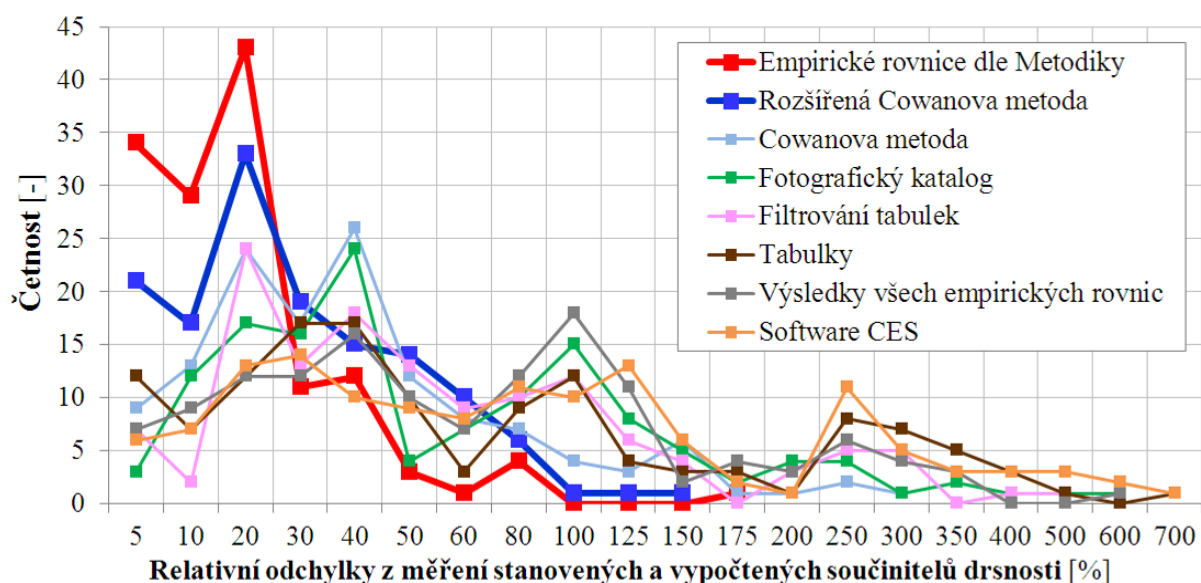
Metodika stanovení hodnoty Manningova součinitele drsnosti otevřených koryt se **zabývá** stanovením **doporučené hodnoty součinitele drsnosti** zejména na základě znalosti zrnitosti materiálu dna, rozměrových parametrů koryta a vodního stavu. Metodiku stanovení doporučené hodnoty součinitele drsnosti tvoří čtyři přístupy: empirické rovnice dle Metodiky, Rozšířená Cowanova metoda, fotografický katalog a filtrování tabulek. Kromě zmíněných přístupů bylo během výzkumu použito ještě několik dalších, které ale nedosahovaly takové kvality, aby je bylo možné doporučit pro používání v praxi.

Doplňkově je v Metodice zahrnut výpočet součinitele drsnosti vegetace (tráva, stromy) a pro upřesnění a komplexnost ještě výpočet stability dna (splaveninový režim) a součinitele drsnosti dnových útvarů (duny).

Všechny použité přístupy jsou seřazeny dle jejich kvality, tedy Δ_r (66) zleva doprava v Tab. 37. Pro srovnání byla použita analýza na vlastních datech (138 měření). Bližší informace o přístupu pomocí histogramu jsou uvedeny v kapitole 5.2, o softwaru CES v kapitole 5.1.3. Nejlépe vychází přístupy **A** a **D**. Značení (A, B, C, D, E) vychází z Obr. 21.

Tab. 37 Srovnání kvality zkoumaných přístupů pro stanovení součinitele drsnosti

Přístup	A	D*	D	C	B*	B	A*	E
	Empirické rovnice	Rozšířená Cowanova metoda	Cowanova metoda	Fotografický katalog	Filtrování tabulek	Tabulky	Histogram	Software CES
Medián Δ_r [-]	0,11	0,19	0,31	0,39	0,41	0,42	0,54	0,64
Průměr Δ_r [-]	0,16	0,26	0,42	0,73	0,74	0,92	0,81	1,10



Obr. 32 Srovnání průběhu intervalů relativních rozdílů součinitelů drsnosti stanovených z měření v tocích a vypočtených jednotlivými přístupy

Na Obr. 32 jsou znázorněny intervaly Δ_r součinitelů drsnosti stanovených z měření a vypočtených jednotlivými přístupy. Četnosti jsou vyjádřeny pro maximální hodnotu intervalu. Např. u „Empirických rovnic dle Metodiky“ se nejčastěji (43 z 138 měření) vyskytuje Δ_r mezi 10 % a 20 %. Čím víc se vyšší četnosti přibližují malým Δ_r , tj. doleva, tím je stanovení doporučeného součinitele drsnosti přesnější. Lze vidět přínosy empirických rovnic dle Metodiky a Rozšířené Cowanovy metody, které výrazně předčí ostatní přístupy.

V Tab. 38 je srovnáno rozmezí hodnot součinitelů drsností stanovených z měření n_m , empirickými rovnicemi dle Metodiky $n_{rovnice}$, Rozšířenou Cowanovou metodou n_{Cowan+} a z průměru předchozích dvou přístupů $n_{rovnice+Cowan+}$. V tabulce jsou zeleně podbarveny rozmezí součinitelů drsnosti, které se zcela či z větší části shodují, žlutě jsou podbarveny hodnoty, které se částečně shodují a červeně jsou podbarveny hodnoty, které se zcela nebo z větší části neshodují s rozmezím hodnot součinitelů drsnosti stanovených z měření.

Tab. 38 Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření a různými přístupy

Lokalita	$n_{rovnice}$ [-]		n_{Cowan+} [-]		$n_{rovnice+Cowan+}$ [-]		n_m [-]	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Bílovice nad Svitavou	0,032	0,060	0,049	0,054	0,043	0,055	0,033	0,059
Brno - Poříčí	0,040	0,061	0,050	0,080	0,049	0,070	0,039	0,067
Čeladná	0,053	0,073	0,067	0,096	0,062	0,074	0,051	0,084
Dolní Loučky	0,047	0,077	0,049	0,069	0,048	0,073	0,049	0,083
Frýdek-Místek	0,036	0,055	0,049	0,066	0,043	0,059	0,026	0,064
Jedovnice	0,035	0,142	0,033	0,097	0,034	0,119	0,034	0,107
Kozlovice	0,047	0,252	0,070	0,151	0,067	0,202	0,043	0,201
Křtiny	0,056	0,164	0,059	0,121	0,057	0,142	0,064	0,244
Lomnička	0,083	0,095	0,064	0,088	0,076	0,085	0,090	0,103
Mohelno	0,078	0,170	0,074	0,099	0,077	0,135	0,082	0,194
Morávka - VD	0,079	0,199	0,098	0,178	0,088	0,187	0,081	0,233
M. Krumlov - limnigraf	0,034	0,234	0,046	0,071	0,040	0,151	0,032	0,070
M. Krumlov - město	0,051	0,202	0,054	0,080	0,052	0,141	0,028	0,131
Ochoz u Brna	0,069	0,172	0,062	0,088	0,065	0,130	0,064	0,139
Oslavany	0,031	0,043	0,037	0,047	0,034	0,044	0,040	0,060
Palkovice	0,034	0,050	0,034	0,044	0,036	0,042	0,017	0,039
Petřvald	0,031	0,050	0,033	0,048	0,034	0,044	0,022	0,050
Raškovice	0,073	0,185	0,099	0,159	0,093	0,172	0,060	0,163
Rychmanov	0,031	0,049	0,031	0,041	0,031	0,045	0,031	0,054
Skalní Mlýn	0,081	0,213	0,068	0,136	0,074	0,164	0,064	0,196
Skryje	0,052	0,086	0,064	0,079	0,058	0,080	0,052	0,093
Šance -VD	0,060	0,136	0,096	0,128	0,094	0,132	0,063	0,154
Veverská Bítýška	0,033	0,046	0,041	0,051	0,037	0,048	0,029	0,043
Vyšní Lhoty (Morávka)	0,056	0,130	0,069	0,159	0,062	0,144	0,050	0,136
Vyšní Lhoty (Žer. př.)	0,032	0,037	0,032	0,047	0,035	0,041	0,021	0,039
Želešice	0,044	0,072	0,039	0,044	0,044	0,055	0,046	0,058
Židlochovice	0,026	0,037	0,028	0,033	0,027	0,033	0,023	0,035

Lze konstatovat, že průměrováním výsledků těchto dvou přístupů se sníží riziko nesprávného stanovení součinitele drsnosti, a proto lze tento postup použít jako kontrolní. Empirické rovnice odstraňují nedostatky Rozšířené Cowanovy metody a Rozšířená Cowanova metoda zahrnuje větší množství faktorů ovlivňujících součinitel drsnosti.

5.1 DÍLČÍ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

5.1.1 OBECNÉ

Veškeré provedené výpočty jsou závislé na vstupních datech, která jsou ale zatížena většími či menšími nejistotami. Nejistoty ve stanovení skutečných hodnot veličin se vyskytují při stanovení průtoku, rozměrů koryta (zaměření), úrovní hladin (nivelace) a zrnitosti materiálu dna. I kdyby všechna měření byla naprosto přesná, tak se nejistoty projeví při schematizaci koryta. Předpokládají se totiž neměnné rozměry a tvar příčných profilů během celého sledovaného období. Přestože bylo měření většinou prováděno na přírodních nebo upravených korytech, u kterých se předpokládá nerovnoměrné proudění, stále je při vyhodnocování proudění tendence předpokládat proudění blízké rovnoměrnému. Ve vybraných úsecích vodních toků se ale nachází lokální diskontinuity (peřeje, tůňe, atd.), které ovlivňují proudění a jsou-li příčné profily vedeny těmito místy, výrazně ovlivňují vstupní údaje pro následné výpočty úsekového součinitele drsnosti. V případě pochybností o správnosti vstupních údajů se rovněž nelze spolehnout na závislost (většinou exponenciální nebo logaritmickou) vstupních parametrů, např. $Q-h$, $Q-n$, $h-n$, $R-n$, i_D-d_x apod. Další zjednodušení se projevují při stanovení hodnoty součinitele drsnosti. Výslednou hodnotu součinitele drsnosti ovlivňuje velké množství faktorů. Intenzita jejich vlivu se mění s vodním stavem, ročním obdobím nebo teplotou vody. Pro výpočet se ale uvažuje jen zlomek z těchto faktorů bez zohlednění jejich vlivu v čase, protože komplexní přírodní děje jsou zjednodušovány a schematizovány. Použitím dvou nejlepších přístupů (empirické rovnice dle Metodiky, Rozšířená Cowanova metoda) se riziko nesprávného stanovení n výrazně sníží.

Dle získaných zkušeností vyplývá, že stanovit součinitel drsnosti přesně není možné. Proto není potřeba hodnotu součinitele drsnosti udávat na více než dvě (hrubozrná, horská nebo neudržovaná koryta toků) až tři (jemnozrná, upravená, udržovaná koryta středních a dolních toků) desetinná místa. U přírodních koryt lze pro orientační výpočet doporučit zaokrouhlování součinitelů drsnosti na nejbližších pět tisícin (0,005), tj. v případě stanovení hodnoty součinitele drsnosti jako $n = 0,033$ zaokrouhlit na $n = 0,035$ apod. Uvedené doporučení neplatí pro kalibraci modelu na základě zaměřených hladin kulminací povodňových průtoků. Větší přesnost hodnoty součinitele drsnosti nevypovídá nic o preciznosti jeho stanovení, ale naopak vypovídá o neznalosti faktorů ovlivňujících součinitel drsnosti, nejistot vstupních parametrů a metod stanovení součinitele drsnosti.

Na Obr. 19 a Obr. 20 lze pozorovat závislost Manningova součinitele drsnosti n na průtoku Q pro jednotlivé lokality. Převažuje trend, kdy se součinitel drsnosti zmenšuje se

zvětšujícím se průtokem (vodním stavem), případně se součinitel drsnosti s průtokem téměř nemění a osciluje kolem jedné hodnoty (Frýdek-Místek, Palkovice, Petřvald, Vyšní Lhoty (Žermanický přivaděč)). Předpoklad snížení součinitele drsnosti při nárůstu průtoku potvrzují i externí katalogy drsnosti. Např. v Tab. 38 si lze také všimnout, že v jedné lokalitě může být značný rozdíl mezi minimálním a maximálním součinitelem drsnosti stanoveným z měření.

Na základě měření ve sledovaných lokalitách vodních toků byly stanoveny hodnoty úsekových (mezi čtyřmi příčnými profily) součinitelů drsnosti. Kromě toho se stanovovaly i profilové (mezi dvěma příčnými profily) součinitele drsnosti. Pro danou lokalitu by se pak spočítala průměrná hodnota úsekového součinitele drsnosti ze čtyř profilových součinitelů drsnosti. Výhodou tohoto řešení by bylo, že by se nehledal součinitel drsnosti charakteristický pro danou lokalitu a měření pomocí MNČ, která může v některých případech, které jsou popsány v kapitole 4.1.5, určit součinitel drsnosti nesprávně. Zároveň by bylo možné postihnout i lokální vlivy na součinitel drsnosti. To, co se jeví jako výhoda, může být v některých případech i nevýhoda (jedna velmi rozdílná hodnota součinitele drsnosti ze čtyř nebo nesprávně zaměřená hladina). Výsledný součinitel drsnosti stanovený ze čtyř příčných profilů může být takto hlavně u balvanitých toků a za malých vodních stavů snadno ovlivněn. Použitý úsekový součinitel drsnosti je tedy charakteristickým reprezentativním součinitelem drsnosti pro úsek, ale není to skutečná hodnota součinitele drsnosti jednotlivých profilů.

5.1.2 EMPIRICKÉ ROVNICE

Přestože diagram na Obr. 21 ukazuje průběh stanovení součinitele drsnosti, je vhodné si připomenout postup výběru nejvhodnějších empirických rovnic. Nejprve se u každé rovnice stanoví relativní rozdíly z měření stanovených a vypočtených součinitelů drsnosti pro každou z 27 podkategorií zvlášť u vlastních (S), externích (E) a všech (V) měření. Na základě x -té nejmenší hodnoty mediánů a výběrových směrodatných odchylek se dle výběrových podmínek vyhledá v každé podkategorii alespoň 30 nejvhodnějších rovnic. Následně se podle několika způsobů stanovuje pořadí kvality vyhledaných rovnic, které mají zastoupení alespoň u 2 z 27 podkategorií. V poslední fázi se hledá takový způsob nebo kombinace způsobů, pomocí kterých lze nejspolehlivěji stanovit Manningův součinitel drsnosti.

Lze konstatovat, že ve značení různých vyjádření drsnosti (k , k_s , k_{st}) a veličin (např. d), občas panuje nejednota a lze se tak setkat s případy, kdy jsou jednotlivé typy vyjádření drsnosti používány v rozporu s původním významem, což dále zvětšuje nejistotu při výpočtu součinitele drsnosti empirickými rovnicemi.

Během fáze vybírání nejvhodnějších rovnic (kapitola 4.1.6) mohlo dojít k situaci, že některá empirická rovnice byla odstraněna, protože nebyla vybrána jako jedna z nevhodnějších 30 alespoň ve dvou podkategoriích. Tato situace nemusela být způsobena špatnou kvalitou rovnice, ale nesplněním podmínky, kterou rovnice obsahovala. Podmínka mohla být formulována tak, že se nenašlo žádné nebo jen velmi málo měření, u kterých by vstupní data podmínku splňovaly. Kvalitu rovnice proto nebylo možné ověřit. Pro porovnání

byl proveden paralelní výpočet, ve kterém nebyly podmínky uvažovány. Takto se zjistilo, že některé empirické rovnice (BAT2b, BAT7, MAT5, MAT7) dávají velmi kvalitní výsledky. U těchto čtyř empirických rovnic se v zájmu kvality výpočtu přistoupilo k nepoužití podmínek, které mohly být špatně opsány nebo nepochopeny. Dalším důvodem, proč nebyla některá empirická rovnice použita, mohla být skutečnost, že výsledky rovnic představovaly chybové hodnoty nebo hodnoty mimo stanovenou mez $0,015 \leq n_v \leq 0,300$, viz kapitola 4.1.6.

Skutečnost, že v Tab. 27 vycházejí průměry relativních rozdílů velmi dobře u maxim jednotlivých způsobů **Z**, vyplývá ze skutečnosti, že většina empirických rovnic výsledky součinitelů drsností podhodnocuje. To znamená, že ve skutečnosti je součinitel drsnosti vyšší, což ukazují i grafy relativních rozdílů na Obr. 28 a absolutních rozdílů Obr. 29 (kladné hodnoty udávají, že naměřená hodnota je větší než vypočtená; záporné hodnoty udávají, že naměřená hodnota je menší než vypočtená). Z této skutečnosti ale mylně vyplývá, že průměry maxim relativních rozdílů jsou správným způsobem ke stanovení součinitele drsnosti.

Při vyhodnocení Tab. 26 si lze všimnout, že mezi 4 nejčtenějšími nejvhodnějšími typovými rovnicemi jsou A1, C1, C2 a D3. Mezi 4 nejčtenějšími nedoporučenými typovými rovnicemi jsou A1, A4, C1 a D3. Jak si lze všimnout, až na rovnici C2 se nevhodnější typové rovnice vyskytují i mezi nedoporučenými. V případě typové rovnice A1, tj. rovnice (47) nebo (48), může být tento stav způsoben celkovou jednoduchostí rovnice, kdy součinitel drsnosti závisí pouze na velikosti zrna materiálu dna. Také zde může sehrát vliv náhodnost, kdy se z velkého množství rovnic (A1 je nejčtenější) některé umístí v některých podkategoriích mezi nejvhodnějšími. Vliv náhodnosti lze předpokládat i v případě typové rovnice D3, tj. rovnice (61). Stav, kdy se rovnice umístí mezi nevhodnějšími i nedoporučenými se týká také rovnice C1, tj. rovnice (55). Při vyjádření součinitele drsnosti z rovnice (4), dosazení C1 za parametr rychlosti v a předpokladu $i_E = i_H$ má výsledná rovnice tvar

$$n = \frac{i_H^{\frac{1}{2}} \cdot R^{\frac{2}{3}}}{c_1 \cdot i_H^{c_2} \cdot R^{c_3}}. \quad (76)$$

Nejedná se tedy o novou závislost součinitele drsnosti na vstupních parametrech, ale o komplikovanější vyjádření rovnice A3, tj. rovnice (50). Tomuto předpokladu odpovídá obdobná $\sum \Delta_a$ (suma absolutních rozdílů z měření stanovených a vypočtených součinitelů drsnosti) u A3 a C1 v Tab. 39. Až překvapivě dobré výsledky dává rovnice C2, viz Tab. 39. Typová rovnice C2, tj. rovnice (56), je v podstatě Chézyho rovnice, která se liší jen v exponentech, které jsou většinou blízké hodnotám exponentů používaných v Chézyho rovnici. Dobrá předpověď součinitele drsnosti vychází ze skutečnosti, že Chézyho rovnicí zakomponovanou v Metodě po úsecích (nerovnoměrné proudění) byly na základě vstupních parametrů stanoveny součinitelé drsnosti z měření. Stejně vstupní parametry (v , R , i_H) pak sloužily ke stanovení součinitele drsnosti typovou rovnicí C2, což je v podstatě Chézyho rovnice (rovnoměrné proudění) s jinými exponenty. Rovnice C2 sice dává velmi dobré

výsledky, ale v praxi nelze předpokládat znalost rychlosti v (stanovuje se až po odhadu součinitele drsnosti).

V Tab. 39 jsou srovnány sumy absolutních rozdílů

$$\sum \Delta_a = \sum |n_{m,i} - n_{v,i}| \quad (76)$$

pro typové rovnice, pro které před tím proběhl výpočet pomocí řešitele v MS Excelu, kde byly měněny konstanty c_1, c_2, c_3, c_4 pro nalezení minimální hodnoty $\sum \Delta_a$ konkrétní typové rovnice. Tato „kalibrace“ proběhla na základě součinitelů drsností stanovených z vlastních měření. Pro kompaktní velikost tabulky byly zvoleny pouze kvantily d_{90} , pro které vycházejí nejmenší $\sum \Delta_a$ v porovnání s ostatními kvantily křivky zrnitosti materiálu dna. Tato „kalibrace“ proběhla na malém počtu dat (138), a proto ji lze považovat pouze za orientační a informativní. V Tab. 39 lze podle sumy absolutních hodnot odchylek konstatovat, že nejlépe vychází typová rovnice C2 (červeně), která sice dává extrémně dobré výsledky, ale pro kterou zřejmě nebudou při praktickém použití známa všechna vstupní data, viz výše.

Tab. 39 Porovnání součtů absolutních rozdílů typových rovnic po kalibraci koeficientů

	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
c_1 [-]	11,77	0,42	0,41	0,13	8,81	3 045	10,31	1,86	0,50	5,76	2,11	0,60	0,03	0,60	16,77
c_2 [-]	-	0,35	0,35	1,34	0,60	0,67	14,63	0,06	0,58	0,47	4,68	0,00	3E+20	0,00	8,00
c_3 [-]	-	-	0,00	1,90	-	-	-	0,85	-	0,39	1,79	-	-	-	1,00
c_4 [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,05	-	-	-	-	-
$\sum \Delta_a$ [-]	4,7	4,3	4,3	3,8	3,8	10,3	3,8	4,2	1,6	3,8	3,8	5,4	5,5	5,4	8,4

Pro typové rovnice A1 a A2, které obsahují jen 1 parametr, byla ještě provedena „kalibrace“ pro podkategorie kategorií d_{50} , d_{84} a i_H . Dělicí kritéria pro jednotlivé podkategorie jsou uvedena v Tab. 14. Výsledné hodnoty $\sum \Delta_a$ s uvedením počtu vstupních dat („počet“), ze kterých byla „kalibrace“ koeficientů c_1 a c_2 provedena, jsou v Tab. 40. Lze si všimnout, že použitím „kalibrace“ v jednotlivých podkategoriích se hodnoty $\sum \Delta_a$ sníží cca na polovinu.

Tab. 40 Porovnání součtů absolutních rozdílů typových rovnic A1 a A2 po kalibraci koeficientů c_1 a c_2 v podkategoriích

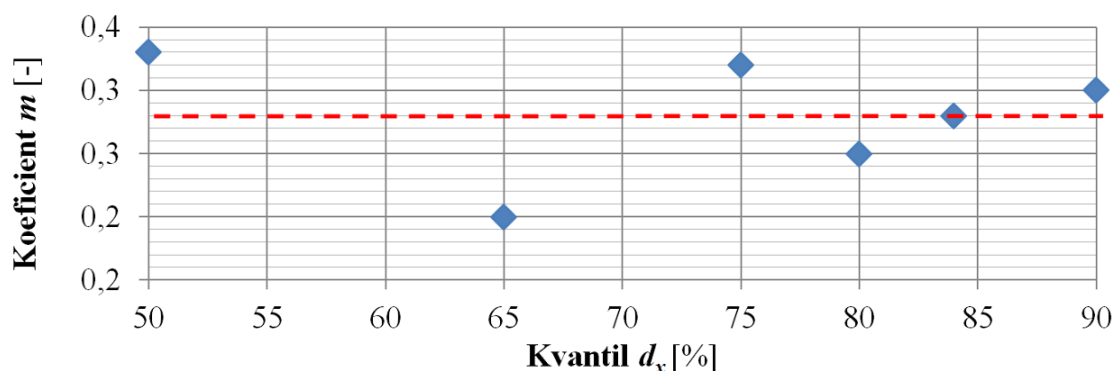
	A1						A2		
	d_{50}			d_{84}			i_H		
	Malá	Střední	Velká	Malá	Střední	Velká	Malá	Střední	Velká
c_1 [-]	10,80	12,62	8,47	13,19	13,96	9,73	3,23	0,11	0,12
c_2 [-]	-	-	-	-	-	-	0,59	0,17	0,06
Počet	14	86	39	18	83	38	20	60	59
$\sum \Delta_a$ [-]	0,2	2,9	1,6	0,2	3,2	1,2	0,2	1,2	2,6

Mnoho rovnic obsahuje parametr k_s nebo k . V kapitole 4.1.1 bylo pro účely této práce definováno, že $k = k_s$ (34). Pro výpočet k lze použít rovnici (34), kde m je koeficient, jehož hodnotu stanovili různí autoři na základě příslušného kvantilu zrnitosti d_x . Počty dle Metodiky vybraných nevhodnějších empirických rovnic pro stanovení součinitele drsnosti, které obsahují Stricklerovu hydraulickou drsnost k_s nebo absolutní drsnost k , jsou uvedeny v závislosti na příslušném kvantilu d_x a koeficientu m v Tab. 41. V kapitole 3.7.4 bylo stanoveno $d_{ef} = d_{65}$.

Na Obr. 33 si lze všimnout, že nejčastěji používané hodnoty koeficientu m nemají jasný trend a spíše lze konstatovat, že oscilují kolem hodnoty 2,8. Průměrná hodnota ze všech použitých hodnot koeficientu m v empirických rovnicích dle Metodiky je 3,07. Pro jednoduchost lze tedy uvažovat univerzální hodnotu $m = 3$ pro všechny kvantily d_x . V této hodnotě panuje shoda s (van Rijn, 1990), který ji uvádí pro kvantil d_{90} , přestože van Rijn se zabýval měřením jevů na pískovém dně. Kvantil d_{90} vystihuje velká zrna materiálu a zároveň eliminuje ojedinělá velká zrna blízká $d_{\max} = d_{100}$.

Tab. 41 Porovnání počtů a hodnot koeficientů m jednotlivých kvantilů d_x u rovnic v Metodice

Kvantil	d_{50}			$d_{65} = d_{ef}$			d_{75}			d_{80}			d_{84}			d_{90}		
m [-]	2,00	3,30	6,60	1,50	2,00	2,50	3,20	2,50	1,00	1,50	2,80	2,95	3,50	3,90	5,10	2,00	3,00	3,50
Počet rovnic	4	18	6	1	1	1	2	1	2	16	8	8	8	6	3	1	11	4
Průměr	3,82			2,00			3,20			2,50			2,72			3,06		
	3,07																	



Obr. 33 Závislost průměrné hodnoty koeficientu m na kvantilu d_x

V rámci práce byla provedena kalibrace koeficientů m pro empirické rovnice, které obsahují k_s nebo k . Tato kalibrace je časově velmi náročná (velké množství rovnic, kvantilů a podkategorií). Pokus o kalibraci tedy proběhl pouze orientačně bez uvažování kategorií a podkategorií, z čehož vyplývá, že kalibrované koeficienty nebylo možné použít ve výpočtu empirickými rovnicemi dle Metodiky. I přes toto zjednodušení ale nejsou po kalibraci provedené pomocí „Hledání řešení“ v programu MS Excel v mnoha případech hodnoty koeficientů m správné. Problémem je, že se absolutní rozdíly Δ_a v některých případech

nezapočítávají do celkové $\sum \Delta_a$, která má být co nejmenší. V případě **malého počtu rozdílů** Δ_a vychází **celková $\sum \Delta_a$ také malá** a rovnice působí jako velmi dobrá.

Absolutní rozdíl $\Delta_a = 0$ může být způsoben:

- absencí vstupních dat pro stanovení podmínky nebo pro vlastní rovnici,
- výpočtem záporného čísla nebo čísla mimo rozmezí $0,015 \leq n_v \leq 0,300$ rovnicí,
- nesplněním podmínky (podmínek), která neobsahuje parametr k nebo k_s , u rovnice
- volbou $m = 0$ ($k_s = 0$, $k = 0$), čímž dochází v rovnici k dělení nulou nebo odmocňování záporným číslem a ke vzniku chybových hodnot,
- volbou m blízkého nule ($k_s \approx 0$, $k \approx 0$), čímž dochází u rovnice k nesplnění podmínky,
- volbou vysokých hodnot m , čímž dochází v rovnici k odmocňování záporným číslem a ke vzniku chybových hodnot.

Srovnáním kvality rovnic se zabývá práce (Marešová, 1992). Kvalita čtyř rovnic z uvedené práce byla srovnána s pořadím stanoveným Metodikou:

- Strickler:

$$\frac{v}{v_*} = \frac{21,1}{\sqrt{g}} \cdot \left(\frac{R}{d_{50}} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (77)$$

dle Marešové 4. místo (nejhorší), dle Metodiky 1. místo (nejlepší), v Metodice je použita analogická rovnice (STR3) s podmínkou, viz Příloha 7,

- Martinec:

$$\frac{v}{v_*} = 5,65 \cdot \log \left(\frac{5,89 \cdot R}{d_{50}} \right), \quad (78)$$

dle Marešové 3. místo, dle Metodiky 2. místo, rovnice nebyla použita v Metodice,

- Pirkovský:

$$\frac{v}{v_*} = 1,54 \cdot \sqrt{8} \cdot \log \left(\frac{13,29 \cdot R}{d_{ef}} \right), \quad (79)$$

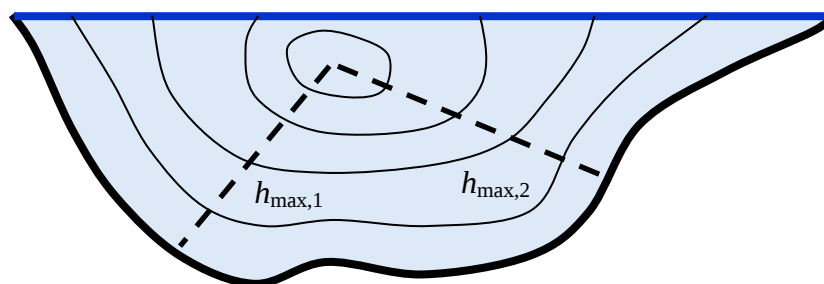
dle Marešové 2. místo, dle Metodiky 3. místo (nejhorší) - nedoporučená pro výpočet

- Hey:

$$\frac{v}{v_*} = 5,62 \cdot \log \left(\frac{a \cdot R}{3,5 \cdot d_{84}} \right), \quad (80)$$

dle Marešové 1. místo (nejlepší), v Metodice není rovnice použita, protože pro stanovení parametru a je nutné znát $h_{\max}$, kterým není myšlena maximální hloubka, ale kolmá vzdálenost od svahu k místu v korytě s největší rychlostí proudění, viz Obr. 34 (černá tlustá čára znázorňuje koryto, modrá je hladina, tenké černé čáry jsou izočáry bodových rychlostí a čárkované čáry $h_{\max,1}$ a $h_{\max,2}$). V případě pravidelného koryta by bylo možné $h_{\max}$ odhadnout pomocí goniometrických funkcí a znalosti předpokládané

polohy místa s největší rychlostí proudění. V případě nepravidelného koryta se hodnota $h_{\max}$ stanovuje individuálně (nelze využít automatického výpočtu, viz kapitola 5.2). Z několika $h_{\max,i}$ se vybírá největší hodnota.



Obr. 34 Schématické znázornění $h_{\max}$ v nepravidelném korytě

Je nutné podotknout, že Marešová srovnávala kvalitu empirických rovnic hrubozrnných toků. Tato práce se ale zabývala jemnozrnnými i hrubozrnnými toky.

Výpočet empirickými rovnicemi dle Metodiky byl podroben verifikačnímu procesu, aby se ukázalo, zda jej lze spolehlivě použít i pro data, na kterých nebyla Metodika kalibrována. Bohužel data použitá pro verifikaci byla omezeně použitelná, protože mnohé vstupní parametry chyběly, a tudíž byly některé empirické rovnice znevýhodněny. Hodnoty součinitelů drsnosti vypočtených na základě vstupních dat dle (Guy, 1966) jsou nižší než ve skutečnosti, protože (Guy, 1966) prováděl laboratorní měření ve žlabu s podmínkami, které umožňovaly vznik dnových útvarů, konkrétně dun.

U některých empirických rovnic není zadána podmínka, která specifikuje rozmezí použitelných hodnot parametrů, ale je uvedeno obecné slovní doporučení rovnice pro „štěrková koryta“, „široké koryto“, „pro balvany“, „koryta se splaveninovým režimem“, apod. Při srovnání těchto slovních popisů se zařazením rovnic do podkategorií (Tab. 14) lze konstatovat, že některé popisy se zařazením souhlasí a mnohé nesouhlasí. Většinou je ale rovnice vhodná pro více podkategorií nebo je popis tak obecný (např. „přírodní koryto“, „horské koryto“) nebo specifický (např. „přírodní koryto s valenými splaveninami“), že nelze zaujmout jasné souhlasné nebo nesouhlasné stanovisko.

5.1.3 SOFTWARE CES

Autoři Smith, Cox and Bracken se pokusili snížit nejistoty při stanovení součinitele drsnosti pomocí empirických rovnic (data z výzkumných prací a experimentálních měření) a pomocí zaměření koryt novými technologiemi (terestrické laserové skenování). Výsledkem jejich výzkumu, ve kterém bylo použito i genetické programování, je program CES (Conveyance estimation system) [3], [4], který ve třech krocích umožňuje stanovit doporučenou hodnotu součinitele drsnosti jednotlivých sekcí koryta (dno, svahy, inundace). Nejprve se koryto rozdělí na zóny s odlišnou drsností, následně se určí příčiny energetických ztrát (materiál, vegetace, nerovnoměrnost) a nakonec se dle popisu a několika fotografií stanoví součinitel drsnosti (Whatmore, 2010).

Výše popsaná myšlenka se na první pohled jevila velmi nadějně, ovšem během vlastní práce s programem bylo konstatováno, že se jedná o slepou uličku. Během aplikace programu na vlastní měření bylo totiž zjištěno několik nedostatků, které brání použití tohoto programu v podmínkách České republiky.

Stanovení součinitele drsnosti je v první řadě zcela nezávislé na rozměrech koryta a vodním stavu. Podpůrných fotografií je velmi málo a mnohdy nelze nalézt typy povrchů typické pro ČR. Např. položku „balvany“ lze najít v nerovnoměrnostech, v kategorii velikosti materiálu balvany chybí. V případě vegetace není vůbec možné vybrat keře nebo stromy. Pouze u nerovnoměrností lze zvolit padlé stromy. U nerovnoměrností nelze zvolit více položek (např. balvany a peřeje). Zajímavou možností je možnost modelování účinku vegetace v čase. Většina hodnot součinitelů drsnosti stanovených programem CES je podhodnocena. Z Tab. 37 je zřejmé, že program CES nelze v praxi doporučit.

5.1.4 ZRNITOST MATERIÁLU

Z předchozích analýz lze vyvodit několik závěrů. Pro stanovení křivky zrnitosti jemnozrnných materiálů, kde maximální frakce je štěrk, se doporučuje provést síťový rozbor. Pro stanovení křivky zrnitosti je vhodné v případě hrubozrnných materiálů použít Wolmanovu metodu. Není nutné provést odběr 100 zrn, ale postačí provést odběr 50 zrn a pro orientační výpočty odběr jen 30 zrn. Subjektivní odhad lze také poměrně efektivně využít ke stanovení křivky zrnitosti.

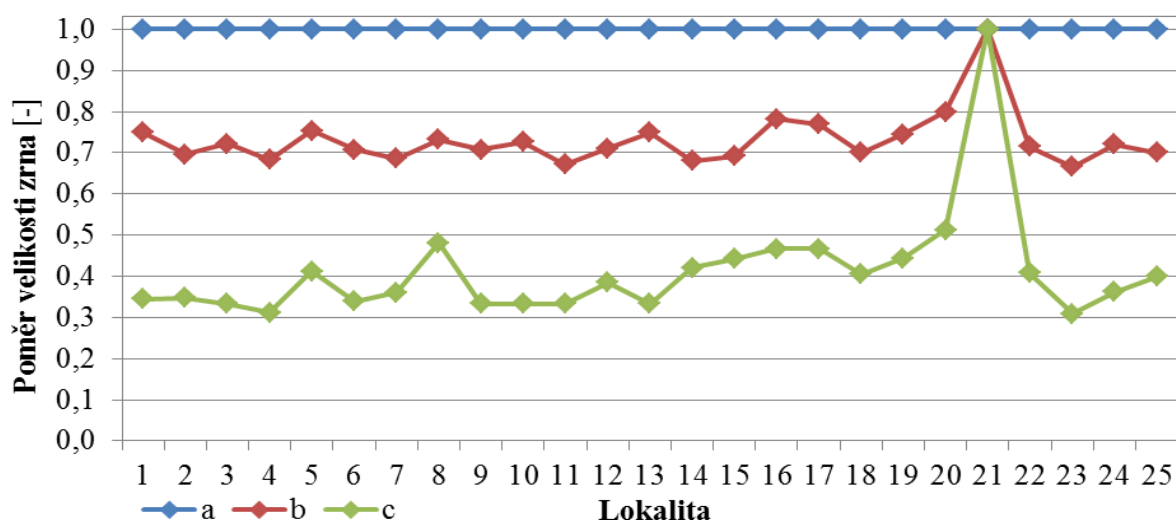
Doposud provedené výpočty součinitelů drsnosti pomocí empirických rovnic naznačují, že přesnost stanovení součinitele drsnosti závisí mnohem více na vhodně zvolené empirické rovnici (rovnících), než na přesnosti stanovení požadovaného kvantilu křivky zrnitosti (Smelík, 2012b). Pro zajímavost je na Obr. 35 uvedena ukázka přirozeně armovaného dna v lokalitě Raškovice na toku Mohelnice.



Obr. 35 *Přirozeně armovaný materiál dna v lokalitě Raškovice*

Na Obr. 36 jsou srovnány poměry mediánů velikostí os a , b , c zrn materiálu dna pro jednotlivé lokality (25 lokalit stanovených Wolmanovou metodou). Poměr velikosti os b , c je vztažen k největší ose a (hodnota 1). Až na lokalitu Rychmanov, kde převažuje jemnozrnný materiál, byl potvrzen Stricklerův předpoklad (velikosti os zrna jsou v poměru 3:2:1) definovaný v kapitole 3.2. Průměrně tedy nabývá medián:

- velikostí os b cca 71 % velikosti osy a ,
- velikostí os c cca 38 % velikosti osy a .



Obr. 36 Srovnání poměrů velikostí jednotlivých os zrn materiálu dna ve sledovaných lokalitách

5.1.5 VEGETACE

Vegetace při měření na vlastních lokalitách neovlivňovala nebo jen zanedbatelně ovlivňovala součinitel drsnosti. U externích zdrojů dat použitých k výběru nejvhodnějších empirických rovnic a verifikaci ale reálně hrozí, že byl zejména za zvýšených vodních stavů součinitel drsnosti ovlivněn kromě dnového materiálu také vegetací. Bylo zvažováno, že by se vliv vegetačního pokryvu z výsledného součinitele drsnosti odseparoval. Tento postup ale naráží na několik problémů. Prvním z nich je volba velikosti části omočeného obvodu s vegetací. Tato velikost není nikde udávána, a proto by se musela odhadovat z fotografií (jedna fotografie pro více vodních stavů). Druhým problémem je stanovení vlastního součinitele drsnosti vegetace, kdy jsou metody založeny na značeném zjednodušení a uvažování pouze jednoho typu vegetace (bylinná, stromová). Třetím problémem je členitost hustoty a rozmístění vegetace ve sledovaném úseku toku. Z výše uvedených problémů vyplývá, že volba součinitele drsnosti vegetace v části omočeného obvodu je komplikovaná a potenciálně zatížená velkou chybou.

Kromě vegetace na svazích se lze setkat i s vegetací přímo v korytě. Kromě trav a náletových dřevin na lavicích se lze setkat s trsy vodní trávy, viz Obr. 37, která je

např. v tabulkách opomíjena. Na základě této skutečnosti byla zahrnuta do výpočtu pomocí Rozšířené Cowanovy metody.



Obr. 37 Trsy vodní trávy v korytě Chrudimky pod přehradou Křižanovice II

5.1.6 POTENCIÁLNÍ ZDROJE CHYB

Během přípravných, měřicích (příčné profily, hladiny, stanovení průtoku, odběr materiálu dna) a vyhodnocovacích prací, volby předpokladů a tvorby Metodiky se vyskytlo mnoho situací a důvodů, kvůli kterým mohly potencionálně vzniknout chyby, které mohly ovlivnit stanovení doporučené hodnoty součinitele drsnosti (Brachtel, 1962), (Havlík, 2005), (Smelík, 2012). Hlavní potenciální chyby jsou heslovitě vypsány a rozděleny do několika skupin:

zaměření:

- volba mírně meandrujícího úseku toku, uvažuje se přímé koryto i v případě mírného oblouku,
- příčné profily nemusí být zvoleny přímo ve zlomech podélného sklonu dna, podélný sklon dna může být i záporný,
- profily nejsou zcela kolmé k proudnici, což může způsobit výpočet nesprávné průtočné plochy,
- příčný profil není v čase konstantní, možnost výskytu eroze, abraze nebo konsolidace svahů,
- mohla být vybrána lokální tůň nebo nános, které způsobí změnu příčného profilu, který pak nereprezentuje tvar příčného profilu v úseku mezi dvěma profily,
- během sledovaného období mohly být bez povšimnutí odtěženy nánosy, do koryta mohlo něco spadnout, mohlo do něj být něco nasypáno, mohly vzniknout vyjeté koleje od obslužné techniky, mohly vzniknout nebo zaniknout výmoly nebo nánosy,

- časová náročnost měření s teodolitem neumožňuje zaměřit větší množství detailů a příčných profilů, některé drobnější změny tvaru dna nemusely být zachyceny,
- nebyly zaměřeny osamělé balvany, v případě hrubozrnnějšího charakteru materiálu dna (valouny, balvany) mohla být měrná lať umístěna na tato velká zrna místo na dno, komplikované zaměření skalnatého dna,
- přesnost a nedokonalost přístrojů,
- špatně urovnaný teodolit, měrná lať bez libely nebo pohnutí se stativem ovlivňuje zaměření,
- měření na velkou vzdálenost (tetelení vzduchu), přes keře nebo větve zmenšuje čitelnost a přesnost odečtu z měrné lati, rozkmit latě,
- měrná lať se může zabořit do trávy, do měkkého dna nebo může obtékání latě v silném proudu způsobit vymílání jemného materiálu dna pod měrnou latí (boření),
- možnost vzniku chyb při odečítání z přístrojů nebo při zápisu (špatně zapsané číslo, číslo zapsané na špatné místo), odhadování na mm z latě, která je odstupňovaná po cm,

nivelace hladin:

- mohl se poškodit kolík (pevný bod) a jeho výšková úroveň jeho zatlačením či sekáním trávy,
- hladina v příčném řezu není zcela vodorovná, komplikované stanovení úrovně hladiny v ramenech toku (nízký vodní stav) nebo v oblouku (úroveň hladiny v LB a PB se liší),
- měření někdy probíhalo jen na jedné straně koryta a měřilo-li se na obou stranách, uvažoval se průměr úrovní hladin,
- přítomnost vln na hladině a následné stanovení úrovně střední hladiny je zatíženo velkou chybou, zejména během povodně, což kompenzuje jen fakt, že u svahu je pomalejší proud s menšími vlnami,
- neustálené proudění během povodně, kdy se rychle mění úroveň hladiny v čase,
- nepřesné vytýčení příčných profilů pásmem, nivelace se neprovádí přesně v místě profilu, což se projeví zejména v případě peřejí, kde se rychle mění ve směru proudění úroveň hladiny,

stanovení zrnitosti materiálu:

- nelze udělat zcela reprezentativní vzorek z malého množství odebraného materiálu dna,
- nevhodně zvolená metoda pro stanovení křivky zrnitosti (sítový rozbor pro hrubozrnný materiál, Wolmanova metoda pro jemnozrnný materiál),

- lokální odběr materiálu v místě, které není reprezentativní (u překážek, ve vzdutí, v tůni, na nánosu, v oblouku) nebo v místě, kde ještě není po předchozím zásahu vytvořena dnová dlažba,
- čtvercová (místo kruhových) oka síta jedné frakce mohou způsobovat, že okem projdou mnohem větší plochá zrna (rozměr přepony otvoru v sítu) než oblá kulová zrna (rozměr šířky otvoru v sítu) nebo ještě menší členitá zrna, která se mohou zachytit v otvoru síta větším rozměrem, než kterým by mohly propadnout,
- nepřesnost vah, nedokonalé vysušení vzorku,
- vynesení křivky zrnitosti do logaritmického měřítka může dodatečně způsobit chyby při odečítání z logaritmického grafu (nepřesný nesprávný odhad mezi mezilehlými čarami),

stanovení průtoku:

- v limnigrafu se skokově zvětšuje průtok (změna 1 cm zvýší zejména při malém vodním stavu průtok řádově o několik procent), limnigraf může mít poruchu,
- není-li limnigraf na dohled od sledované lokality, může být průtok skrytě zvýšen o povrchový přítok, drobné přítoky, přítoky z dešťových svodů, meliorací, domovních kanalizací, apod.,
- nepřesnosti při hydrometrování, v metodice vyhodnocení a kalibraci měrné křivky limnigrafu,
- neuvažuje se vliv teploty vody při hydrometrování - ovlivňuje otáčení propeleru měrné vrtule (zejména při menších rychlostech) (Niemieć, 2013),
- chyba špatného zaznamenání času - ČHMÚ zaznamenává údaje z limnigrafu ve formátu UTC, ovšem na hodinkách je při měření středoevropský čas, případně středoevropský letní čas,

stanovení součinitele drsnosti z měření:

- neuvažuje se vliv teploty vody (hustota, viskozita) a provzdušnění proudu,
- předpokládá se proudění s čistou vodou (některé toky jsou zakalené), bez plavenin a splavenin i za zvýšených vodních stavů,
- místní ztráty se neuvažují samostatně, ale jsou zahrnuty do součinitele drsnosti,
- uvažuje se pouze proudění v otevřených korytech bez možnosti ovlivnění hladiny vznikem lokálního přepadu nebo ovlivnění rychlosti soudržnými silami při velmi malém vodním stavu,
- neuvažuje se změna součinitele drsnosti v čase ani možnost degradace nebo destrukce opevnění,

- používají se výchozí hodnoty koeficientů, metod výpočtu a počtu iterací programu HEC-RAS 4.1 bez ohledu na konkrétní lokalitu,
- většina interpolací v programu HEC-RAS 4.1 se provádí automaticky a jen u některých profilů je po předchozí kontrole manuálně provedeno propojení souvisejících bodů, viz Obr. 23,
- je proveden výpočet součinitele drsnosti pro konkrétní měření a celý úsek (lokalitu) - ne mezi jednotlivými profily,
- výpočet je proveden 1D modelem, což zejména v případě makrodrsnosti (minimální vodní stavy, hrubozrnný materiál dna) způsobuje odchylky, neboť reálné proudění je 3D,
- hodnoty součinitele drsností menší než 0,015 a větší než 0,300, přestože tak byly stanoveny, nejsou pro další výpočty uvažovány z důvodu obavy z chybného stanovení,
- mohly vzniknout chyby při opisování hodnot parametrů z externích katalogů,

výpočet součinitele drsnosti empirickými rovnicemi dle Metodiky:

- pro výběr nejvhodnějších empirických rovnic a verifikaci bylo použito omezené množství vstupních dat, které většinou neobsahovaly plné množství vstupních parametrů,
- přestože byl subjektivní pohled v co největší míře potlačen, výjimečně je použit, což může v některých případech způsobovat chyby,
- jsou používány empirické rovnice, jejichž koeficienty byly mnohdy stanoveny z měření téměř rovnoměrného ustáleného proudění, pro nerovnoměrné ustálené proudění,
- nedostatek informací o empirických rovnicích a podmínkách jejich použitelnosti,
- zaokrouhlování mezivýsledků,

vegetace:

- vegetace není rozmístěna na svazích rovnoměrně, v kynetě a bermě, na LB a PB, na dně a svazích nebo v horní a dolní části úseku toku jsou různé druhy a hustota vegetace,
- kromě toho, že větve, pařezy, kořeny a kmeny vytváří odpor proudění, může se na nich nepředvídatelně zachytávat pláví a větve, keře a tráva se mohou ohýbat,
- vegetace se mění dle vegetačního období a její vlastnosti závisí na druhu a intenzitě údržby,
- vegetace může zarůst původní technické opevnění a změnit součinitel drsnosti z návrhu úpravy vodního toku,
- zdlouhavé stanovování vstupních parametrů vegetace (hustota, průměr kmenu, spon) nebo nákladné stanovení parametrů vegetace leteckým skenováním pro některé metody výpočtu součinitele drsnosti vegetace vede k zjednodušování.

5.2 METODIKA

Významným výstupem Metodiky stanovení součinitele drsnosti otevřených koryt je snadný a rychlý automatický výpočet součinitele drsnosti koryta různými přístupy v programu MS Excel (Smelík, 2013).

Po zadání vstupních parametrů potřebných pro jednotlivé přístupy proběhnou jednotlivé výpočty. Do oranžově nebo červeně podbarvených buněk ohraničených červeně nebo modře se zadává hodnota parametru, hodnota dílčího součinitele drsnosti u přístupu Cowan+ nebo číslo „1“ v případě, že slovní popisy nejlépe vystihují dané koryto. Zeleně podbarvené buňky značí tzv. nápovědu, tj. hodnoty dopočítaných kvantilů křivky zrnitosti při použití Subjektivního odhadu, dopočítané hodnoty parametrů koryta stanovené z ostatních parametrů (je-li např. známa průtočná plocha a průměrná profilová rychlost, dopočítá se průtok), doporučený slovní popis na základě hodnot parametrů koryta apod. Náhled okna, do kterého se ve výpočtovém programu zadávají vstupní parametry pro výpočet součinitele drsnosti empirickými rovnicemi, je na Obr. 39.

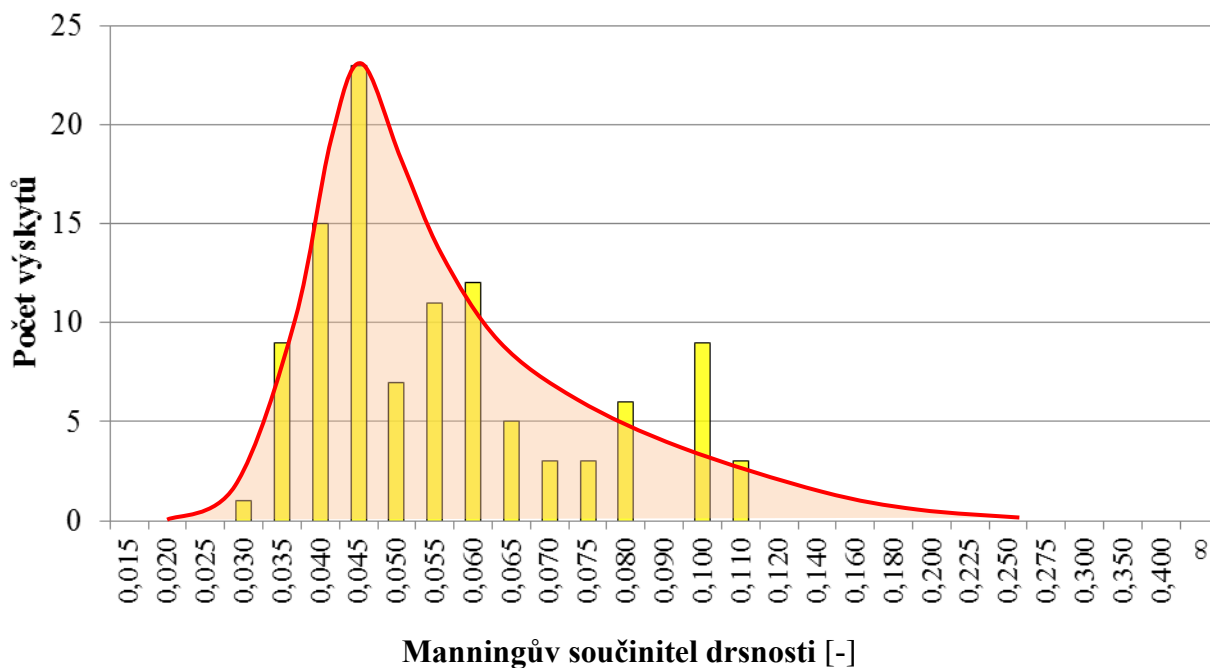
V případě empirických rovnic platí, že čím více parametrů je zadáno, tím více rovnic je pro výpočet použito s tím, že pro realizaci výpočtu je potřeba znát minimálně sklon i_H (i_E) nebo kvantil zrnitosti d_x . Pro informaci je uvedeno, kolik je právě použito empirických rovnic z celkového množství 147 rovnic.

Zdrojem rovnic je (Smetana, 1957), (Martinec, 1958), (Chow, 1959), (Engelund, 1964), (Martinec, 1966), (Praxitelis, 1966), (Barnes, 1967), (Boor, 1968), (Libý, 1970), (Limerinos, 1970), (Knight, 1979), (Výbora, 1981), (Hey, 1982), (Brown, 1989), (Patočka, 1989), (Macura, 1990), (van Rijn, 1990), (Yen, 1991), (Marešová, 1992), (Makovec, 1998), (Bettes, 1999), (Bathurst, 2002), (Mattas, 2003), (Singh, 2003), (Nguyen, 2004), (Hardy, 2005), (Noordam, 2005), (Morvan, 2008), (Žic, 2009), (Šlezinger, 2010).

Rozložení počtu vypočtených součinitelů drsnosti v jednotlivých intervalech lze vidět v histogramu četnosti na Obr. 38. Většinou se v něm vyskytuje jedna nejčtenější hodnota součinitele drsnosti, což ovšem neznamená, že je správná. Může se vyskytovat více nejčtenějších hodnot součinitele drsnosti s tím, že pak se stanoví nejčtenější minimální a nejčtenější maximální hodnota. Použilo-li by se velké množství výsledků empirických rovnic, rozdělení vypočtených součinitelů drsnosti by neodpovídalo normálnímu rozdělení, ale spíše log-normálnímu rozdělení, viz Obr. 38. Vrchol log-normálního rozdělení je obvykle vychýlen směrem doleva k menším hodnotám součinitelů drsnosti. Z Tab. 37 vyplývá, že nejčtenější hodnotu histogramu není vhodné použít ke stanovení součinitele drsnosti.

Výstupy výpočtového programu, respektive Metodiky, jsou (podržené metody jsou doporučené přístupy, nepotržené metody jsou doplňkové přístupy):

- Manningův součinitel drsnosti stanovený:
 - Empirickými rovnicemi, kde výstupem je:
 - histogram rozložení četnosti a nejčtenější hodnota (hodnoty) vypočtených součinitelů drsnosti, viz Obr. 38,
 - graf všech vypočtených hodnot součinitelů drsnosti,
 - doporučený součinitel drsnosti stanovený Metodikou a minimální, průměrná a maximální hodnota součinitele drsnosti stanovená pro prvních deset nevhodnějších empirických rovnic způsoby **Z1** a **Z4**,
 - Rozšířenou Cowanovou metodou,
 - Filtrováním tabulek,
 - Fotografickým katalogem (nestanoví se automaticky, ale podle diagramu),
- Manningův součinitel drsnosti dnových útvarů - dun,
- Manningův součinitel drsnosti vegetace, konkrétně:
 - trávy,
 - stromů,
- Stabilita dna (pohyb splavenin) stanovená pomocí Shieldsova kritéria θ .



Obr. 38 Histogram četnosti součinitelů drsnosti vypočtených empirickými rovnicemi

Metrický systém:

SI

US

1

Vymazat

(vymaže formuláře)

Subjektivní odhad zrnitosti

velikost [mm]	materiál	zastoupení [%]
< 0.063	bahno	2
0.063 - 2	písek	4
2 - 32	šterk	30
32 - 128	kámen	40
128 - 512	valoun	20
> 512	balvan	4

650

velikost maximálního zrna [mm]

Zrnitostní křivka:

d_x	16 %	35 %	50 %	65 %	75 %	80 %	84 %	90 %	ef. zrna
									mm
	12,0	31,0	65,6	101,6	125,6	224,0	281,6	396,8	133,0

ZAPSAT

Parametry pravidelného koryta:

	b	m	h	B	A	O	R	i_H	i_E	V	Q	T
doplňuj směrem	→ 5,000	1,000	1,200		7,440			0,00500		0,800		15,0
dopočítané hodnoty			7,400			8,394	1,200		0,00500		5,952	

Právě je použito 102 rovnic z celkových 147 rovnic.

Legenda:

nutné vyplnit pro provedení výpočtu

bude použito nejvíce rovnic

vede ke zpřesnění výpočtu

parametry ovlivňující výpočet

podpůrné parametry

Obr. 39 Vstupní parametry pro výpočet souč. drsnosti empirickými rovnicemi dle Metodiky

6. ZÁVĚR

Vyjádřit odpory proudění v korytech otevřených toků je potřeba pro různé účely hydrauliky otevřených koryt, zejména pro stanovení kapacity koryta. Odpory proudění jsou ovlivněny komplexním souborem faktorů, z nichž se obvykle uvažují jen cca dva až tři (materiál dna, vegetace, pravidelnost koryta). V současnosti lze ze závěrů dosavadních výzkumů, znalosti způsobů zaměření toků a výpočetních možností běžných počítačů konstatovat, že pro výpočet odporů proudění v dlouhých úsecích vodních toků lze reálně využít Manningův součinitel drsnosti. Protože je součinitel drsnosti neměřitelný, používá se k jeho stanovení vlastních zkušeností nebo různých podpůrných přístupů, nejčastěji tabulek se slovními popisy.

Cílem práce bylo analyzovat vybrané přístupy ke stanovení součinitele drsnosti. Pro účely analýz byla provedena série měření na 27 lokalitách vodních toků v okolí Brna a Frýdku-Místku, která byla provedena převážně za běžných a občas za snížených nebo mírně zvýšených průtoků (cca Q_1). Po dobu měření se předpokládaly neměnné příčné profily toků. Z každého měření byly stanoveny hodnoty úsekových součinitelů drsnosti v softwaru HEC-RAS 4.1. Je nutné podotknout, že hodnoty součinitelů drsnosti by se mohly mírně lišit v případě použití jiného softwaru a že hodnoty takto stanovených součinitelů drsnosti vyjadřují odpory proudění v celé délce, šířce a výšce sledovaného úseku koryta toku. Kromě parametrů koryt bylo pro následné analýzy potřeba znát kvantily křivek zrnitosti materiálu dna. Ve většině případů postačí křivku zrnitosti stanovit pomocí Subjektivního odhadu. Pro přesnější stanovení lze u jemnozrnných materiálů doporučit síťový rozbor. U hrubozrnných materiálů je vhodné použít Wolmanovu metodu, pro kterou je dostatečný odběr 50 zrn. K doplnění databáze bylo shromážděno 1 685 a pro verifikaci dalších 744 externích dat z měření. Vzniklá databáze měření bude po obhájení práce přístupná pro další výzkum na (Smelík, 2013).

Jedním z cílů práce bylo zjistit, jak kvalitně lze součinitel drsnosti stanovit pomocí empirických rovnic. Výzkumem bylo potvrzeno, že nejvhodnějším přístupem pro stanovení Manningova součinitele drsnosti koryta jsou empirické rovnice dle Metodiky. Metodika je speciální postup, pomocí kterého jsou statistickou analýzou empirické rovnice vybrány, seřazeny a vhodně zkombinovány. Předpokládalo se, že některé empirické rovnice jsou vhodné jen pro určitý typ koryta, vodní stav nebo materiál dna. Proto byla zkoumána kvalita empirických rovnic v devíti kategoriích a v každé z nich ještě u třech podkategorií s malou, střední a velkou hodnotou parametru kategorie - celkem tedy v 27 podkategoriích. Za nejuniverzálnější empirické rovnice lze považovat ty, které dávají poměrně přesné výsledky součinitele drsnosti u koryt různých parametrů. Univerzální rovnice pro spolehlivé použití u většiny typů koryt toků bohužel nebyla nalezena, a proto je vhodné použít kombinaci několika rovnic dle Metodiky.

Běžně používané tabulky lze po nabytých zkušenostech doporučit pouze jako orientační přístup. Pro praxi je ale pro velké odchylky od součinitelů drsnosti stanovených z měření nelze doporučit ani u upravených toků, obdobně jako fotografické katalogy. V případě fotografických katalogů existuje jistý potenciál, který však nelze v současné době využít z důvodu nejednoty těchto katalogů. Pokud by byla systematicky vytvářena databáze měření, která by obsahovala parametry koryta, součinitele drsností stanovených z měření a fotografie z každého měření, časem by mohla vzniknout kvalitní databáze, která by mohla být využívána pro různé typy výzkumů.

Vhodným přístupem pro stanovení součinitele drsnosti je Cowanova metoda, která umožňuje pomocí šesti dílčích slovně vyjádřených faktorů stanovit výsledný součinitel drsnosti. Rozšířená verze Cowanovy metody přidává nový faktor vyjadřující vliv vodního stavu, přidává nové typy materiálu dna, zjednodušuje a rozšiřuje slovní popisy, které doplňuje o grafická schémata. Metoda není příliš náročná, a přesto umožňuje součinitel drsnosti stanovit poměrně spolehlivě.

Kvalitou empirických rovnic se zabývala (Marešová, 1992). Pořadí kvality rovnic dle Marešové a Metodiky je ale zcela opačné. Marešová se ovšem zabývala hrubozrnnými toky a materiál dna toků, na kterých byla Metodika kalibrována, byl i jemnozrnný. Při srovnání jednotlivých přístupů se ukazuje, že stanovené hodnoty součinitelů drsnosti bývají ve většině případů podhodnoceny. S tímto poznatkem koresponduje zjištění (Koutková, 2003), kde se ukázalo, že většina odhadů je podhodnocených. Toto je zásadní poznatek, neboť součinitel drsnosti je nepřímo úměrný vypočítanému průtoku. Je-li součinitel drsnosti např. o polovinu podhodnocen, je o polovinu nadhodnocen průtok, respektive se koryto jeví kapacitnější, než ve skutečnosti je. Metodika tomuto nepříznivému stavu předchází.

Vzhledem ke složitosti Metodiky byl pro snadnější stanovení součinitele drsnosti vytvořen v MS Excel výpočtový program, který umožňuje stanovit součinitel drsnosti na základě čtyř přístupů a výsledky vzájemně porovnat. Program také umožňuje orientačně stanovit součinitel drsnosti dnových útvarů (dun), travního pokryvu a stromů a stav splavenin (klid, pohyb). Program lze využít pro výuku studentů, ale zejména pro projekční praxi v úlohách stanovení kapacity koryta, návrhu úprav toků, modelování úrovní hladin a povodňové plánování. Program lze také použít pro účely výzkumu biodiverzity, míry zanášení nebo vymílání toků. Okrajově jej lze využít ke stanovení kulminačního průtoku z povodňových značek a to zejména v případě, kdy podstatná část průtoku neproudila inundací, kde je průtok značně ovlivněn vegetací. Po obhájení práce bude výpočtový program volně přístupný na (Smelík, 2013).

Hodnoty součinitelů drsnosti stanovené jednotlivými přístupy dle Metodiky jsou podpůrným prostředkem pro vlastní expertní odhad. Ten by se měl zakládat na stanovení součinitele drsnosti koryta empirickými rovnicemi dle Metodiky nebo Rozšířenou Cowanovou metodou. V případě, že jsou svahy koryta, bermy nebo prostory inundace

výrazněji ovlivněny vegetací, stanoví se ve výpočtovém programu příslušné hodnoty součinitelů drsnosti vegetace. Následně se obvyklým způsobem stanoví ekvivalentní součinitel drsnosti jednoduchého nebo složeného koryta s tím, že součinitel drsnosti stanovený empirickými rovnicemi dle Metodiky vyjadřuje pouze vliv drsnosti dna. Výsledný součinitel drsnosti je možné orientačně srovnat s hodnotami uváděnými v tabulkách nebo fotografických katalozích.

Ke stanovení součinitele drsnosti vegetace lze využít tabulky a empirické rovnice. Jejich použití je ale problematické. V této oblasti lze vidět dlouhodobý výzkumný potenciál. Bylo by vhodné shrnout poznatky o této problematice a zautomatizovat výpočet součinitele drsnosti vegetace do té míry, aby bylo ve výpočtu zahrnuto např. procentuální zastoupení trav, bylin, plevelů, křovin, keřů, kořenů, pařezů a kmenů stromů na jednotlivých svazích (LB, PB) a pro několik vodní stavů. V takovém případě by bylo možné poměrně rychle stanovit součinitel drsnosti vegetace i v dlouhém úseku vodního toku. Takový výzkum bude časem jistě žádaný, protože 2D modelování proudění se stále častěji stává běžným prostředkem pro modelování povodní.

Ze zkušeností autora vyplývá, že množství nejistot ovlivňujících součinitel drsnosti je tak velké, že u koryt s hrubozrnným materiálem (cca $n > 0,060$) je dostačující uvádět hodnotu součinitele drsnosti na dvě desetinná místa a u koryt s jemnozrnným materiálem na tři desetinná místa se zaokrouhlením na pět tisícín, tedy např. 0,025; 0,030; 0,035; 0,040 atd.

Se stanovením Manningova součinitele drsnosti obdobným způsobem, jak je uveden v disertační práci, se autor nesetkal. Přínosy práce uvedené výše jsou potvrzeny. Uvedená Metodika a zejména výpočtový program jsou přínosným a inovativním přístupem, který podstatně zpřesňuje stanovení hodnoty součinitele drsnosti. Metodika se zaměřuje na potlačení subjektivního ovlivnění při stanovování součinitele drsnosti. Metodiku by bylo vhodné ověřit na větším množství kvalitních verifikačních dat.

V Brně dne 25. 11. 2014

Ing. Lukáš Smelík

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- ALDRIDGE, B. N., GARRETT, J. M. (1973). *Roughness coefficients for stream channels in Arizona*. U.S. Department of the Interior Geological Survey, Tucson. 1973,
- ARCEMENT, G. J., SCHNEIDER, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. USGS, Denver. 1989,
- ASSELMAN, N. E. M. (2002). *Assesment of the hydraulic roughness of river flood plains using laser altimetry*. IAHS Publ. No. 276, Alice Springs. 2002,
- BARNES, H. H. (1967). *Roughness charcteristics of natural channels*. USGS, Washington. 1967, http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/barnes_station_id.shtml,
http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/supplementary/barnes_webpage.shtml,
<http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/index.htm>
- BATHURST, J. C. (2002). *At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers*. Journal of Hydrology. 2002,
- BETTES, R. (1999). *Flow resistance equations for gravel bed rivers*. IAHR. 1999.
- BOOR, B., KUNŠTÁTSKÝ, J., PATOČKA, C. (1968). *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. SNTL, Praha. 1968,
- BRACHTL, I., TAUS, K. (1962). *Súčinitele drsnosti otvorených kanálov*. VÚV, Bratislava. 1962,
- BROWN, S. A., CLYDE, E. S. (1989). *Design of riprap revetment*. Sutron corp., Herndon. 1989, <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hec/hec11si.pdf>
- BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B. (1989). *Drsnost povrchu*. SNTL, Praha. 1989,
- BUNTE, K., ABT, S. R. (2001). *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulice, and streambed monitoring*. Department of Agriculture, Rocky mountain research station. 2001,
- CHOW, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. Mc. Graw Hill Co, New York. 1959,
- COLEMAN, S. E., ZHANG, M. H., CLUNIE, T. M. (2005). *Sediment-wave development in subcritical water flow*. Journal of Hydraulic Engineering. 2005,
- COON, W. F. (1998). *Estimation of roughness coefficients for selected natural stream channels with vegetated banks in New York*. USGS, Ithaca, Now York. 1995,
- COWAN, W. L. (1956). *Estimating hydraulic roughness coefficients*. Agricultural Engineering. 1956,

- DE JONG, C. (1992). *Measuring changes in micro and macro roughness on mobile gravel beds*. Freie Universität, Berlin. 1992,
- DUBOIS, J., SCHLEISS, A. (1999). *Hydraulic behavior of surface flow in and over macro-roughness*. 28. IAHR Congress Hydraulic Engineering for sustainable water resources management at the Turn of the Millennium. 1999,
- DUIN VAN, O. J. M., RIBBERINK, J. S., DOHMEN-JANSSEN, C. M., HULSCHER, S. J. M. H. (2012). *Particle step length variation along river dunes*. River Flow, London. 2012,
- DVOŘÁK, L., ŘÍHA, J. (2001). *Parametrické srovnání vztahu součinitele drsnosti u 1D a 2D modelů proudění vody v tocích*. Vodní hospodářství 08/2011, Čkyně. 2011,
- ENGELUND, F. (1964). *Flow resistance and hydraulic radius*. Danish academy of technical sciences, Copenhagen. 1964,
- FASKEN, G. B. (1963). *Guide for selecting roughness coefficient "n" values for channels*. Soil conservation service - U.S.D.A., Lincoln. 1963,
- FISHER, K., DAWSON, H. (2003). *Reducing uncertainty in river flood conveyance - roughness review*. DEFRA, London. 2003,
- GILLEN, D. F. (1996). *Determination of roughness coefficients for streams in West-Central Florida*. USGS, Tampa. 1996,
http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/supplementary/fl_webpage.shtml
- GOLÍK, P. (2006). *Pravděpodobnostní hodnocení kapacity koryta vodního toku*. Disertační práce. VUT, Brno. 2006,
- GORDON, N. D., MCMAHON, T. A., FINKAYSON, B. (1992). *Stream hydrology: an introduction for ecologists*. John Willey and Sons, Chichester. 1992,
- GRAF, W. H. (1984). *Hydraulics of sediment transport*. Water resources publications. Highlands ranch, Colorado. 1984,
- GUY, H. P., SIMONS, D. B., RICHARDSON, E. V. (1966). *Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61*. USGS Professional paper, Washington. 1966,
- HARDY, T., PANJA, P., MATHIAS, D. (2005). *WinXSPRO, A channel cross section analyzer, user's manual, version 3.0*. USDA, Fort Collins. 2005,
- HARMS, J. C., SOUTHARD, J. B., WALKER, R. B. (1982). *Structures and sequences in clastic rocks: lecture notes for short course no. 9*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa. 1982,
- HAVLÍK, A. (2005). *Hydraulika otevřených koryt za povodňových průtoků*. Habilitační práce. ČVUT, Praha. 2005,
- HAVLÍK, V., MAREŠOVÁ, I. (1994). *Hydraulika II, Příklady*, ČVUT Praha. 1994,

- HEY, R. D., BATHURST, J. C., THORNE, C. R. (1982). *Gravel-bed rivers. Fluvial processes, engineering and management*. John Wiley and Sons, Chichester. 1982,
- HICKS, D. M., Masson, P. D. (1998). *Roughness characteristics of New Zealand rivers*. Water resources survey, Wellington. 1998,
- JANALÍK, J. (2008). *Obtékání a odpor těles*. VŠB, Ostrava. 2008,
- JANDORA, J., STARA, V., STARÝ, M. (2002). *Hydraulika a hydrologie*. CERM, Brno. 2002,
- JARETT, R. D. (1985). *Determination of roughness coefficient for streams in Colorado*. USGS, Lakewood. 1985,
- JÄRVELÄ, J. (2004). *Flow resistance in enviromental channels: Focus on vegetation*. Disertační práce. Helsinki University of Technology Water resources publications, Espoo. 2004,
- JIRKA, G. H., LANG, C. (2009). *Einführung in die Gerinnehydraulik*. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe. 2009,
- JULIEN, P. Y., GERRIT, J. K. (1995). *Sand-dune geometry of large rivers during floods*. Journal of Hydraulic Engineering. 1995,
- KARIM, F. (1995). *Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flows*. Journal of Hydraulic Engineering. 1995,
- KEIJZER, M., BAPTIST, M., BABOVIC, V., UTHURBURU, J. R. (2005). *Determing equations for vegetation induced resistance using genetic programming*. Conference Genetic and evolutionary computation, Washington. 2005,
- KLOUČEK, R. (2008). *Vliv vybraných parametrů na hydraulickou drsnost říčních koryt*. Diplomová práce. ČVUT, Praha. 2008,
- KNIGHT, D. W., MACDONALD, J. A. (1979). *Hydraulic resistance of artificial strip roughness*. Journal of The Hydraulics Division, Reston. 1979,
- KOMORA, J. (1977). *Hydraulické odpory stromových porastov v inundovaných územiach riek*. VÚVH, Bratislava. 1977,
- KOUTKOVÁ, H. (2003). *Rozdělení pravděpodobnosti expertních odhadů stupně drsnosti koryta*. 2. mezinárodní matematický workshop, Brno. 2003,
- KRÁLÍK, M., SATRAPA, L. (2007). *Rozložení rychlostí v příčném profilu měrného žlabu*. Odborný seminář Výzkumného centra CIDEAS-VS ČVUT, Praha. 2007,
- KRUPIČKA, J. (2007). *Modelování proudění vody koryty se složenými profily*. Diplomová práce. ČVUT, Praha. 2007,

- KUMMU, M. (2002). *Roughness characteristics and velocity profile in vegetated and nonvegetated channel*. Diplomová práce. University of Technology, Helsinki. 2002,
- LANG, S., LADSON, T., ANDERSON, B., RUTHERFORD, I. (2004). *Stream roughness. Four case studies from Victoria*.
<http://lwa.gov.au/files/products/river-landscapes/pn30109/case-studies-victoria.pdf>
- LIBÝ, J. (1970). *Rovnoměrný pohyb vody v otevřených korytech silně drsných*. Kandidátská disertační práce. VÚV, Praha. 1970,
- LIMERINOS, J. T. (1970). *Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*. US GSW, Washington. 1970,
- MACURA., V., SZOLGAY, J. (1990). *Úpravy tokov*. Edičné stredisko SVŠT, Bratislava. 1990,
- MAKOVEC, R. (1998). *Vliv geometrické drsnosti na odpory proudění*. Diplomová práce. ČVUT, Praha. 1998,
- MAREŠOVÁ, I. (1992). *Odpory proudu v korytech s hrubozrnným dnem*. Kandidátská disertační práce. ČVUT, Praha. 1992,
- MARTINEC, J. (1958). *Vliv drsnosti koryta na pohyb vody ve vodních tocích*. VÚV, Praha. 1958,
- MARTINEC, J. (1966). *Rychlostní ztráty v nepravidelných říčních tratích*. VÚV, Praha. 1966,
- MATOUŠEK, V., KRUPÍČKA, J. (2008). *Metoda stanovení hydraulické drsnosti pohyblivého dna sklonitého koryta za povodňových průtoků*. ČVUT, Praha. 2008,
- MATOUŠEK, V. (2012). <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/drsnosti/login.htm>
- MATTAS, D. (1999). *K otázce vlivu podélného sklonu toku na zrnitostní složení materiálu dna*. Vodní hospodářství 06/1999, Čkyně. 1999,
- MATTAS, D. (2003). *Rychlostní vzorce bez součinitele drsnosti ve světle současných poznatků*. 3. Vodohospodářská konference, Práce a studie ÚVST FAST VUT, Brno. 2003,
- MATTAS, D. (2007).
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/RIN/ke_stazeni/prednasky/6/RIN_6-1.ppt
- MAYIO, A. (1997). *Volunteer stream monitoring: A methods manual*. US EPA, Washington. 1997,
- MAYS, L. W. (1999). *Hydraulic design handbook*. McGraw-Hill Co., New York. 1999,
- MORVAN, H., KNIGHT, D., WRIGHT, N., TANG, X., CROSSLEY, A. (2008). *The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulations models*. Journal of Hydraulic Research, Madrid. 2008,

- NGUYEN, H. T., FENTON, J. D. (2004). *Using two point velocity measurements to estimate roughness in streams*. Proc. 4th Austral. stream management conf., Launceston. 2004,
- NIEMIEC, Ł. (2013). *Určení nejistot při stanovení průtoků ve vodních tocích pomocí měření hydrometrickou vrtulí*. Disertační práce. FAST VUT v Brně. 2013,
- NOORDAM, D. (2005). *Uncertainty analysis of roughness modelling in rivers*. University of Twente, Enschede. 2005,
- PAARLBERG, A. J. (2008). *Modeling dune evolution and dynamic roughness in rivers*. Disertační práce, University of Twente. 2008,
- PATOČKA, C., MACURA, L. (1989). *Úpravy toků*. SNTL, Praha. 1989,
- PHILLIPS, J. V., INGERSOLL, T. L. (1998). *Verification of roughness coefficients for selected natural and constructed stream channels in Arizona*. USGS, Denver. 1998,
http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/supplementary/az_webpage.shtml
- PRAXITELIS, A. A. (1966). *A new direct method for computing the resistance to flow in open-channels*. University of Kentucky engineering research, Lexington. 1966,
- ROSGEN, D. L. (1994). *A classification of natural rivers*. Catena, vol. 22, Kindlington. 1994,
- ROSGEN, D. L. (2007). *Rosgen geomorphic channel design*. USDA, Washington. 2007,
- ROUŠAR, L., SMELÍK, L. (2012). *Počátek pohybu splavenin za vysokých hodnot relativní drsnosti*. Měření pro potřeby FRVŠ 1771/2002. VUT v Brně. 2012,
- ROUŠAR, L. (2013). *Počátek pohybu splavenin za vysokých hodnot relativní drsnosti: experiment*. Konference Juniorstav 2013, VUT Brno. 2013,
- ŘÍHA, J. (2005). *Riziková analýza záplavových území*. Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT, Brno. 2005,
- SINGH, V. P. (2003). *On the theories of hydraulic geometry*. International Journal of Sediment Research, Kindlington. 2003,
- SKLENÁŘ, P. (2004). *Hydraulické a morfologické účinky proudění v korytech malých vodních toků s revitalizačními objekty*. Doktorská práce. ČVUT, Praha. 2004,
- SMART, G., ABERLE, J., DUNCAN, M., WALSH, J. (2004). *Measurement and analysis of alluvial bed roughness*. Journal of Hydraulic Research Vol. 42, Madrid. 2004,
- SMELÍK, L. (2011). <http://sites.google.com/site/katalogdrsnosti>,
- SMELÍK, L. (2012a). *Stanovení součinitele drsnosti měřením v tocích*. Juniorstav 2012, Brno. 2012,
- SMELÍK, L., UHMANNOVÁ, H., ROUŠAR, L. (2012b). *Porovnání způsobů stanovení zrnitostních křivek materiálu dna*. Sborník z konference Vodní toky 2012, Hradec Králové. 2012,

- SMELÍK, L. (2013). <http://sites.google.com/site/vypocetdrsnosti>,
- SMETANA, J. (1957). *Hydraulika 1*. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha. 1957,
- SPREAFICO, M., HODEL, H. P., KASPAR, H. (2001). *Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fliessgewässern*. Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern. 2001,
- STARÝ, M. (2007). *Vybrané kapitoly z vodního hospodářství krajiny. Modul 03. Aplikovaná hydrologie*. Studijní opora. VUT, Brno. 2007,
- STRAATSMA, M. W., MIDDELKOO, H. (2006). *Airborne laser scanning as a tool for lowland floodplain vegetation monitoring*. In *Living Rivers: Trends and Challenges in Science and Management*, Doordrecht. 2006,
- ŠLEZINGR, M. (2010). *Říční typy I - horní tok, Úvod do problematiky úprav toků*. Mendlova univerzita v Brně, Brno. 2010,
- RIJN VAN, L. C. (1990). *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*. Aqua publications, Amsterdam. 1990,
- VENDITTI, J. G., CHURCH, M. A., BENNETT, S. J. (2005). *Bedform initiation from a flat sand bed*. *Journal of Geophysical Research*. 2005,
- VESELÝ, J. a kol. (2002). *Souhrnné hodnocení splaveninového průzkumu hlavních toků v Povodí Odry, s.p.* VUT, Brno. 2002,
- VÝBORA, P. (1981). *Navrhování úprav toků*. VUT, Brno. 1981,
- WHATMORE, S. J., LANDSTRÖM, C. (2010). *Manning's n - putting roughness to work*. Cambridge University press, Cambridge. 2010,
- WOLMAN, M. G. (1954). *A method of sampling coarse river-bed material*. Transaction, American Geophysical union. 1954,
- Yager, E. M., KIRCHNER, J. W., DIETRICH, W. E. (2007). *Calculating bed load transport in steep boulder bed channels*. *Water Resources Research*, vol. 43, Washington. 2007,
- Yen, B. CH. (1991). *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula*. Water Resources Publications, Littleton. 1991,
- Yen, B. CH. (2002). *Open channel flow resistance*. *Journal of Hydraulic Engineering*. Reston. 2002,
- ŽIC, E., VRANJEŠ, M., OŽANIĆ, N. (2009). *Methods of roughness coefficient determination in natural riverbeds*. International symposium on water management and hydraulic engineering, Ohrid. 2009,

ŽOUŽELA, M. (2005). *Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou*. Disertační práce. VUT, Brno. 2005.

- [1] <http://www.hec.usace.army.mil>
- [2] [http://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-2_UsersManual_\(CPD-2a\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-2_UsersManual_(CPD-2a).pdf)
- [3] <http://www.river-conveyance.net/download.asp>
- [4] http://www.river-conveyance.net/1_CES_UserGuide.pdf
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/Antoine_Ch%C3%A9zy
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Manning_\(engineer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Manning_(engineer))
- [7] http://cs.wikipedia.org/wiki/Robert_Manning
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Bedform>
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Sediment_transport
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Gauckler%E2%80%93Manning_coefficient
- [11] http://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_n%C3%A1dr%C5%BE_%C5%A0ance
- [12] http://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%Brod%C3%A1n%C3%A1_odchylka
- [13] <http://hydro.chmi.cz/hpps/index.php?lng=CZE>
- [14] <http://www.pod.cz/portal/sap/cz/>
- [15] <http://www.pmo.cz/portal/sap/cz/index.htm>
- [16] <http://www.tuflow.com/>
- [17] <http://mikebydhi.com/>
- [18] <http://www.hydrosoft.cz/produkty/hydrocheck/>
- [19] <http://www.rehm.de/produkte/riverpac/fluss/default.aspx>
- [20] <http://www.deltaressystems.com/hydro/products>
- [21] <http://www.flo-2d.com/>
- [22] <http://vimeo.com/35446656>
- [23] <http://www.flow3d.com/home/products/flow-3d>
- [24] <http://daad.wb.tu-harburg.de/?id=1605>
- [25] <http://www.psw-knauf.de/download/Gewaesser-Rauheiten.pdf>
- [26] http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/db/pdf/full_book.pdf,
http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/station_id.shtml,

Internetové odkazy jsou funkční k datu 25. 11. 2014.

ASTM C136-71

ČSN EN ISO 748

ČSN ISO 14688_1

TNV 75 2102

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	[m]	největší rozměr zrna,
a	[-]	parametr,
a_0	[-]	koeficient retardance,
A	[m ²]	průtočná plocha, velikost zrna ve vodorovné ose a ve směru proudění, půdorysná plocha oblasti, exponent,
$A_{\max}$	[m ²]	maximální průtočná plocha,
$A_{\min}$	[m ²]	minimální průtočná plocha,
b	[m]	šířka koryta ve dně, prostřední rozměr zrna,
B	[m]	šířka v hladině, velikost zrna ve vodorovné ose a kolmo ke směru proudění, zástupný parametr,
c	[m]	nejmenší rozměr zrna,
c_1	[-]	koeficient,
c_2	[-]	koeficient,
c_3	[-]	koeficient,
c_4	[-]	koeficient,
c_{50}	[m]	velikost 50% kvantilu nejmenšího rozměru zrna,
C	[m ^{1/2} ·s ⁻¹]	rychlostní součinitel, velikost zrna ve svislé ose,
C^*	[-]	efektivní třecí koeficient,
C_{celk}	[m ^{1/2} ·s ⁻¹]	výsledný Chézyho rychlostní součinitel (mikro- a makro-drsnost),
C_D	[-]	odporový koeficient,
C_s	[-]	koncentrace zrn v suspenzi,
d	[m]	velikost zrna (obecně),
d_{ef}	[m]	velikost efektivního zrna,
d_k	[m]	průměr kmene stromu,
$d_{k,i}$	[m]	i-tý průměr kmene stromu,
$d_{\max}$	[m]	maximální velikost zrna v lokalitě,
d_n	[-]	koeficient vyjadřující vliv změny příčných profilů po délce toku,
d_s	[m]	velikost středního zrna,

d_x	[m]	velikost kvantilu zrna, kde $x = 16, 35, 50, 55, 65, 75, 80, 84, 90, 100$,
d_w	[m]	charakteristická velikost zrna,
f	[-]	součinitel ztrát třením (označení v některých podkladech),
f_i	[-]	i-tý faktor,
$\bar{f}$	[-]	průměr hodnot vypočítaných faktorů,
F_i	[N]	poměr veličin,
Fr	[-]	Froudovo číslo,
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení,
G	[-]	vyjádření tvaru zrn,
G_c	[-]	změna rozměru zrn nebo drsnosti stěn v profilu,
h	[m]	průměrná hloubka,
$h_{i,m}$	[m]	naměřená hladina v i-tém profilu,
$h_{i,v}$	[m]	vypočtená hladina v i-tém profilu,
$h_{\max}$	[m]	kolmá vzd. od příčného profilu k místu s největší bod. rychlostí,
$h_{\max,i}$	[m]	i-tá kolmá vzdálenost od svahu k místu s největší bod. rychlostí,
h_{veg}	[m]	výška vegetace,
H	[m n. m.]	úroveň hladiny,
H_i	[m n. m.]	úroveň hladiny v horním profilu,
H_{i+1}	[m n. m.]	úroveň hladiny v dolním (následujícím) profilu,
H_{duny}	[m]	průměrná výška dun,
i_E	[-]	podélný sklon čáry energie,
i_D	[-]	podélný sklon dna,
i_H	[-]	podélný sklon hladiny,
J	[-]	podélný sklon hladiny (označení v některých podkladech),
J_0	[-]	podélný sklon dna (označení v některých podkladech),
J_f	[-]	podélný sklon čáry energie (označení v některých podkladech),
J_w	[-]	podélný sklon hladiny (označení v některých podkladech),
k	[m]	absolutní drsnost,
k_{celk}	[m]	výsledná absolutní drsnost od materiálu dna a dun,

k_{duny}	[m]	absolutní drsnost dnových útvarů - dun,
k_N	[m]	Nikuradseho hydraulická drsnost,
k_s, k_{st}	[m]	Stricklerova hydraulická drsnost,
k_{zrn}	[m]	absolutní drsnost materiálu dna - zrn,
L	[m]	délka sledovaného úseku,
L_{duny}	[m]	průměrná délka dun,
m	[-]	Bazinův součinitel drsnosti, koeficient, sklon svahů (1:m),
m	[kg]	hmotnost odebraného vzorku materiálu,
MAX_i	[-]	konstanta i-tého faktoru,
MIN_i	[-]	konstanta i-tého faktoru,
m_{min}	[kg]	minimální hmotnost odebraného vzorku materiálu,
m_5	[-]	koeficient meandrovitosti dle Cowanovy metody,
m_6	[-]	koeficient vodního stavu dle Rozšířené Cowanovy metody,
n	[-]	Manningův součinitel drsnosti,
n_0	[-]	dílčí součinitel drsnosti materiálu povrchu dle Cowanovy metody,
n_1	[-]	dílčí součinitel drsnosti nerovností omočeného obvodu dle Cowanovy metody,
n_2	[-]	dílčí součinitel drsnosti od změn průtočného profilu dle Cowanovy metody,
n_3	[-]	dílčí součinitel drsnosti překážek v korytě dle Cowanovy metody,
n_4	[-]	dílčí součinitel drsnosti korytové vegetace dle Cowanovy metody,
n_i	[-]	počet kmenů o průměru d_i , součinitel drsnosti dílčí části koryta,
n_c	[-]	ekvivalentní hodnota celkového součinitele drsnosti koryta,
n_{celk}	[-]	celkový Manningův součinitel drsnosti (mikro- a makro-drsnost),
n_{Cowan}	[-]	Manningův součinitel drsnosti stanovený Cowanovou metodou,
n_{Cowan+}	[-]	Manningův souč. drsnosti stanovený Rozšířenou Cowanovou met.,
n_{foto}	[-]	Manningův souč. drsnosti stanovený fotografickým katalogem,
n_m	[-]	součinitel drsnosti stanovený z měření,

$n_{rovnice}$	[-]	Manningův součinitel drsnosti získaný empirickými rovnicemi dle Metodiky,
$n_{rovnice+Cowan+}$	[-]	Manningův součinitel drsnosti stanovený jako průměr hodnot součinitelů drsnosti získaných empirickými rovnicemi dle Metodiky a Rozšířenou Cowanovou metodou,
n_{tab}	[-]	Manningův součinitel drsnosti stanovený tabulkami,
$n_{tab-filtr}$	[-]	Manningův součinitel drsnosti stanovený filtrováním tabulek,
n_v	[-]	Manningův součinitel drsnosti vypočítaný empirickou rovnicí,
N	[-]	počet měření,
O	[m]	omočený obvod,
O_i	[m]	omočený obvod dílčí části koryta,
P_1	[-]	počet „shod“,
P_2	[-]	průměrné pořadí „shod“,
P_3	[-]	maximální hodnota průměrného pořadí „shod“ P_2 ,
P_4	[-]	parametr k výpočtu pořadí empirických rovnic způsobem Z3/Z6,
P_s	[-]	celkový počet stromů,
Q	[m ³ ·s ⁻¹]	objemový průtok,
R	[m]	hydraulický poloměr,
R'	[m]	hydraulický poloměr mikrodrsnostních prvků,
R''	[m]	hydraulický poloměr makrodrsnostních prvků,
Re	[-]	Reynoldsovo číslo,
Re_*	[-]	třetí Reynoldsovo číslo,
s	[-]	výběrová směrodatná odchylka,
s_k	[m]	span kmenů (vzdálenost mezi kmeny stromů),
S	[-]	podélný sklon hladiny (značení v jiné literatuře),
S_0	[-]	podélný sklon dna (značení v jiné literatuře),
S_f	[-]	podélný sklon čáry energie (značení v jiné literatuře),
S_w	[-]	podélný sklon hladiny (značení v jiné literatuře),
T	[°C]	teplota vody,
v	[m·s ⁻¹]	průměrná profilová rychlost,

v_*	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	třecí rychlost,
U	$[-]$	ustálenost proudu,
x	$[-]$	exponent, obecná veličina,
x_i	$[-]$	obecná veličina,
$\bar{x}$	$[-]$	průměr hodnot obecné veličiny,
y	$[-]$	koeficient, exponent,
α	$[-]$	Coriolisovo číslo, úhel sklonu dna koryta,
γ	$[-]$	tvarový faktor dle sklonu sestupného svahu dun, měrná tíha,
Γ	$[-]$	vyjádření vztahu podélného sklonu osy koryta,
δ_p	$[-]$	vyjádření příčného proudění,
Δ	$[\text{m}]$	absolutní drsnost,
Δ_a	$[-]$	absolutní rozdíl z měření stanovených a vypočtených s. drsnosti,
Δ_r	$[-]$	relativní rozdíl z měření stanovených a vypočtených s. drsnosti,
η	$[-]$	vyjádření tvaru profilu,
η'	$[-]$	podélné změny tvaru koryta,
θ	$[-]$	Shieldsovo kritérium,
κ	$[-]$	von Kármánova konstanta (0,41),
λ	$[-]$	součinitel ztrát třením,
μ	$[-]$	dynamická viskozita,
μ_t	$[-]$	turbulentní viskozita,
ξ	$[-]$	součinitel místních ztrát, tvar zrn,
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota vody,
ρ_b	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota materiálu dna ($2\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
ρ_s	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota zrn ($2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
τ	$[\text{Pa}]$	smykové napětí,
ν	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita vody,
χ	$[-]$	soudržnost zrn (koheze),
Ω	$[-]$	uspořádání koryta (meandrování).

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

1D / 1,5 D / 2D / 3D	jedno-, jedno a půl-, dvou-, troj-dimenzionální model,
ADCP	ultrazvukový sonar (Acoustic Doppler Current Profiler),
ASTM	American Society for Testing and Materials,
CES	softwarový produkt (Conveyance estimation system) [3],
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav,
ČR	Česká republika,
ČVUT	České vysoké učení technické,
DHI	Danish Hydraulic Institute (vodohospodářská firma),
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau,
FRVŠ	Fond rozvoje vysokých škol,
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (softwarový produkt) [1],
LB	levý břeh (svah),
max	maximum,
MED	medián,
min	minimum,
MNČ	Metoda nejmenších čtverců,
Mor.	Morávka - řeka,
MS	Microsoft,
OP_i	okrajová podmínka,
opt	optimum,
PF	profil,
PB	pravý břeh (svah),
prů	průměr,
SI	mezinárodní soustava jednotek fyzikálních veličin (Système International d'Unités),
SO	Subjektivní odhad,
s.p.	státní podnik,
SR	sítový rozbor,

TPE	technicko provozní evidence,
US	angloamerická měrná soustava (United States customary units),
USSCS	United States Soil Conservation Service
UTC	koordinovaný světový čas (Coordinated Universal Time),
VD	vodní dílo,
VSO	výběrová směrodatná odchylka,
VÚV, VÚVH	Výzkumný ústav vodohospodářský,
Žer. př.	Žermanický přivaděč.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	<i>Charakter proudění a tečná napětí ve složeném korytě (Klouček, 2008)</i>	16
Obr. 2	<i>Krycí vrstva dna koryta v lokalitě Skryje</i>	17
Obr. 3	<i>Zařízení pro liniové měření výstupků</i>	18
Obr. 4	<i>Schématické znázornění dnových útvarů</i>	21
Obr. 5	<i>Předpokládané oblasti s dnovými útvary</i>	21
Obr. 6	<i>Vizualizace 2D a 3D dun</i>	21
Obr. 7	<i>Shieldsův diagram</i>	24
Obr. 8	<i>Ukázka výstupů laserového skenování pro les a náletové dřeviny</i>	30
Obr. 9	<i>Relativní rozdíly hloubek a hydraulických poloměrů použitých dat</i>	39
Obr. 10	<i>Odebraný jemnozrnný materiál dna z lokality Rychmanov po síťovém rozboru</i>	41
Obr. 11	<i>Odebraný hrubozrnný materiál dna z lokality Skryje po síťovém rozboru</i>	41
Obr. 12	<i>Ukázka stanovení křivky zrnitosti pro různé počty zrn jemnozrnného materiálu - lokalita Rychmanov</i>	43
Obr. 13	<i>Ukázka stanovení křivky zrnitosti pro různé počty zrn hrubozrnného materiálu - lokalita Morávka-VD</i>	43
Obr. 14	<i>Přiřazení rozměru zrna d_{ef} k nejbližšímu kvantilu</i>	45
Obr. 15	<i>Porovnání poměrů velikostí zrn podle uložení v toku</i>	46
Obr. 16	<i>Zrnitostní křivky stanovené různými metodami a autory v lokalitě Šance-VD</i>	47
Obr. 17	<i>Zrn. křivky stanovené různými metodami a autory v lokalitě Vyšní Lhoty (Mor.)</i>	47
Obr. 18	<i>Vodočetná lať na Mohelnici v Raškovcích za zvýšeného vodního stavu</i>	49
Obr. 19	<i>Závislost součinitele drsnosti a průtoku ve sledovaných lokalitách</i>	50
Obr. 20	<i>Závislost součinitele drsnosti a průměrné hloubky ve sledovaných lokalitách</i>	50
Obr. 21	<i>Diagram tvorby a výpočtu součinitele drsnosti navrženou Metodikou</i>	53
Obr. 22	<i>Nesprávně interpolovaný příčný řez</i>	62
Obr. 23	<i>Správně interpolovaný příčný řez</i>	62
Obr. 24	<i>Nesprávně interpolovaný úsek toku</i>	63
Obr. 25	<i>Správně interpolovaný úsek toku</i>	63
Obr. 26	<i>Vodní skok indikující v podélném řezu nesprávnou interpolaci mezi příč. profily</i>	63

Obr. 27	<i>Podélný řez se správnou interpolací mezi příčnými profily</i>	63
Obr. 28	<i>Rozložení relativních rozdílů z měření stanovených a vypočítaných součinitelů drsnosti empirickými rovnicemi dle Metodiky</i>	75
Obr. 29	<i>Rozložení absolutních rozdílů z měření stanovených a vypočítaných součinitelů drsnosti empirickými rovnicemi dle Metodiky</i>	75
Obr. 30	<i>Rozhodovací strom pro volbu součinitele drsnosti</i>	83
Obr. 31	<i>Lokalita Petřvald na řece Lubině</i>	84
Obr. 32	<i>Srovnání průběhu intervalů relativních rozdílů součinitelů drsnosti stanovených z měření v tocích a vypočtených jednotlivými přístupy</i>	91
Obr. 33	<i>Závislost průměrné hodnoty koeficientu m na kvantilu d_x</i>	97
Obr. 34	<i>Schématické znázornění $h_{\max}$ v nepravidelném korytě</i>	99
Obr. 35	<i>Přírozně armovaný materiál dna v lokalitě Raškovice</i>	100
Obr. 36	<i>Srovnání poměrů velikostí jednotlivých os zrn materiálu dna ve sledov. lokalitách</i>	101
Obr. 37	<i>Trsy vodní trávy v korytě Chrudimky pod přehradou Křižanovice II</i>	102
Obr. 38	<i>Histogram četnosti součinitelů drsnosti vypočtených empirickými rovnicemi</i>	107
Obr. 39	<i>Vstupní parametry pro výpočet součinitele drsnosti empirickými rovnicemi dle Metodiky</i>	108

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	<i>Orientační minimální hmotnost odebíraného vzorku materiálu dna</i>	19
Tab. 2	<i>Stanovení retardance travních porostů - upraveno na základě (Mattas, 2007)</i>	26
Tab. 3	<i>Součinitel drsnosti stanovený dle retardance</i>	26
Tab. 4	<i>Kombinace parametrů a exponentů rovnice (31)</i>	32
Tab. 5	<i>Hodnoty koeficientu m dle různých autorů v závislosti na velikosti zrna</i>	35
Tab. 6	<i>Přehled hodnot exponentů y různých autorů (Havlik, 2005)</i>	36
Tab. 7	<i>Seznam dlouhodobě sledovaných lokalit</i>	38
Tab. 8	<i>Orientační rozdělení materiálu dna koryta na jednotlivé frakce</i>	44
Tab. 9	<i>Blízkost d_{ef} ke kvantilům křivky zrnitosti</i>	45
Tab. 10	<i>Mediány největších rozměrů zrn a u sledovaných lokalit dle směru uložení</i>	46
Tab. 11	<i>Vliv koeficientu c_1 na součinitel drsnosti v rovnicích typu A1</i>	55

Tab. 12	<i>Typové empirické rovnice pro výpočet součinitele drsnosti</i>	56
Tab. 13	<i>Rozmezí veličin vlastních a externích měření</i>	58
Tab. 14	<i>Rozmezí hodnot parametrů v jednotlivých podkategoriích</i>	59
Tab. 15	<i>Nalezení reprezentativního součinitele drsnosti pomocí MNČ</i>	60
Tab. 16	<i>Četnost výskytů absolutních rozdílů vypočtených a naměřených úrovní hladin</i>	61
Tab. 17	<i>Vliv souč. zúžení a rozšíření na výpočet úrovní hladin v programu HEC-RAS</i>	61
Tab. 18	<i>Vliv interpolovaných příčných profilů na průběhy hladin</i>	62
Tab. 19	<i>Počty použitých rovnic a stavů</i>	64
Tab. 20	<i>Procentuální rozložení relativních a absolutních rozdílů n_m a n_v</i>	65
Tab. 21	<i>Počet vstupních dat (měření) v jednotlivých podkategoriích a zdrojích</i>	66
Tab. 22	<i>Počet vypočítaných hodnot souč. drsnosti v jednotlivých podkategoriích a zdrojích</i>	66
Tab. 23	<i>Ukázka výpočtu výběrové směrodatné odchylky a mediánu relativních rozdílů z měření stanovených a vypočtených součinitelů drsnosti</i>	67
Tab. 24	<i>Ukázka výběru nejvhodnějších empirických rovnic jedné podkategorie - 1.fáze</i>	68
Tab. 25	<i>Příklad stanovení pořadí empirických rovnic dle jednotlivých způsobů</i>	70
Tab. 26	<i>Počty jednotlivých typů empirických rovnic a jejich stavů dle tříd kvality</i>	71
Tab. 27	<i>Volba nejlepších způsobů stanovení součinitele drsnosti</i>	73
Tab. 28	<i>Vhodnost různých kombinací jednotlivých způsobů Z pro výpočet souč. drsnosti</i>	74
Tab. 29	<i>Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření a výpočtem empirickými rovnicemi dle Metodiky</i>	76
Tab. 30	<i>Ukázka rozdílnosti hodnot součinitele drsnosti stejného typu koryta v tabulkách</i>	77
Tab. 31	<i>Základní charakteristiky koryta a profilů</i>	78
Tab. 32	<i>Základní vlastnosti svahů koryta</i>	79
Tab. 33	<i>Základní vlastnosti dna koryta</i>	80
Tab. 34	<i>Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření, filtrováním více tabulek a vybranými tabulkami</i>	81
Tab. 35	<i>Porovnání souč. drsnosti stanovených z měření a dle fotografického katalogu</i>	85
Tab. 36	<i>Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření, Cowanovou metodou a Rozšířenou Cowanovou metodou</i>	89
Tab. 37	<i>Srovnání kvality zkoumaných přístupů pro stanovení součinitele drsnosti</i>	91
Tab. 38	<i>Porovnání součinitelů drsnosti stanovených z měření a různými přístupy</i>	92

Tab. 39	<i>Porovnání součtů absolutních rozdílů typových rovnic po kalibraci koeficientů</i>	96
Tab. 40	<i>Porovnání součtů absolutních rozdílů typových rovnic A1 a A2 po kalibraci koeficientů c_1 a c_2 v podkategoriích</i>	96
Tab. 41	<i>Porovnání počtů a hodnot koef. m jednotlivých kvantilů d_x u rovnic v Metodice</i>	97

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Základní informace o vlastních měřeních a sledovaných lokalitách
Příloha 2	Zaměřené body příčných profilů
Příloha 3	Parametry vlastních sledovaných koryt dle jednotlivých měření
Příloha 4	Výsledky síťových rozborů
Příloha 5	Rozměry zrn odebraných Wolmanovou metodou
Příloha 6	Subjektivní odhady
Příloha 7	Seznam empirických rovnic použitých v navrhované Metodice
Příloha 8	Rozšířená Cowanova metoda