

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

MEZE POHYBU A KVANTIFIKACE MNOŽSTVÍ DNOVÝCH SPLAVENIN PRO ŠTĚRKONOSNÉ TOKY

THE LIMITS OF MOVEMENT AND QUANTIFICATION OF BEDLOAD AMOUNT FOR GRAVEL-BED
RIVERS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE- zkrácená verze
DOCTORAL THESIS - SHORT VERSION

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. LADISLAV ROUŠAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV VESELÝ, CSc.

BRNO 2014

KLÍČOVÁ SLOVA

Krycí vrstva, Nikuradseho ekvivalentní písková drsnostní výška, počátek pohybu splavenin, přírodní spádový stupeň, rychlostní profil, statické armování (třídění), transport dnových splavenin.

KEY WORDS

Surface layer, Nikuradse's equivalent sand roughness height, incipient of sediment motion, river widening, velocity profile, static armouring (sorting), bedload.

MÍSTO ULOŽENÍ ORIGINÁLU DISERTAČNÍ PRÁCE

Knihovnické informační centrum

Fakulty stavební VUT v Brně

Veveří 95

602 00 Brno

Telefon: 541 147 171, 541 147 175

E-mail: library@fce.vutbr.cz

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ.....	5
3 STANOVENÍ POČÁTKU POHYBU DNOVÝCH SPLAVENIN	6
3.1 Teoretická analýza počátku pohybu.....	6
4 POČÁTEK POHYBU A TRANSPORT STEJNOZRNNÝCH SPLAVENIN ZA MALÝCH RELATIVNÍCH HLOUBEK	7
4.1 Popis experimentu.....	7
4.2 Vyhodnocení a dílčí závěry.....	10
4.2.1 Absolutní počátek pohybu splavenin.....	10
4.2.2 Transport splavenin	10
4.2.3 Dílčí závěry	12
5 TVAR RYCHLOSTNÍHO PROFILU V BLÍZKOSTI DNA A HYDRAULICKÝ ODPOR ZA MALÝCH RELATIVNÍCH HLOUBEK	12
5.1 Měření bodových rychlostí při absolutním počátku pohybu splavenin	12
5.2 Vyhodnocení bodových rychlostí a dílčí závěry	13
5.3 Numerický model.....	15
5.3.1 Laserové skenování dna	15
5.3.2 Popis geometrie a výpočetní oblasti	15
5.3.3 Okrajové podmínky a parametry výpočtu	16
5.3.4 Výsledky numerického modelu	16
5.3.5 Vyhodnocení a dílčí závěry	17
6 ARMOVACÍ PROCES KRYCÍ VRSTVY NESTEJNOZRNNÉHO MATERIÁLU DNA ZA MALÝCH RELATIVNÍCH HLOUBEK	18
6.1 Popis experimentu.....	18
6.2 Vyhodnocení a dílčí závěry.....	20
6.2.1 Absolutní počátek pohybu splavenin.....	20
6.2.2 Transport splavenin	21
6.2.3 Třídění zrn v krycí vrstvě	22
7 VLIV VYTŘÍDĚNOSTI KRYCÍ VRSTVY NA HYDRAULICKOU DRSNOST.....	23
8 OVĚŘENÍ POZNATKŮ NA PŘÍRODNÍM SPÁDOVÉM STUPNI	24
8.1 Posuzovaná lokalita.....	25
8.2 Splaveninový režim a vývoj úrovně dna koryta.....	25
8.2.1 Popis modelu.....	25
8.3 Dílčí Závěry	27
9 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ.....	28
10 LITERATURA	30

CURRICULUM VITAE I
SUMMARY III

1 ÚVOD

Přirozený vývoj koryta toku se považuje za dynamický systém, který utvářejí říční procesy jako eroze, usazování a transport splavenin. Říční procesy jsou vyvolány proudem vody, který působí na materiál dna a svahů a vyvolává tak odporové síly. Při překonání odporových sil se materiál dostává do pohybu a nastává transport splavenin, který může být realizován po dně (dnové splaveniny) nebo v suspenzi (plaveniny). Vodní toky se snaží dosáhnout rovnovážného stavu, kdy sklon, šířka i hloubka koryta jsou z dlouhodobého hlediska neměnné. V případě, kdy odporové síly jsou větší než síly vyvolávající pohyb splavenin, materiál se usazuje. Velikost a směr výslednice výše uvedených sil vyvolává říční proces.

Mezi hlavní cíle říčního inženýrství patří prognóza vývoje dna toku (počátek pohybu splavenin, transport splavenin, aj.) závislá na charakteristikách proudu, povrchu dna a transportovaném množství splavenin (*Bettess a Frangipane, 2003*). Dno se vyvíjí přirozeně, antropogenními zásahy nebo jejich kombinací.

Stanovení počátku pohybu splavenin je jedna ze základních klíčových otázek spojená s transportem splavenin. Přesné definování a správné určení kritérií počátku pohybu je od dob Shieldsova experimentu často diskutované téma. Navazující experimenty a postupné upřesňování kritérií pro různé podmínky proudění přináší nové poznatky pro určování stability a vývoje říčních koryt, zhodnocení biotopu, ochranu živočichů nebo porozumění procesům vývoje povrchu planet (*Lamb a kol., 2008*). Současné výsledky výzkumů pro specifické podmínky, jako je proudění o malých hloubkách při velké drsnosti, zatím nepodávají jednotné závěry a kritéria, která počátek pohybu a transport určují, jsou interpretována různě.

2 CÍLE PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ

Doktorská disertační práce (DDP) si klade za cíl sjednotit současné poznatky a stanovit počátek pohybu dnových splavenin a transport splavenin na šterkonosných tocích pro stejnozrné a nestejnozrné materiály dna při plně turbulentním proudění o malých hloubkách vody (malé relativní hloubky), které je charakteristické pro horské toky. Dalším cílem DDP je prošetřit vlivy možných parametrů na počátek pohybu splavenin a zvláště objasnit vlivy malé relativní hloubky, statického armování (vytvoření „dnové dlažby“) a struktury rychlostního pole v blízkosti dna.

Zvolená metoda řešení cílů DDP spočívá v provedení experimentálních výzkumů, numerických simulací a měření v terénních podmínkách. Uvedené cíle jsou řešeny následujícím postupem:

- Laboratorní experimenty s přibližně stejnozrným materiálem dna (materiál jedné zrnitostní frakce) jsou zaměřeny na stanovení počátku pohybu a na popis rychlostního profilu UVP (Ultrasonic Velocity Profile) Monitorem v jeho blízkosti, který určuje silový účinek proudu na zrna. Součástí vyhodnocení rychlostního profilu je stanovení velikosti Nikuradseho ekvivalentní pískové drsnostní výšky k_s pro použitý materiál ve vztahu k jeho zrnitostním charakteristikám a určení součinitele tření v závislosti na relativní hloubce. Rychlostní profil je porovnán s rychlostním profilem stanoveným trojrozměrným numerickým modelem, což je základní podmínka pro určení

počátku pohybu zrn a použitelnost vybraného numerického modelu pro transport splavenin. Dále jsou provedeny experimenty stanovující průtok splavenin při rovnoměrném proudění a při přibližně rovném dně bez dnových útvarů pro stanovení transportní rovnice za daných podmínek.

- V další části je proveden experiment popisující vliv třídění nestejnozrného materiálu krycí vrstvy dna při statickém armování (bez přísunu splavenin) na počátek pohybu splavenin za malých hodnot relativní hloubky h/k_s . Rychlostní profil je měřen UVP Monitorem pro různé stupně vytrídění materiálu krycí vrstvy dna a z nich je stanovena Nikuradseho ekvivalentní písková drsnostní výška pro nestejnozrný materiál ve vztahu k jeho zrnitostním charakteristikám.
- V poslední části DDP je provedena simulace transportu splavenin zvoleným numerickým modelem verifikovaným experimentálními výzkumy. Vývoj koryta toku je následně porovnán se skutečným vývojem koryta za malých hodnot relativní hloubky.

3 STANOVENÍ POČÁTKU POHYBU DNOVÝCH SPLAVENIN

Počátek pohybu splavenin je definován překročením kritické hodnoty vybrané veličiny tzv. kvantifikátoru. Je to stav, kdy je do pohybu uvedeno první zrn (absolutní počátek pohybu) nebo určité množství zrn (všeobecný počátek pohybu), které je kvantifikované vizuálními (např. dle Kramera, 1935) (*Buffington*, 1999), extrapolacími a analytickými metodami (*Buffington a Montgomery*, 1997). Počátek pohybu stanovený vizuální metodou je definován pohybem prvního zrna nebo pohybem určeného počtu zrn. Při extrapolací metodě je počátek pohybu stanoven z transportu splavenin zpětně na základě referenční hodnoty, např. bezrozměrným specifickým průtokem splavenin

$$q^* = \frac{q_{bv}}{(\Delta g d^3)^{0,5}}, \quad (3-1)$$

kde q_{bv} je specifický objemový průtok splavenin, $\Delta = \rho_s/\rho - 1$ je relativní hustota splavenin pod vodou, ρ_s je hustota zrn, ρ je hustota vody, g je tíhové zrychlení a d je průměr zrna splavenin. Zrna jsou již transportována, dno je přetvářeno a mohou se na něm vytvářet dnové útvary (vrásky, duny) měnící hydraulické podmínky. Absolutní počátek pohybu je vhodný pro posuzování stability opevnění (kamenné pohozy, záhozy) nebo konstrukcí (balvanité skluzy, bezpečnostní přelivy), kde uvolněné zrn může vyvolat proces celkové destrukce. Všeobecný počátek pohybu obvykle určuje dolní limit transportní rovnice.

3.1 TEORETICKÁ ANALÝZA POČÁTKU POHYBU

Stanovení počátku pohybu ponořených stejně velkých nesoudržných kulových zrn uložených na rovném vodorovném dně je závislé na charakteristikách proudu na dně a na charakteristikách zrna a jeho uložení ve dně, tedy na u_* třecí rychlosti, hloubce h , hustotě vody, kinematické viskozitě vody ν a na hustotě zrn pod vodou, úhlu vnitřního tření zrn $\tan\phi$, průměru zrn a na tíhovém zrychlení.

Z rozměrové analýzy vyplývá (Yalin, 1972; Novak a Čábelka, 1981; Ettema, 2000), že počátek pohybu pro rovný a vodorovný povrch dna je dán funkční závislostí

$$Fr_*^2 = f_1 \left\{ \Delta, \tan \varphi, Re_*, \frac{h}{d} \right\}, \quad (3-2)$$

kde $Fr_* = u_*/(gd)^{1/2}$ je Froudovo třecí kritérium, $Re_* = (u_*d)/\nu$ je Reynoldsovo třecí kritérium. Zavedením Shieldsova kritéria (pro vodorovné dno) $\theta = Fr_*^2/\Delta$ přejde funkční závislost (3-2) do tvaru

$$\theta = f_2 \left\{ \tan \varphi, Re_*, \frac{h}{d} \right\}. \quad (3-3)$$

V případě skloněného dna je pohyb zrn ovlivněn směrem působící tíhové síly způsobující zvětšení unášecí síly a zmenšení třecí síly (Fernández Luque, 1974; Fernández Luque a Van Beek, 1976; Mizuyama, 1977; Bathurst a kol., 1987; Whitehouse a Hardisty, 1988; Chiew a Parker, 1994; Damgaard a kol., 1997; Lau a Engel, 1999; Zanke, 2003; Lamb a kol., 2008). Sklon dna má vliv pouze na Froudovo třecí kritérium, tedy ve funkčním vztahu (3-3) pouze na Shieldsovo kritérium (nemění hodnotu φ). Vztah vyjádřený z momentové rovnováhy (Fernández Luque, 1974) a také ze silové rovnováhy (Chiew a Parker, 1994), případně s použitím rozměrové analýzy (Lau a Engel, 1999) a ověřený měřeními (Fernández Luque, 1974; Chiew a Parker, 1994; Dey a Debnath, 2000) je

$$\theta = \theta_\alpha \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi - \alpha)} = \theta_\alpha \cos \alpha \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \right). \quad (3-4)$$

Pomocí vztahu (3-4) lze přepočítat Shieldsovo kritérium obdržené z měření pro daný sklon dna θ_α na Shieldsovo kritérium pro vodorovné dno θ .

4 POČÁTEK POHYBU A TRANSPORT STEJNOZRNNÝCH SPLAVENIN ZA MALÝCH RELATIVNÍCH HLOUBEK

Z rozměrové analýzy (3-3) vyplývá, že počátek pohybu vyjádřený hodnotou Shieldsova kritéria θ je závislý i na relativní hloubce h/d (Neill, 1967; Yalin 1972; Bogárdi, 1978; Novak a Čábelka, 1981; Ettema, 2000; Dey a Raju, 2002).

Z provedené rešerše mnoha autorů vyplývají protikladné závěry. V současné době nelze jednoznačně určit obecnou závislost Shieldsova kritéria na relativní hloubce, proto bylo třeba provést vlastní měření, které by danou závislost pro určité podmínky jednoznačně stanovilo.

4.1 POPIS EXPERIMENTU

Experimenty byly provedeny v Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Použit byl 6 m dlouhý, 0,5 m široký a 0,5 m vysoký sklopný žlab (Obr. 4.1) v rozsahu sklonu i od 0 % do 7 % s bočními stěnami z průhledného plexiskla. Dno bylo zdrsněno betonovými příčnými prahy s výškou, šířkou a vzájemnou odlehlostí 8 mm, aby byl odstraněn nežádoucí smyk zrna po povrchu dna. Na zdrsněný povrch byla

uložena zrna určité frakce, pojezdem urovnána a ztuhnána dusáním deskou. Tloušťka vrstvy materiálu byla minimálně $3d$, aby byly splněny podmínky pro uložení zrn (Salem, 2013), a maximálně $5d$, aby se eliminoval vliv podpovrchového průtoku. Aby bylo možné vyhodnotit vliv relativní drsnosti a nikoliv uspořádání zrn na hodnotu Shieldsova kritéria, byla povrchová vrstva zrn materiálu uložena tak, aby odpovídala rovnému dnu dle hodnocení Fentona a Abotta (1977).



Obr. 4.1 Vlevo pohled na sklopný žlab, v popředí žlabu nátok s polohovacím zařízením žlabu, vpravo pohled do žlabu na urovnaný materiál

Nátoková a odtoková část žlabu byly uzpůsobeny tak, aby v místě měření ($2/3$ délky žlabu) bylo zajištěno rovnoměrné proudění s plně vyvinutým rychlostním profilem. K uklidnění kinetické energie proudu byly na přítoku umístěny děrované síto, deska z polystyrenu a přítok byl zdrsněn vyskládanými kameny frakce 100 mm, aby se rychlostní profil vyvinul na kratší délce. Na konci žlabu byla umístěna výškově nastavitelná přehrážka zasahující vždy do střední úrovně zrn v krycí vrstvě, která zabezpečovala fixaci vrstvy zrn. Při říčním proudění byla hladina na odtoku vzdouvána hradítky. K zachycení pohybujícího se materiálu byl odtok vystrojen lapačem splavenin v podobě děrovaného síta. Rozsah průtoku byl volen od $0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,036 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, aby poměr $b/h > 5$ (b je šířka žlabu) a neprojevil se tak vliv bočních stěn (Julien, 2010).

Bylo použito 6 frakcí těžného přírodního (zaobleného) kameniva 6–8, 8–10, 10–16, 16–20, 20–25, 25–31,5 [mm]. U jednotlivých frakcí byl odebrán vzorek 100 zrn, na kterých digitálním posuvným měřidlem (chyba měřidla 0,02 mm) byly změřeny rozměry a (délka), b (šířka) a c (tloušťka). Z hodnot byly vypočítány průměrné hodnoty, tvarové indexy a Coreyho tvarový faktor $Co = c/(ab)^{1/2}$. Stanovena byla hustota zrn metodou vážení pod vodou, objemová hmotnost zrn ρ_{sm} z jednotkového objemu, úhel vnitřního tření φ ze sklonu nasypaného svahu a pórovitost splavenin n z objemu vody nalitého do jednotkového objemu s materiálem. Vypočítané a změřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.1 a pro dvě frakce zobrazeny na Obr. 4.2.

Tab. 4.1 Vlastnosti kameniva

frakce [mm]	a [mm]	$b \approx d$ [mm]	c [mm]	Co [-]	ρ_s [kg·m ⁻³]	ρ_{sm} [kg·m ⁻³]	φ [°]	n [-]	k_t [m·s ⁻¹]
6–8	11,7	8,1	5,7	0,59	2674	1557	35,3	0,42	0,030
8–10	13,7	9,5	6,0	0,52	2611	1567	39,5	0,40	0,036
10–16	19,5	14,6	9,9	0,58	2876	1733	38,5	0,40	0,061
16–20	28,2	20,3	13,9	0,58	2567	1400	39,9	0,45	0,082
20–25	34,3	25,3	16,8	0,57	2632	1533	41,5	0,42	0,084
25–31,5	43,0	31,5	21,5	0,58	2684	1553	38,8	0,42	0,098



Obr. 4.2 Vlevo frakce 25–31,5, vpravo frakce 10–16

Hloubka vody h byla měřena délkovým měřidlem s přesností ± 1 mm a byla určena jako kolmá vzdálenost časově a plošně zprůměrované úrovně hladiny a střední úrovně povrchu zrn. Měření probíhalo přes boční stěnu z důvodu neovlivnění stability zrn délkovým měřidlem. Úroveň dna byla stanovena $0,2b$ pod vrcholem zrn na základě tvaru rychlostního profilu (Grass, 1971; Bayazit, 1982; Dwivedi, 2010) a to pro všechny průtoky. Průtok Q byl stanoven elektromagnetickým průtokoměrem s 1 % nejistotou. Absolutní počátek pohybu každé frakce byl určen vizuálně při postupné změně sklonu dna za rozsahu průtoků uvedených v Tab. 4.2 splňujících podmínku neovlivnění proudění povrchovým napětím $h \geq 0,015$ m (Novak a Čábelka, 1981). Při absolutním počátku pohybu byly UVP Monitorem XW-PSi přes hladinu s použitím 4 MHz sondy (Zachoval a kol., 2011) změřeny bodové rychlosti po hloubce a traverzováním v ose žlabu i po její délce. Z těchto změřených rychlostí byly stanoveny průběhy časově a plošně středních rychlostí po hloubce proudu \bar{u} v rozsahu od $h/d = 0,1$ do úrovně 0,015 m pod hladinu (omezení vlivem měřidla).

Tab. 4.2 Rozsah měření pro absolutní počátek pohybu

frakce [mm]	h [m]	Q [m ³ ·s ⁻¹]	$i = \sin \alpha$ [%]	h/d [-]	Re^* [-]	θ [-]
6–8	0,030-0,058	0,0079-0,0198	1,0-2,0	3,70-7,16	523-603	0,038-0,050
8–10	0,019-0,062	0,0050-0,0235	1,0-3,5	1,95-6,25	699-823	0,036-0,049
10–16	0,023-0,072	0,0073-0,0329	1,5-4,0	1,68-4,97	1286-1504	0,036-0,047
16–20	0,021-0,085	0,0045-0,0329	1,5-6,0	1,05-4,18	1976-2327	0,041-0,054

frakce [mm]	h [m]	Q [m ³ ·s ⁻¹]	$i = \sin\alpha$ [%]	h/d [-]	Re_* [-]	θ [-]
20–25	0,032-0,077	0,0098-0,0360	2,5-5,0	1,23-3,05	2899-3250	0,038-0,048
25–31,5	0,024-0,074	0,0081-0,0360	3,0-7,5	0,76-2,35	3658-4519	0,035-0,050

Po změření bodových rychlostí byl postupným zvětšováním sklonu dna dosahován transport splavenin, který byl vyjádřen hmotnostním průtokem splavenin (Roušar, 2013). Splaveniny se usazovaly v lapači splavenin, kde byly v časovém intervalu odebírány a váženy. Pro nízké intenzity transportu splavenin byla hmotnost určena digitálními váhami, pro vysoké intenzity závěsnou váhou. Pro zachování hmotnostní bilance byly splaveniny na nátoku dotovány v poměru 1:1 k odebraným. Po každém změřeném stavu bylo dno urovňováno a zhutněno.

Pro stanovení časově a plošně střední rychlosti \bar{u} v podpovrchové vrstvě $h/d \leq 0,8$ bylo provedeno měření na Darcyho propustoměru za rozsahu sklonů čáry piezometrické výšky i při počátku pohybu (Tab. 4.2). Proudění mezi zrny bylo turbulentní, proto byla vyjádřena hydraulická vodivost při turbulentním proudění $k_t = \bar{u} \cdot n / i^{1/2}$ (Tab. 4.1).

4.2 VYHODNOCENÍ A DÍLČÍ ZÁVĚRY

4.2.1 Absolutní počátek pohybu splavenin

Závislost Shieldsova kritéria pro vodorovné dno při absolutním počátku pohybu θ na relativní hloubce h/d je vynesena na Obr. 4.3.

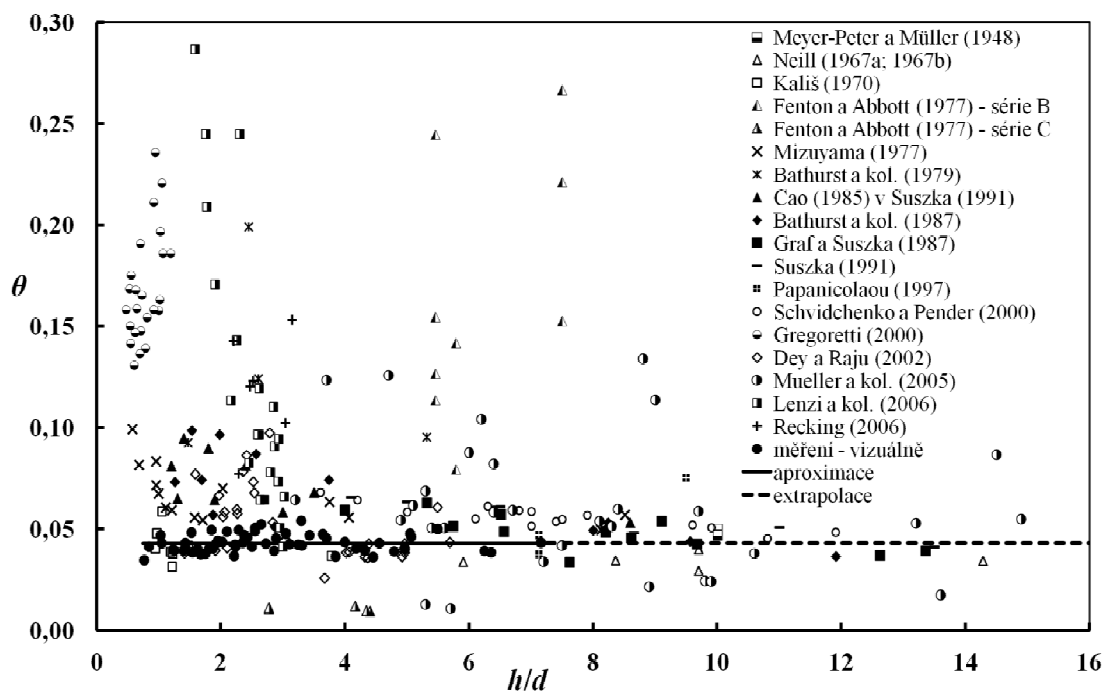
Z Obr. 4.3 jednoznačně vyplývá, že v případě podmínek experimentu (rovinné dno, homogenní drsnost, neprovzdušněný proud, ponořená zrna, absolutní počátek pohybu), není absolutní počátek pohybu vyjádřený hodnotou Shieldsova kritéria závislý na relativní hloubce. Nezávislost potvrzuje i většina autorů, kteří určovali počátek pohybu za obdobných podmínek (Neill, 1967a; Neill, 1967b; Kališ, 1970; Fenton a Abbott, 1977; Mizuyama, 1977; Dey a Raju, 2002). Pro případ zrn použitých v experimentu lze brát hodnotu $\theta = 0,043$.

4.2.2 Transport splavenin

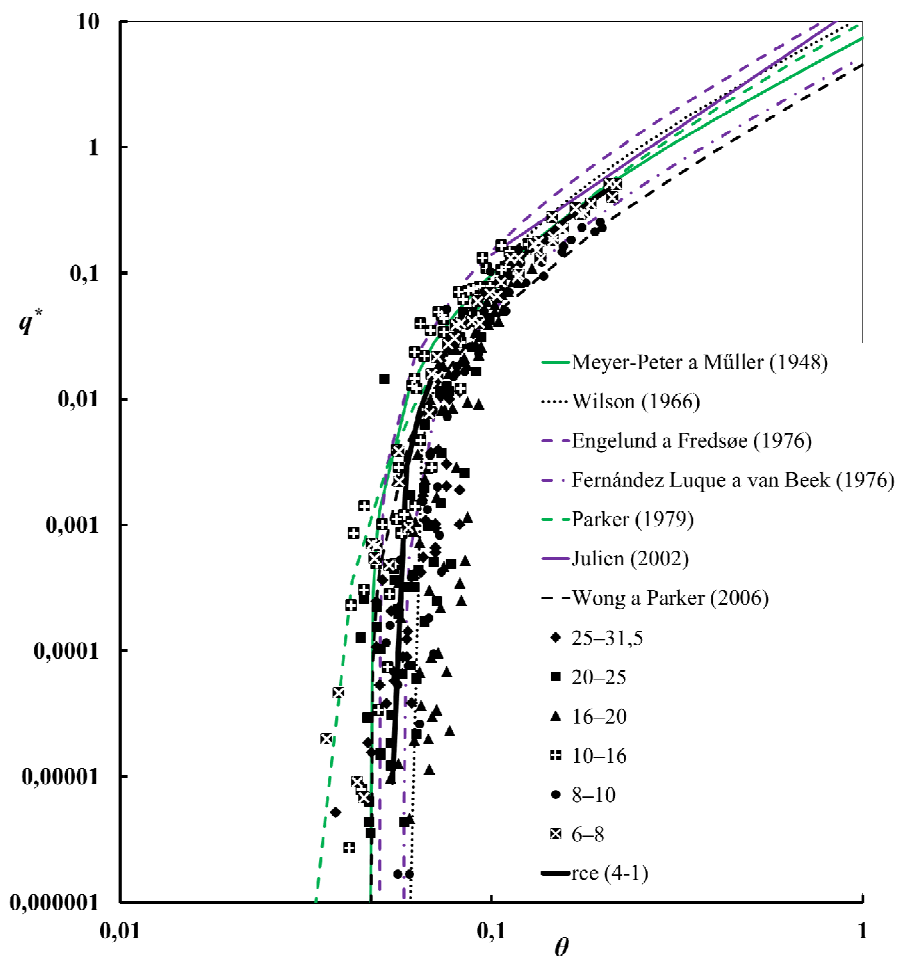
Transport splavenin (Obr. 4.4) byl vyjádřen bezrozměrným specifickým průtokem splavenin q^* na Shieldsově kritériu pro vodorovné dno θ v rozmezí hodnot od 0,036 do 0,217 při relativní hloubce h/d od 1,05 do 8,15. Aproximací naměřených dat metodou nejmenších čtverců pro $q^* > 10^{-5}$ je výpočetní vztah pro transport splavenin

$$q^* = 7,87(\theta - 0,054)^{3/2}, \quad (4-1)$$

kde počátek všeobecného pohybu splavenin (daný dolním limitem transportní křivky) je určen pro $\theta = 0,054$. Vztah je platný pro stejnozrný materiál se sklonem až 7 %. Výpočetní vztah (4-1) byl porovnán s nejčastěji používanými vztahy. Vztahy jsou vyneseny v Obr. 4.4.



Obr. 4.3 Shieldsovo kritérium θ pro počátek pohybu splavenin v závislosti na relativní hloubce h/d



Obr. 4.4 Závislost bezrozměrného specifického průtoku splavenin na Shieldsově kritériu s vyobrazenými transportními rovnicemi a změřenými daty kategorizovanými podle frakce zrn

4.2.3 Dílčí závěry

Rozptyl hodnot na Obr. 4.3 je způsoben především způsobem určení počátku pohybu, kde *Kališ* (1970), *Fernández Luque* a *Van Beek* (1976), *Mizuyama* (1977) určovali absolutní počátek pohybu, hodnoty z měření *Graf* a *Suszka*, (1987) byly brány v rozsahu absolutního počátku až občasného pohybu a občasný pohyb určovali *Chiew* a *Parker* (1994). Mimo rozsah změřených hodnot leží hodnoty pro počátek pohybu určené zvoleným průtokem splavenin (*Dey* a *Debnath*, 2000), hodnoty získané zpětně z extrapolace bezrozměrného průtoku splavenin (*Bathurst* a kol., 1987), hodnoty pro počátek pohybu vyčnívajících zrn nad dno (*Kanellopoulos*, 1998) a hodnoty pro provzdušněný proud (*Gregoretti*, 2000).

Vyhodnocena data na Obr. 4.4 jsou pro velký transport splavenin v rozmezí nejčastěji používaných transportních rovnic. Největší shoda hodnot je se vztahem Meyer-Petera a Müllera a lze konstatovat, že jejich vztah je platný i za podmínek proudění o malých relativních hloubkách a velkých transportech splavenin.

5 TVAR RYCHLOSTNÍHO PROFILU V BLÍZKOSTI DNA A HYDRAULICKÝ ODPOR ZA MALÝCH RELATIVNÍCH HLOUBEK

Jedním z možných vlivů malých relativních hloubek na počátek pohybu je změna tvaru rychlostního profilu v blízkosti dna (*Lamb* a kol., 2008) a to změnou hydrodynamického odporu částic nebo vířivostí (*Wiberg* a *Smith*, 1987). Cílem kapitoly je objasnit tvar rychlostního profilu za malých relativních hloubek pro stejnozrný materiál dna při dvourozměrném turbulentním neprovzdušněném proudění s volnou hladinou. Změřené tvary rychlostního profilu UVP Monitorem byly porovnány s teoreticky odvozeným tvarem a tvarem simulovaným numerickým modelem zohledňujícím povrchovou drsnost.

5.1 MĚŘENÍ BODOVÝCH RYCHLOSTÍ PŘI ABSOLUTNÍM POČÁTKU POHYBU SPLAVENIN

Souřadný systém byl zvolen tak, aby rovina xy reprezentovala dno, které bylo zvoleno do střední úrovně těžišť povrchové vrstvy zrn. Osa z byla kolmá na dno. Měření okamžitých bodových rychlostí v podélné rovině žlabu bylo provedeno UVP Monitorem XW-PSi.

Pro měření byla použita jedna 4 MHz sonda, která byla nakloněna o úhel $+45^\circ$ (0° je ve směru osy x , rotace je po směru hodinových ručiček). Měření probíhalo spojitě v intervalu 100 s při posunu sondy na délce 1 m, aby byl stanoven časově a plošně střední rychlostní profil po délce ultrazvukového (UV) paprsku. Pomocí goniometrických funkcí byla časově a plošně střední rychlost po délce UV paprsku přepočítána na časově a plošně střední rychlost na svislici. Rychlost pojezdu měřicí sondy byla ve výpočtech odečtena od naměřené bodové rychlosti \bar{u}_x (*Roháčová*, 2013).

Měření probíhalo přes hladinu pomocí měřidla, tzv. „lodičky“ (Obr. 5.1), která byla napuštěna vodou, v ní byla umístěna sonda, aby se co nejvíce využil měřicí

rozsah. Lodička byla vkládána do proudu tak, aby vlivem vln nedocházelo ke ztrátě smáčení jejího povrchu v místě průchodu ultrazvukového paprsku (Zachoval a kol., 2011). Testováním v celém rozsahu průtokových stavů byla nalezena nejvhodnější pozice 0,015 m pod střední úroveň hladiny vody.



Obr. 5.1 Vlevo měření bodových rychlostí protiproudě natočenou sondou umístěnou v měřidle, vpravo detail měřidla a ukázka změřených bodových rychlostí po délce UV paprsku UVP Monitorem

5.2 VYHODNOCENÍ BODOVÝCH RYCHLOSTÍ A DÍLČÍ ZÁVĚRY

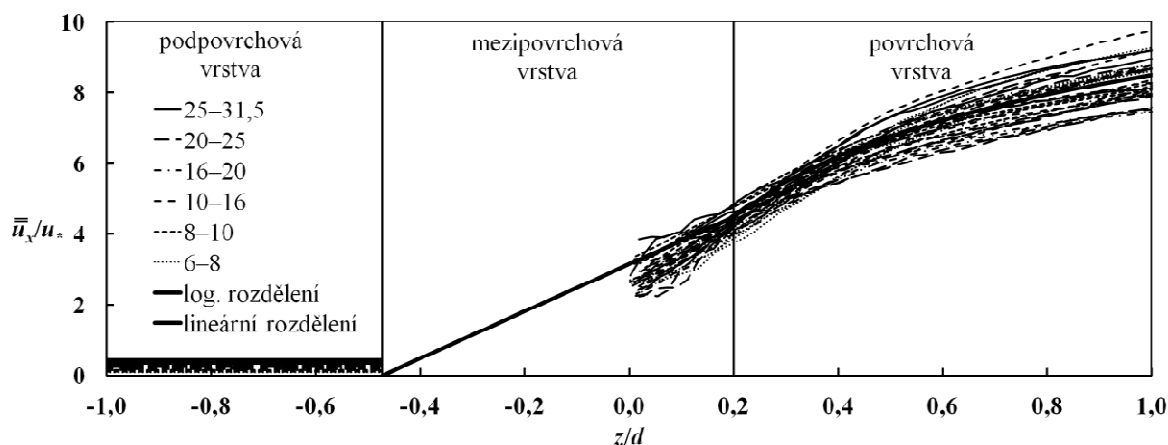
Teoreticky odvozený tvar rychlostního profilu je vyjádřen pomocí časově a plošně zprůměrované hodnoty rychlosti \bar{u}_x jako

$$\frac{u_x}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + C, \quad (5-1)$$

kde κ je Karmánova konstanta, C je integrační konstanta, k_s je Nikuradseho ekvivalentní písková drsnostní výška, která se vyjadřuje pomocí velikosti zrna d . Pro Nikuradseho případ je $\kappa = 0,4$, $k_s = d$, $C = 8,5$ (Keulegan, 1938; Schlichting, 1979).

Změřené časově a plošně střední rychlosti ve směru osy x byly vztaženy relativně k třetí rychlosti \bar{u}_x/u_* a vyneseny v závislosti na relativní výšce z/d pro všechny stavy absolutního počátku pohybu zrn Tab. 4.2 (Obr. 5.2). Z průběhů rychlostí v rozsahu $z/d > 0,2$ (povrchová vrstva proudu) a za předpokladu, že $k_s = d = b$ byla stanovena průměrná hodnota Karmánovy konstanty $\kappa = 0,4$, rozptyl jejich hodnot byl relativně malý. Hodnota C se pro $z/d = 1$ pohybovala v rozmezí od 7,5 do 9,8. Průměrná hodnota byla přibližně $C = 8,5$. Lze konstatovat, že hodnoty parametrů rovnice (5-1)

jsou ve shodě s hodnotami z měření mnohých autorů (Keulegan, 1938; Schlichting, 1979).

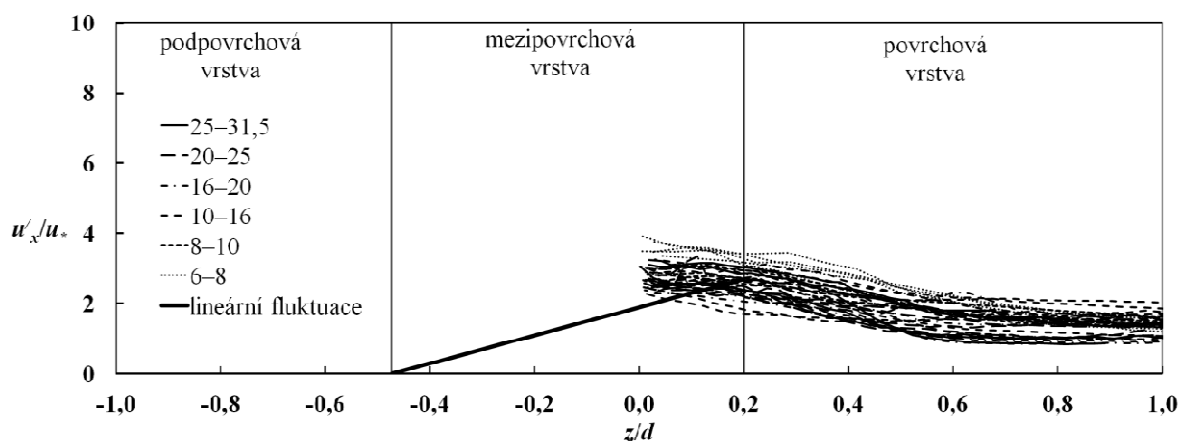


Obr. 5.2 Závislost mezi poměrem časově a plošně střední bodové rychlosti a třecí rychlosti k relativní výšce v případě absolutního počátku pohybu splavenin

Z Obr. 5.2 vyplývá, že relativní hloubka h/d nemá vliv na časově a plošně střední tvar rychlostního profilu a také, že tvar rychlostního profilu není ovlivněn relativní výškou z/d pro $z/d > 0,2$, tedy v daném rozsahu ho popisuje rovnice (5-1) s výše uvedenými konstantami. Z hodnot rychlostí v podpovrchové vrstvě proudu vyplývá, že její hodnota je oproti hodnotě na povrchu zrn významně menší (minimálně 12 krát) a lze ji považovat v daných podmínkách za zanedbatelnou. V mezipovrchové vrstvě bylo provedeno měření pouze v rozsahu relativní výšky $0,0 < z/d < 0,2$ protože metoda a měřidlo rychlostí neumožňovali měření níže v prostoru pórů. Měření v oblasti $0,0 < z/d < 0,2$ je třeba považovat za přibližné, vzhledem k možným odrazům ultrazvukového paprsku.

Z daných měření dále vyplývá (Obr. 5.2), že hranice mezi povrchovou a mezipovrchovou vrstvou je v úrovni horního povrchu povrchových zrn, tedy $z/d = 0,2$. Hranici mezi mezipovrchovou a podpovrchovou vrstvou z těchto měření určit nelze, protože v dané části nebyly změřeny rychlosti. Její stanovení proto bylo provedeno lineární extrapolací změřených hodnot časově a plošně středních rychlostí v oblasti $0,0 < z/d < 0,2$ až do hodnoty rychlosti v podpovrchové vrstvě. Tím byla stanovena i tloušťka mezipovrchové vrstvy odpovídající přibližně nejmenšímu rozměru zrna c . Součinitel C_i v poměru $\bar{u}_x/u_* = C_i \cdot z/d$ pro takto stanovenou tloušťku mezipovrchové vrstvy je 6,7, což je přibližně v rozsahu hodnot uváděných jinými autory (Shimizu a kol., 1990; Nikora a kol., 2001).

Dále byly vyhodnoceny také pulzační složky rychlosti ve směru osy x vztažené k třecí rychlosti u'_x/u_* po relativní výšce z/d pro každý průtokový stav (Obr. 5.3). Maxima pulzační složky se vyskytují přibližně v místě horního povrchu povrchových zrn $z/d = 0,2$, kde průměrná hodnota je $u'_x/u_* = 2,6$ (1,7 až 3,5), což je ve shodě s měřeními jiných autorů (Papanicolaou, 1997; Pokrajac a Manes, 2009). Změřené pulzační složky ve směru osy x v mezipovrchové vrstvě je třeba brát, vzhledem k metodě měření, jako přibližné, přesto odpovídají měřením jiných autorů ve velkých povrchových pórech (Pokrajac a Manes, 2009).



Obr. 5.3 Závislost mezi poměrem pulzační složky bodové rychlosti a třecí rychlosti k relativní výšce v případě absolutního počátku pohybu splavenin

Z výše uvedených závislostí vyplývá, že tvar časově a plošně středního rychlostního profilu, stejně tak pulzační složka ve směru proudu se s hodnotou Reynoldsova kritéria nemění a tedy působení proudu na zrn je také neměnné. Proto hodnota Reynoldsova kritéria za daných podmínek nemá vliv na počátek pohybu zrn vyjádřený Shieldsovým kritériem.

5.3 NUMERICKÝ MODEL

Pro výpočet rychlostního pole byl použit program ANSYS Workbench 14.0 a jeho modul CFX simulující proudění tekutin. Programem bylo řešeno trojrozměrné turbulentní proudění s volnou hladinou bez provzdušnění proudu na podrobně zaměřeném povrchu dna pro frakci materiálu 25–31,5 mm za sklonu dna 4 % a hloubky 0,0485 m ($h/d = 1,9$) s průtokem $0,0019 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

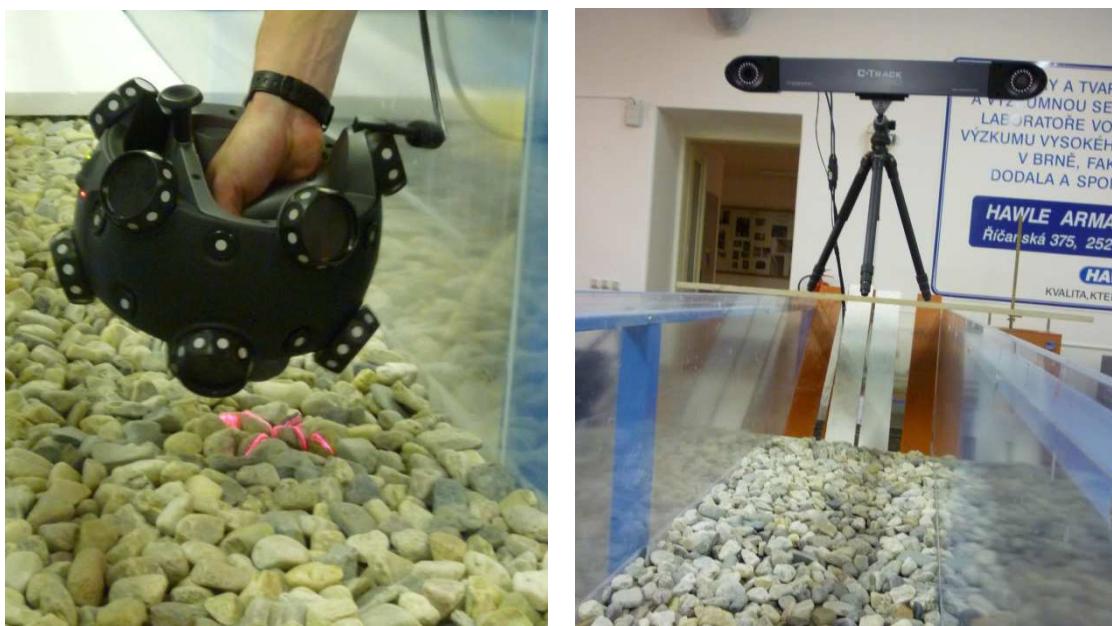
5.3.1 Laserové skenování dna

Pro největší frakci materiálu byl povrch dna po stavu absolutního počátku pohybu splavenin laserově naskenován. Skenování bylo provedeno firmou SolidVision za sucha, s přesností 1 pixel = 1 mm. Povrch dna byl zaměřen skenovací hlavou s pozičními značkami, které byly prostorově zaznamenávány duálními kamerovými snímači, tzv. C-trackem (Obr. 5.4).

5.3.2 Popis geometrie a výpočetní oblasti

Naskenovaný povrch dna byl v programu AutoCAD převeden na těleso, které bylo naimportováno do výpočetního programu. Zpracování velkého množství zaměřených bodů vyžadovalo značné nároky na operační paměť (32 GB, 6x CPU AMD Phenom II X6). Pro tak podrobné zaměření se nepodařilo spustit výpočet, proto byla přesnost zaměření snížena z 1 pixel = 1 mm na 1 pixel = 4 mm a úloha byla řešena jako symetrická s rovinnou symetrie v podélné ose žlabu.

Těleso bylo převedeno na náhradní oblast a diskretizováno čtyřstěny s délkou hrany 4 mm. Vygenerovaná výpočetní oblast měla 1,95 mil. prvků.



Obr. 5.4 Vlevo skenovací hlava s pozičními značkami. Vpravo duální kamerové snímáče

5.3.3 Okrajové podmínky a parametry výpočtu

Na hranicích výpočetní oblasti (Obr. 5.5) byly zadány okrajové podmínky v podobě:

- Rychlosti na vstupu.
- Nulové hodnoty hydrostatického tlaku na výstupu.
- Symetrie na stěně procházející podélnou rovinou žlabu.
- Atmosférického tlaku na horní hranici oblasti.
- Nulové rychlosti na stěně („no slip“) v oblastech kontaktu tekutiny a se změřeným povrchem dna. Povrch dna byl uvažován hydraulicky drsný s povrchovou drsností $k_s = 2 \text{ mm}$.

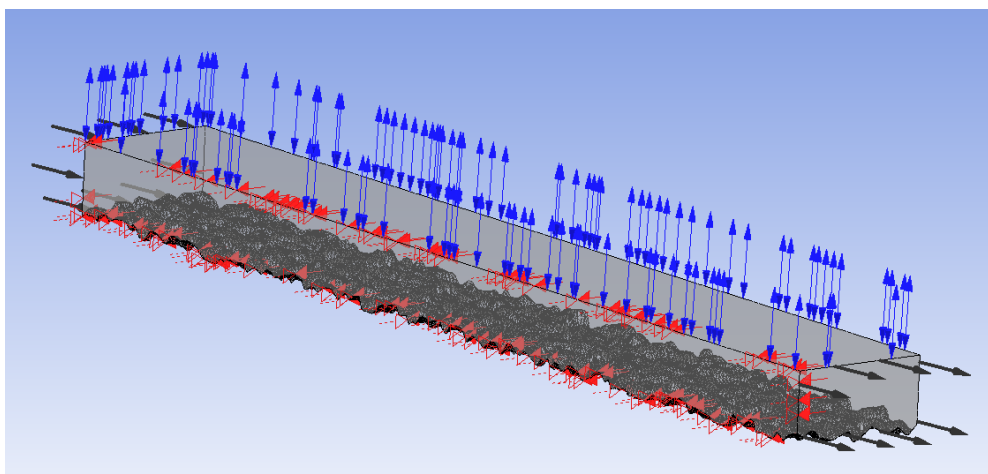
Pro inicializaci výpočtu byla stanovena poloha hladiny ve výšce nad dnem odpovídající hloubce vody z měření.

Řešeno bylo ustálené dvousložkové proudění o volné hladině. Interakce dvou složek na rozhraní byla řešena homogenním modelem, který předpokládá stejné rychlosti na rozhraní dvou nemísících se složek. Na hladinu vody pak působí vzduch pouze tlakem. Rozhraní složek, úroveň volné hladiny, je řešeno metodou VOF (Volume Of Fluid) s působením povrchového napětí vody $\sigma = 73 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$. Fyzikální vlastnosti vody a vzduchu při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ byly importovány z materiálové knihovny programu (Ansys, 2011). Pro modelování turbulence byl zvolen $k-\varepsilon$ turbulentní model, který prokazuje dobrou shodu vypočítaných rychlostních polí se změřenými (Olsen a kol., 2010).

5.3.4 Výsledky numerického modelu

Rozhraní voda-vzduch (úroveň hladiny) bylo určeno pro objemový podíl vody 0,5. Na hranici symetrie v dostatečné vzdálenosti od vstupní podmínky bylo vytvořeno po délce 20 svislic, po jejichž výšce bylo určeno 100 bodových rychlostí. Pro oblast

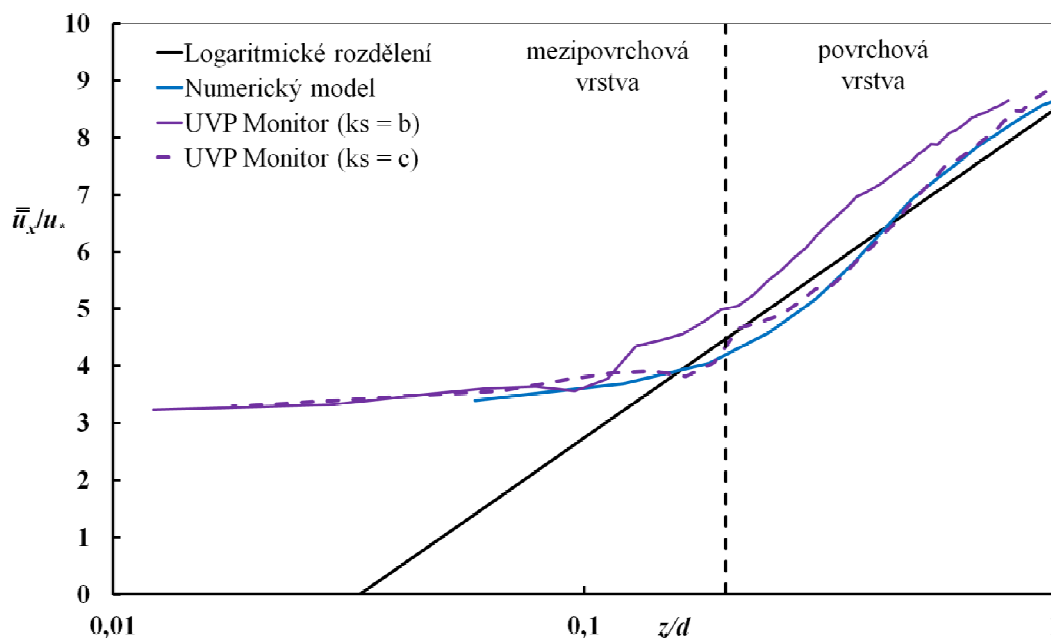
svislic byl rychlostní profil plně vyvinut a tvary rychlostních profilů byly zprůměrovány.



Obr. 5.5 Výpočetní oblast se zadanými okrajovými podmínkami

5.3.5 Vyhodnocení a dílčí závěry

Pro vybraný scénář proudění za malé relativní hloubky byly vykresleny tvary rychlostních profilů stanovených podle teorie (logaritmické rozdělení), měření UVP Monitorem a numerického modelu. Na Obr. 5.6 jsou tvary vyjádřeny v bezrozměrné podobě jako závislost poměru bodové a třecí rychlosti na relativní výšce.



Obr. 5.6 Porovnání tvarů rychlostních profilů

Z výsledků lze konstatovat, že trend tvaru rychlostního profilu v povrchové vrstvě z měření UVP Monitorem ($k_s = b$) odpovídá logaritmickému rozdělení (5-1), ačkoliv je tvar posunutý. Pokud je zvolena Nikuradseho ekvivalentní písková drsnostní výška $k_s = d = c$, je dosažena větší shoda tvaru rychlostního profilu stanoveného UVP

Monitorem ($k_s = c$) s logaritmickým rozdělením. To znamená, že hodnota Nikuradseho ekvivalentní pískové drsnostní výšky $k_s = b$ je nadhodnocena a ve skutečnosti není tak velká. Volba hodnoty $k_s = c$ pro největší zrno použité v experimentálním výzkumu odpovídá výsledkům Roháčové (2013). Pro menší frakce je platné $k_s = b$.

Tvar rychlostního profilu z numerického modelu kopíruje logaritmické rozdělení a je téměř totožný s tvarem stanoveným UVP Monitorem ($k_s = c$). Změnou hodnoty k_s nebylo dosaženo stejného tvaru rychlostního profilu s logaritmickým rozdělením.

Výsledky z numerického modelu potvrdily, že v mezipovrchové vrstvě logaritmický tvar rychlostního profilu není platný.

Numerický model s laserově naskenovaným povrchem dna verifikovaný s měřeními a teorií je vhodný pro výpočet tvaru rychlostního profilu. Pro možné použití je třeba zvážit časovou náročnost zpracování geometrie dna, případně použití stěnových funkcí s vhodně zvolenou hodnotou k_s .

6 ARMOVACÍ PROCES KRYCÍ VRSTVY NESTEJNOZRNNÉHO MATERIÁLU DNA ZA MALÝCH RELATIVNÍCH HLOUBEK

Cílem kapitoly je stanovit absolutní počátek pohybu splavenin nearmovaného dna a ověřit proces armování nestejnozrnného materiálu dna při dvourozměrném turbulentním neprovzdušněném proudění s volnou hladinou.

6.1 POPIS EXPERIMENTU

Experiment s nestejnozrnným materiálem byl proveden v LVV ve stejném žlabu a za stejných podmínek jako v experimentech se stejnozrnným materiálem (kapitola 4). Ve vzdálenosti 2,2 m od nátoky byl nade dnem mezi stěnami vybrán kontrolní profil, z kterého se po měření stavu pořizovaly fotografie dna o snímané ploše $0,154 \text{ m}^2$. Experiment proběhl pro dva nestejnozrnné materiály s počátečním zrnitostním složením Ia, Ib a II (Obr. 6.6). Nestejnozrnné materiály byly namíchány ve stavební míchačce z kameniva použitého v experimentech se stejnozrnným materiálem dna, tj. z frakcí těžného přírodního kameniva 8–10, 10–16, 16–20, 20–25, 25–31,5 [mm].

Pro počáteční zrnitost Ia a Ib byla efektivní velikost zrna $d_m = 0,0153 \text{ m}$ a koeficient vytrídění $\sigma = 1,60$, kde $\sigma = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$. Pro počáteční zrnitost II byla efektivní velikost zrna $d_m = 0,0157 \text{ m}$ a koeficient vytrídění $\sigma = 1,58$. Efektivní velikost zrna byla stanovena jako

$$d_m = \sum_{i=1}^n d_i f_i, \quad (6-1)$$

kde d_i je aritmetický průměr velikosti zrn i -té frakce o hmotnostním podílu f_i i -té frakce a celkovém počtu frakcí n .

Pro snadnější vizuální pozorování byly větší frakce nabarveny. Frakce 16–20 byla nabarvena modře, frakce 20–25 žlutě a frakce 25–31,5 červeně (Obr. 6.1). Vliv nabarvení na změnu povrchové drsnosti kameniva byl stanoven usazovacím

experimentem. Následným porovnáním usazovacích rychlostí nenabarvených a nabarvených zrn nebyl vyhodnocen žádný rozdíl a tedy žádný vliv změny povrchové drsnosti na odporovou sílu. Hustota materiálu zrn $2674 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ byla stanovena jako průměr hustot zrn jednotlivých frakcí.



Obr. 6.1 Nestejnozrný materiál. Vlevo pohled na uložená zrna ve žlabu. Vpravo zobrazený kontrolní profil. Červená barva frakce 25–31,5; žlutá barva frakce 20–25; modrá barva frakce 16–20; frakce menší nabarveny nejsou

Úroveň dna byla stanovena $0,2d_m$ pod vrcholem zrn na základě tvaru rychlostního profilu (Grass, 1971; Bayazit, 1982; Dwivedi, 2010) a to pro všechny průtoky. Absolutní počátek pohybu u nestejnozrných materiálů byl určen vizuálně při postupné změně sklonu dna za rozsahu průtoků uvedených v Tab. 6.1 splňujících podmínku neovlivnění proudění povrchovým napětím $h \geq 0,015 \text{ m}$ (Novak a Čábelka, 1981). Postupným zvětšováním sklonu dna bylo dosahováno třídění zrn v krycí vrstvě a transportu splavenin. Splaveniny nebyly na nátoku dotovány z důvodu zajištění podmínek pro statické třídění. Konec vytržení krycí vrstvy byl určen nulovým hmotnostním průtokem. Doba měřeného stavu byla přibližně 1 hod. Po vytržení byly změřeny bodové rychlosti UVP Monitorem XW-PSi přes hladinu s použitím 4 MHz sondy (Zachoval a kol., 2011) po hloubce a traverzováním v ose žlabu i po její délce. Z těchto změřených rychlostí byly stanoveny průběhy časově a plošně středních rychlostí po hloubce proudu \bar{u}_x v rozsahu od $h/d = 0,1$ do úrovně $0,015 \text{ m}$ pod hladinu (omezení vlivem měřidla). V konečné fázi třídění byla změřena tloušťka krycí vrstvy, odebrán vzorek armované vrstvy a proveden zrnitostní rozbor.

Tab. 6.1 Rozsah měření při absolutním počátku pohybu

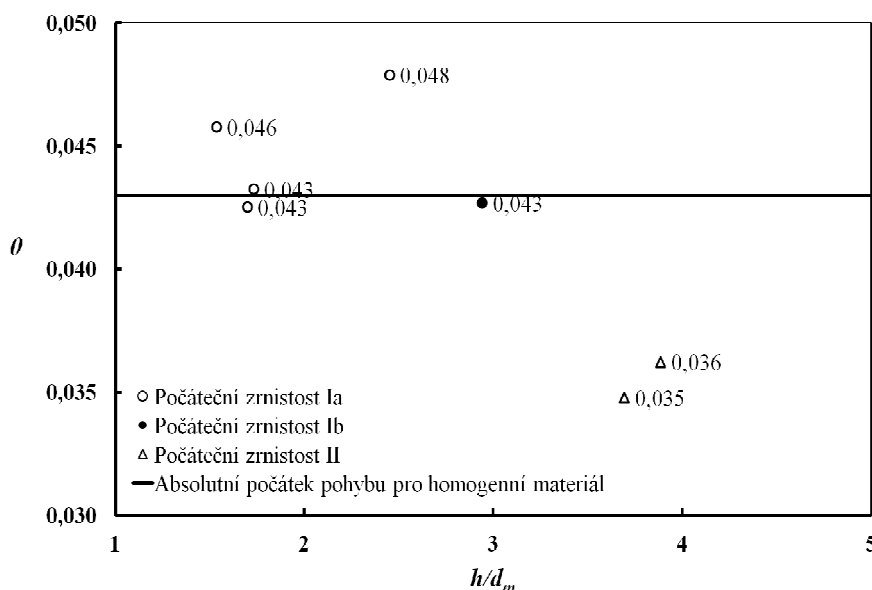
Materiál	h [m]	Q [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	$i = \sin\alpha$ [%]	h/d_m [-]	Re_* [-]	θ [-]
Ia	0,024-0,045	0,0098-0,0162	3,0-6,0	1,54-2,94	1633-1743	0,043-0,048
Ib	0,045	0,0195	3,0	2,94	1633	0,043

Materiál	h [m]	Q [m ³ ·s ⁻¹]	$i = \sin\alpha$ [%]	h/d_m [-]	Re^* [-]	θ [-]
II	0,058-0,061	0,0229-0,0267	1,5-2,0	3,69-3,89	1521-1552	0,035-0,036

6.2 VYHODNOCENÍ A DÍLČÍ ZÁVĚRY

6.2.1 Absolutní počátek pohybu splavenin

Absolutní počátek pohybu byl vyhodnocen pro Shieldsovo kritérium θ pro vodorovné dno v závislosti na relativní hloubce h/d_m a je vyneseno na Obr. 6.2. V grafu je dále vykreslena závislost z experimentu pro stejnozrnný materiál dna. Z Obr. 6.2 je patrné, že absolutní počátek pohybu stanovený za stejných podmínek (rovinné dno, neprovzdušněný proud, ponořená zrna, obdobné zrnitostní křivky) je pro počáteční zrnitosti materiálu obdobný. Hodnoty Shieldsova kritéria pro materiál s počáteční zrnitosti Ia a Ib jsou mírně větší nebo stejné než v případě experimentu se stejnozrnným materiálem. Uvedené zvětšení Shieldsova kritéria lze vysvětlit mikroskopickým efektem, kde malá zrna jsou chráněna velkými. Hodnoty Shieldsova kritéria jsou v rozmezí hodnot stejnozrnného materiálu. Materiál s počáteční zrnitosti II byl v průběhu míchání nedostatečně promíchán, což vedlo k vytvoření jemnozrnější krycí vrstvy a tedy absenci mikroskopického efektu.



Obr. 6.2 Shieldsovo kritérium pro počátek pohybu splavenin v závislosti na relativní hloubce h/d_m

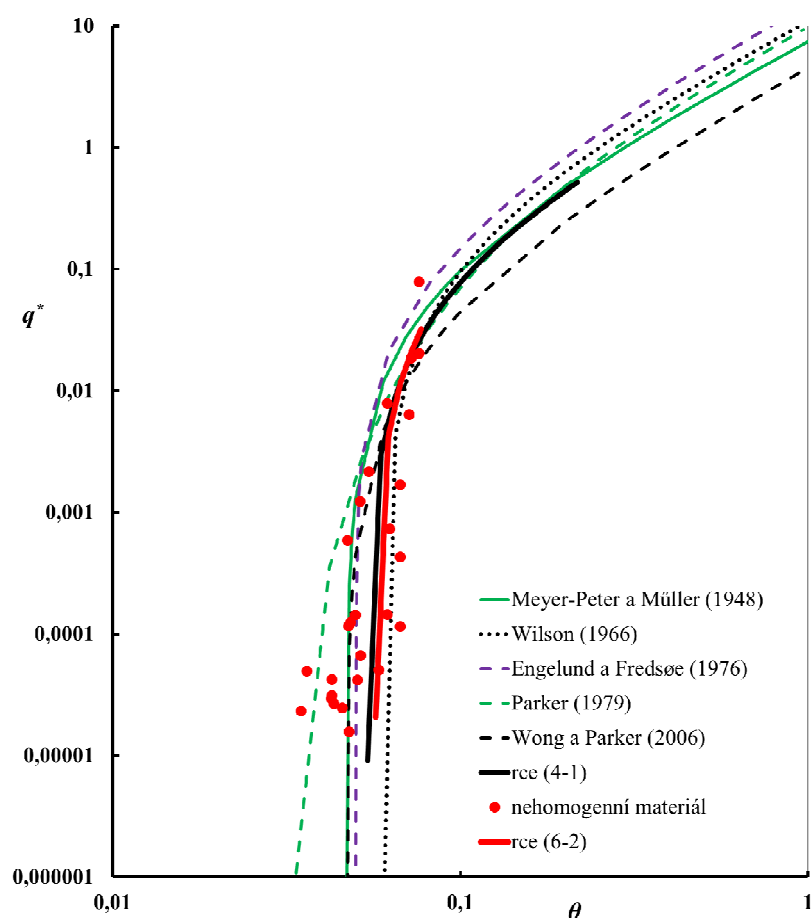
Hodnoty Shieldsova kritéria pro vodorovné dno a pro počáteční zrnitosti Ia a Ib byly aproximovány metodou nejmenších čtverců a absolutní počátek byl vyhodnocen pro $\theta = 0,044$. Hodnota je menší než hodnota určená pro počátek statického armování autorů *Suzuki* a *Hano* (1992) nebo *Guenter* (1971) a odpovídá počátku pohybu splavenin pro stejnozrnný materiál dna ($\theta = 0,043$). Hodnoty nenaznačují závislost Shieldsova kritéria na relativní hloubce za daných podmínek experimentu, ale vykazují závislost na složení krycí vrstvy.

6.2.2 Transport splavenin

Transport splavenin (Obr. 6.3) byl určen bezrozměrným specifickým průtokem splavenin q^* vyjádřeného zrnem d_m v závislosti na Shieldsově kritériu pro vodorovné dno θ v rozmezí hodnot od 0,035 do 0,076 při relativní hloubce h/d_m od 1,37 do 3,89. Aproximací naměřených hodnot metodou nejmenších čtverců pro $q^* > 10^{-5}$ je výpočetní vztah pro transport splavenin

$$q^* = 11,25 (\theta - 0,057)^{3/2}, \quad (6-2)$$

kde počátek všeobecného pohybu splavenin (daný dolním limitem transportní křivky) je určen pro hodnotou Shieldsova kritéria 0,057. Vztah je platný pro nestejnzrný materiál dna se sklonem až 7 %.

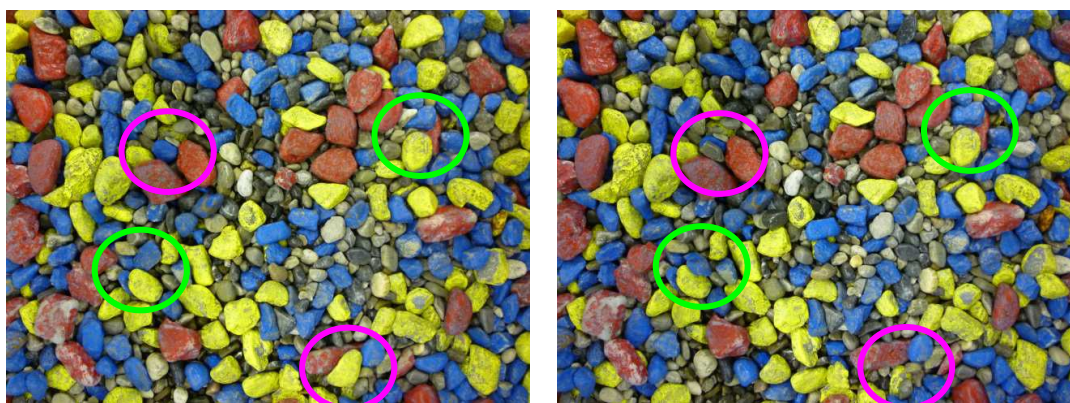


Obr. 6.3 Závislost bezrozměrného specifického průtoku splavenin na Shieldsově kritériu s vyobrazenými transportními rovnicemi a změřenými daty pro nestejnzrný materiál

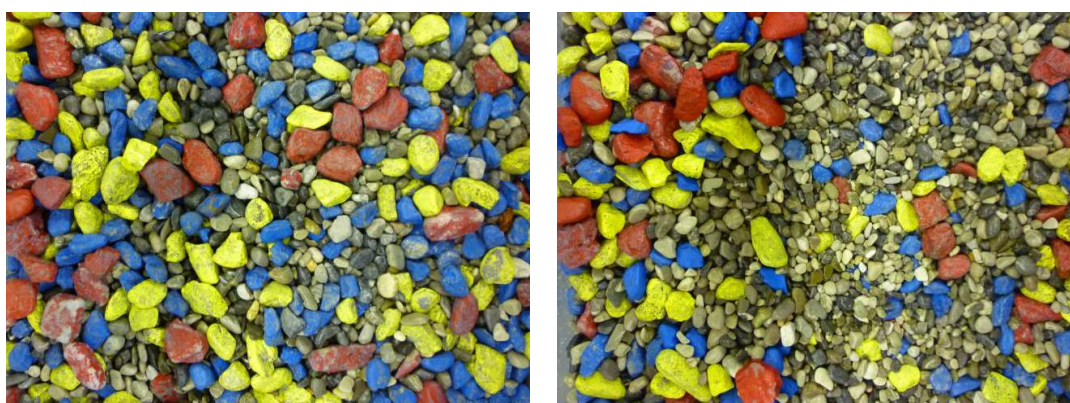
Výpočetní vztah (6-2) byl porovnán se vztahy autorů zobrazenými do Obr. 6.3. Vztah (6-2) oproti vztahu (4-1) má pro počátek pohybu splavenin větší hodnotu Shieldsova kritéria což naznačuje vliv mikroskopického efektu, který není příliš výrazný. Uvedené je pravděpodobně způsobeno úzkou zrnitostní frakcí materiálu v krycí vrstvě (Julien, 2010).

6.2.3 Třídění zrn v krycí vrstvě

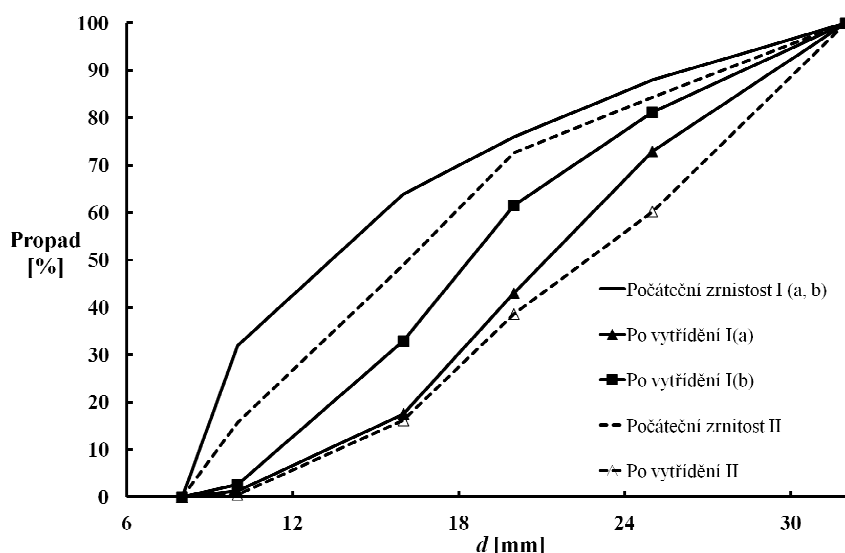
Zrna v krycí vrstvě byla tříděna postupně se zvětšující se hodnotou Shieldsova kritéria. Nejdříve byla malá zrna natočena a zaklíněna mezi velká zrna. Při zvětšujícím se průtoku docházelo k pohybu malých zrn. Velká zrna byla stabilní i přes to, že docházelo k jejich natočení. Pokud nastal ojedinělý pohyb velkých zrn, která pohybem mechanicky narušovala krycí vrstvu, byla do pohybu uvedena i malá zrna (Obr. 6.4). Experiment pokračoval až do stavu, kdy si proud v ose žlabu vytvořil menší koryto (porušení krycí vrstvy), v němž bylo realizováno proudění. Při tomto stavu byla povrchově odebrána krycí vrstva mimo vytvořené koryto a byl proveden zrnitostní rozbor na standardizovaných sítích. Změna zrnitostního složení krycí vrstvy počáteční zrnitosti I a II je vykreslena na Obr. 6.6. Lokální porušení dnové dlažby způsobilo zmenšení šířky aktivní části proudu, což vedlo k zvětšenému namáhání dna a většímu transportu splavenin až k transportu zrn ze spodní vrstvy (Obr. 6.5).



Obr. 6.4 Na levém obrázku je počáteční zrnitost Ia, vpravo je prvotní natočení a zaklínění malých zrn s ojedinělým pohybem velkých zrn. Fialové kružnice zobrazují pohyb zrn, zelené kružnice zobrazují natočení zrn



Obr. 6.5 Vlevo je konečný stav vytrídění počáteční zrnitosti Ia, vpravo změna aktivní části žlabu a porušení dnové dlažby



Obr. 6.6 Zrnitostní křivky počátečních složení směsí a jejich konečného vytrídění

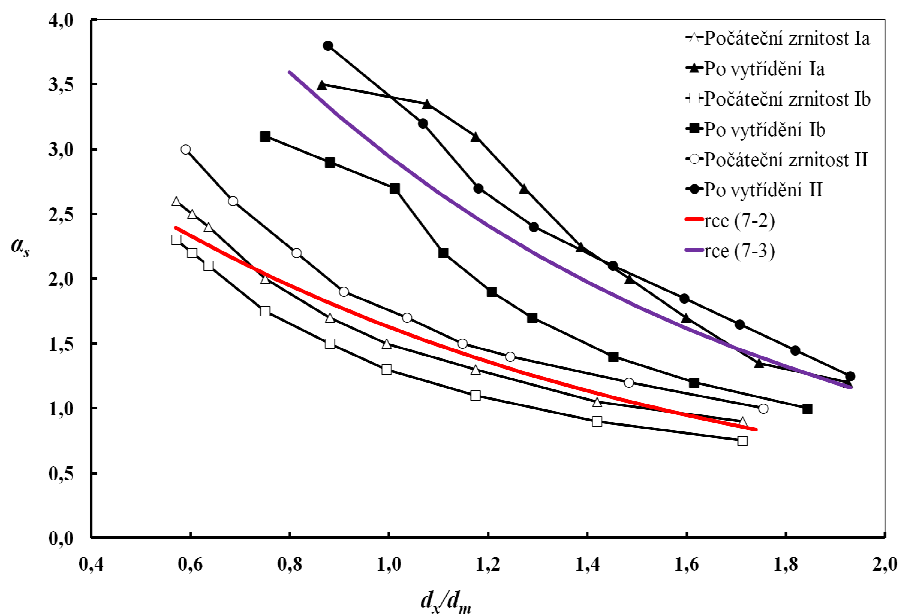
7 VLIV VYTRÍDĚNOSTI KRYCÍ VRSTVY NA HYDRAULICKOU DRSNOST

Hydraulická drsnost byla definována Nikuradseho ekvivalentní pískovou drsností výškou k_s , která byla experimentálně prošetřena pro turbulentní proudění v potrubí *Nikuradsem* (1933). Nikuradseho ekvivalentní písková drsnostní výška k_s pro dno složeného z různě velkých zrn různě uložených by měla být tak velká, aby při plně turbulentním proudění (Kolář a kol., 1983) odpor způsobený drsností dna odpovídal odporu přilepených zrn o velikosti k_s .

Zvolená metoda stanovení tvaru rychlostního profilu je závislá na správném určení k_s , které je stanoveno (Yen, 2002; García, 2008) součinitelem α_s a charakteristickým zrnem d_x z křivky zrnitosti jako

$$k_s = \alpha_s \cdot d_x. \quad (7-1)$$

Změřené časově a plošně střední rychlosti ve směru osy x byly vztaženy relativně k třecí rychlosti \bar{u}_x/u_* a vyneseny v závislosti na relativní výšce z/k_s pro všechny měřené stavy. Nikuradseho ekvivalentní písková drsnostní výška k_s byla optimalizována pro charakteristická zrna počátečních zrnitostí d_x změnou hodnot součinitele α_s tak, aby tvary rychlostních profilů co nejvíce graficky odpovídaly teoretickému logaritmickému rozdělení s koeficienty stanovenými Schlichtingem (kapitola 5.2). Hodnoty součinitelů α_s byly vyneseny (Obr. 7.1) v závislosti na poměru charakteristických zrn d_x a efektivních velikostí zrn d_m vztažených k odpovídajícím počátečním zrnitostem (Obr. 6.6).



Obr. 7.1 Závislost součinitele α_s na poměru d_x/d_m pro počáteční zrnitosti a zrnitosti po vytrídění

Z Obr. 7.1 je patrné, že hodnoty součinitelů α_s závisí na počáteční zrnitosti krycí vrstvy. Čím menší charakteristické zrno se použije, tím je rozsah hodnot větší. Pro stanovení součinitele je vhodné vycházet z poměru alespoň $d_x/d_m > 1,2$, kde rozmezí hodnot součinitele α_s je od 1,2 do 1,4. Změřené hodnoty byly aproximovány metodou nejmenších čtverců a výpočetní vztah pro počáteční zrnitost je

$$\alpha_s = 4 \cdot e^{\left(-0,9 \frac{d_x}{d_m}\right)} \quad (7-2)$$

s koeficientem determinace $R^2 = 0,87$.

Rozptyl hodnot součinitele α_s po vytrídění není ve srovnání s počátečními zrnitostmi velký. S výjimkou pro stav Po vytrídění Ib, kde dle fotografií neproběhlo vytrídění do konečné fáze. Změřené hodnoty byly aproximovány metodou nejmenších čtverců a výpočetní vztah pro stav po vytrídění je

$$\alpha_s = 8 \cdot e^{\left(-\frac{d_x}{d_m}\right)} \quad (7-3)$$

s koeficientem determinace $R^2 = 0,80$.

8 OVĚŘENÍ POZNATKŮ NA PŘÍRODNÍM SPÁDOVÉM STUPNI

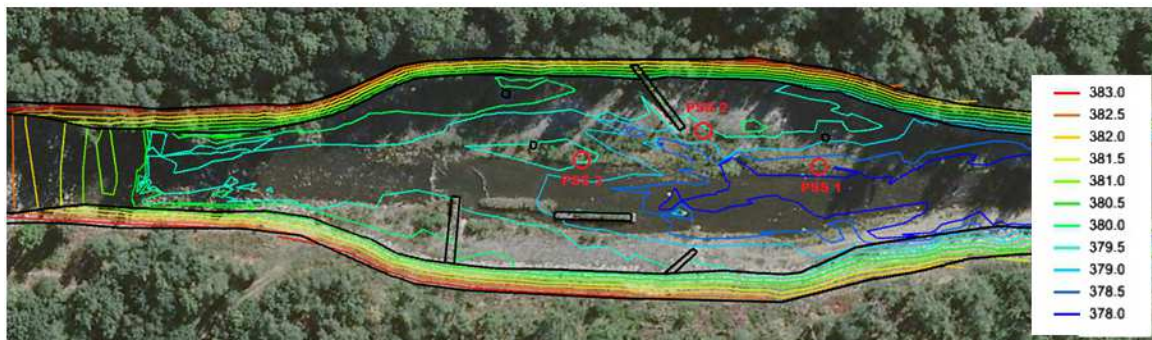
Výsledky z experimentálních výzkumů byly ověřeny na objektu přírodního spádového stupně, který byl po více než 4 letech provozu. Simulována byla hydrodynamika dvourozměrným numerickým modelem (SMS 11.0-FESWMS), na který navazovala analýza splaveninového režimu jednorozměrným numerickým modelem (HEC-RAS 4.1). Parametry numerického modelu pro analýzu splavenin byly zadány z výsledků provedených experimentálních výzkumů. Vzájemně byly porovnány návrhový stav (z roku 2001), realizovaný stav (z roku 2007) a stav z roku 2011.



Obr. 8.1 Na levém obrázku protiproudňi pohled na balvanitý skluz, na pravém obrázku poproudňi pohled na spádový stupeň s rozmístěnými výhony z drátokamene (foto Pařílková, duben 2007)

8.1 POSUZOVANÁ LOKALITA

V katastrálním území obce Vyšňi Lhoty na řece Morávce byl na základě fyzikálního modelu (Veselý a kol., 2001) v roce 2007 zrealizován přírodní spádový stupeň (objekt) ve tvaru hrušky s drátokamennými výhony (Obr. 8.1). Cílem realizace bylo stabilizovat balvanitý skluz nad objektem, který byl při povodni 1997 značně poškozen. Dno pod skluzem bylo silně namáháno a docházelo zde k soustavnému zahlubování toku. V současnosti se prozatím jedná o jediný realizovaný projekt svého druhu v České republice. V zahraničí bylo realizováno několik obdobných staveb, především v alpských zemích (Hunzinger, 1998; Formann a kol., 2007).



Obr. 8.2 Izolinie úrovně dna (m n. m.) z geodetického zaměření 2011 (Varianta 3) se zakreslenými místy odběru vzorků PSS 1, PSS 2 a PSS 3 (ortofoto: CENIA), černým obrysem jsou zakresleny výhony a usměřňovače proudu

8.2 SPLAVENINOVÝ REŽIM A VÝVOJ ÚROVNĚ DNA KORYTA

8.2.1 Popis modelu

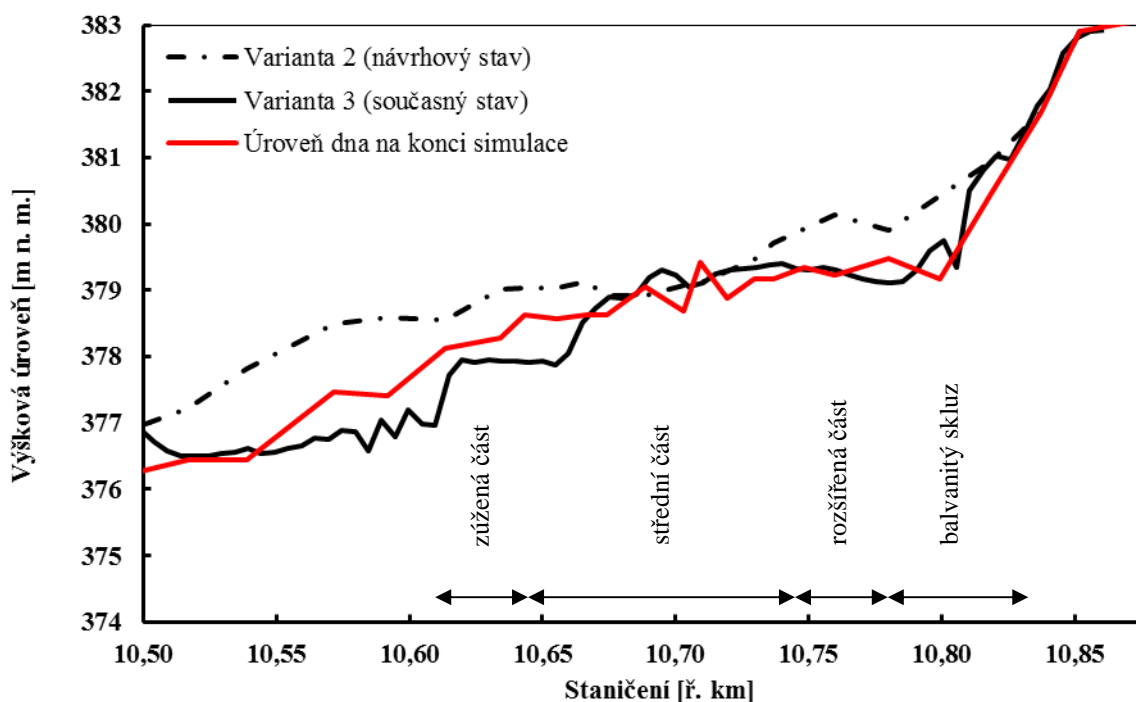
Spádový stupeň byl schematizován příčnými profily vygenerovanými z DMT. Příčné profily byly voleny tak, aby byly kolmé na proudnice a v místech usměřňovačů co nejlépe vystihly změny geometrie. Hodnoty součinitelů drsnosti jednotlivých variant byly převzaty z 2D hydrodynamického modelu.

Počáteční zrnitostní složení dna pro výpočet pohybu splavenin bylo definováno náhradní zrnitostí určenou na základě analýzy známých zrnitostních křivek. Během

terénního měření byly odebrány 3 vzorky sedimentů a byl proveden jejich zrnitostní rozbor. Odběrná místa jsou znázorněna na Obr. 8.2. Vzorek PSS 1 byl odebírán ze šterkové lavice v blízkosti zužující se části, odběr PSS 2 byl odebírán v úplavové zóně levobřežního výhonu (zde se hrubozrnné splaveniny nedostanou, proto má výrazně jemnozrnější složení) a odběr PSS 3 byl odebrán za usměrňovačem ze šterkové lavice. Balvanitý skluz byl popsán zrnem o efektivní velikosti zrna $d_m = 1,5$ m (Roušar a kol., 2012).

Počátek pohybu splavenin byl stanoven hodnotou Shieldsova kritéria pro vodorovné dno 0,044. Pro výpočet transportu splavenin byl použit vztah Meyera-Petera a Müllera, který dle zjištěných poznatků se nejlépe shoduje s experimentálními daty. Třídění zrn v krycí vrstvě dna bylo řešeno metodou Exner 5 (HEC-RAS, 2010).

Z hodnot denních průtoků v časovém intervalu od dubna 2007 do srpna 2011 byla sestavena průtoková vlna a následně byl simulován vývoj dna objektu od doby výstavby (Varianta 2). Výpočet byl proveden v časovém kroku 1 den po částech ustáleným nerovnoměrným prouděním se zadáním dolní okrajové podmínky pro hydrodynamiku v podobě úrovně hladiny převzaté z 2D modelu. Horní okrajová podmínka pro transport splavenin byla zadána ve formě nulového přítoku splavenin. Předpokládalo se, že se většina splavenin usadí v prostoru nad spádovým stupněm, kde je nutné je těžít z důvodu funkčnosti limnigrafu. Uvedený předpoklad (Roušar a kol., 2012) potvrdil variantní výpočet s rovnoměrným přítokem splavenin, kdy poloha dna na konci simulace byla významně výše, než byla změřena v roce 2011. Vývoj polohy dna při nulovém přítoku splavenin zobrazuje Obr. 8.3, porovnání efektivních velikostí zrn uvádí Tab. 8.1.



Obr. 8.3 Výškové úrovně dna v ose toku

Tab. 8.1 Efektivní velikost zrn d_m [mm] vzorků v místě odběrů

Vzorek	Odběrné místo	Současný stav	Simulace
PSS 1	Štěrková lavice v korytě	39,8	31,4
PSS 2	Nános za výhonem (úplav)	7,8	nelze
PSS 3	Štěrková lavice vedle usměrňovače	50,8	29,3

Vypočítaná poloha dna přibližně odpovídá poloze změřené, pouze v zúžené části a za ní je výše, což je pravděpodobně způsobeno poměrně významným příčným prouděním (Veselý a kol., 2001), které 1D přístup nepostihuje.

8.3 DÍLČÍ ZÁVĚRY

Ověření poznatků a zhodnocení spádového objektu lze shrnout do následujících bodů:

- Charakter proudění v objektu při současném stavu je podobný stavu na fyzikálním modelu.
- Největší spojitě transportované zrno objektem má průměr 32 mm, největší lokálně transportované zrno bylo při povodňovém průtoku 64 mm. Velikosti transportovaných zrn byly pozorovány v krycí vrstvě při terénním šetření a odpovídají rozmezí hodnot efektivních velikostí zrn z provedených odběrů. Po povodňové situaci byla pozorována větší zrna (balvany) v prostoru objektu, ale ta pravděpodobně pochází z balvanitého skluzu, jelikož jejich ostrohranný tvar a velikost neodpovídají zrnitostní skladbě v objektu ani v toku.
- Hmotnost odneseného materiálu z objektu určená z rozdílu úrovní dna v roce 2007 a v roce 2011 je $6\,700\text{ m}^3$, tj. cca 10 000 tun. Simulací stanovená hmotnost je 8 700 tun, což je o 13 % méně oproti skutečnosti. Rozdíl hmotnosti je největší v místě zúžení, kde dochází k příčnému proudění. Vzhledem k tomu, že 1D výpočet nepostihuje příčné proudění, lze považovat výsledky z numerického modelu za odpovídající.
- Zastavení prohlubování dna v rozšířené části umožnilo do jisté míry stabilizaci balvanitého skluzu. Aktuální deformace dna pod balvanitým skluzem je přibližně stejná jako na fyzikálním modelu. Dle numerických simulací je výmol do průtoku cca $46\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ stabilní.
- Objekt je funkční, avšak oproti očekávání z fyzikálního výzkumu nezvýšil polohu dna ve střední části objektu, ale zastavil jeho prohlubování, které by nastalo bez spádového stupně (Roušar a kol., 2012). Uvedené může být způsobeno menším přísunem splavenin z horního úseku, než bylo předpokládáno dle doporučené manipulace jezem; nedostatečnou délkou povodňové vlny oproti fyzikálnímu výzkumu; významným zahloubením úseku pod objektem; absencí skalního výchozu v dolní části objektu.
- Na základě numerických simulací, fotodokumentace, zrnitostních rozborů a tachymetrického zaměření lze konstatovat, že hlavní deformace dna objektu proběhly především v prvním roce provozu a po povodňové vlně v roce 2010.

9 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Předložená doktorská disertační práce na téma „Meze pohybu a kvantifikace množství dnových splavenin pro šterkonosné toky“ podrobně shrnuje dosažené poznatky v oblasti transportu splavenin, které dále rozšiřuje pro proudění o malých relativních hloubkách a zobecňuje jejich využitelnost pro praktické činnosti.

Rešerše literatury souhrnně uvádí výsledky a závěry autorů, které se často vzájemně vylučují. Analýzou jejich hodnot a postupů jsem nově provedl zhodnocení současných znalostí, týkajících se počátku pohybu splavenin, transportu splavenin, třídění zrn v krycí vrstvě, odporových součinitelů a hydraulické drsnosti.

Na základě rozměrové analýzy jsem vymezil hlavní kritéria, která by mohla mít vliv na počátek pohybu vyjádřený Shieldsovým kritériem u plně ponořených nekohezních stejně velkých zrn uložených na rovinném vodorovném dně při neprovzdušněném plně turbulentním proudění. Podkladem pro vyjádření jednotlivých vlivů byl souhrn teoretických znalostí opírajících se o základní rovnice mechaniky a jejich ověření bylo provedeno porovnáním s měřeními mnoha autorů. Z provedených teoretických analýz ověřených dostupným experimentálním výzkumem pro stejnozrné a nestejnozrné materiály dna vyplynuly tyto nové dílčí závěry: Podélný sklon dna (příčný nebyl vyšetřován) má vliv na počátek pohybu dle vztahu (3-4). Vliv úhlu vnitřního tření doposud nebyl plně stanoven a z měřených nebylo možné stanovit obecně platnou závislost. Třetí Reynoldsovo kritérium při plně turbulentním proudění nemá praktický vliv na rychlostní profil v povrchové vrstvě při dodržení stejné povrchové geometrie, avšak zrno je ovlivněno prouděním v mezipovrchové vrstvě, kde současné znalosti o rychlostním profilu jsou omezené.

Dílčí závěry ukázaly, že bylo nutné provést experimenty, které doplnily některé chybějící informace a umožnily jednotlivé vlivy kvantifikovat. Experimenty ukázaly, že pro šterky a menší zrna lze zanedbat vliv velikosti rychlosti v podpovrchové vrstvě (Obr. 5.2) a tím potvrdily, že při plně turbulentním proudění je vliv Reynoldsova kritéria na počátek pohybu prakticky zanedbatelný. Experimenty dále potvrdily, že relativní hloubka v případě rovinného dna nemá vliv na absolutní počátek pohybu a že v případě určení počátku pohybu bezrozměrným průtokem splavenin zde závislost existuje.

Při experimentech jsem s kolegy z LVV stanovil hmotnostní průtoky, ze kterých byly vyhodnoceny transportní vztahy pro stejnozrné (Obr. 4.4) a nestejnozrné (Obr. 6.3) materiály dna v případě neprovzdušněného plně turbulentního proudění a malých relativních hloubek. Odvozené vztahy jsem porovnal s často používanými transportními vztahy a nově rozšířil platnost vztahu Meyer-Petera a Müllera pro uvedené specifické podmínky proudění.

Během experimentů jsem s kolegy měřil bodové rychlosti UVP Monitorem (Obr. 5.1). Z bodových rychlostí jsem vykreslil tvary rychlostních profilů (Obr. 5.2) a stanovil jsem vliv struktury stejnozrného a nestejnozrného materiálu dna na rychlostní profil. Pro zvolený měřený stav na počátku pohybu dnových splavenin byl povrch stejnozrného materiálu dna podrobně laserově naskenován (Obr. 5.4) a nově jsem pomocí trojrozměrného numerického modelu ověřil věrohodnost tvaru rychlostního profilu.

Vyhodnotil jsem vztah vyjadřující odpor dna ze stejnozrného materiálu, který jsem porovnal s často používanými výpočetními vztahy. V případě nestejnozrného materiálu dna jsem určil změnu Nikuradseho ekvivalentní pískové drsnostní výšky pro počáteční a koncové vytržení krycí vrstvy (Obr 7.1). Potřebné stanovení Nikuradseho ekvivalentní pískové drsnostní výšky jsem rozšířil o výpočetní vztahy, které jsem porovnal s dostupnými vztahy autorů.

Z analýzy metod pro určení zrnitosti dna jsme s kolegy potvrdili, že zrnitostní křivka použitá pro splaveninové studie by měla být pečlivě zvážena, zdali reprezentuje zrnitost dna v daném úseku.

Zanalyzoval jsem soudobé znalosti o procesu třídění zrn a shrnul hlavní myšlenky třídění. Provedený experiment s nestejnozrným materiálem umožnil detailněji popsat proces statického třídění zrn v krycí vrstvě pro neprovzdušněné plně turbulentní proudění o malých relativních hloubkách. Stanovil jsem stabilitu dna ve smyslu změny aktivní šířky proudění vlivem vytržení krycí vrstvy. Dále jsem vyhodnotil tloušťku krycí vrstvy.

V objektu přírodního spádového stupně jsem proudové charakteristiky simuloval dvourozměrným numerickým modelem pro stav z roku 2011. Analýzu transportu splavenin a vývoj úrovně dna (Obr. 8.3) jsem simuloval jednorozměrným modelem s nastavenými parametry modelu dle výsledků experimentálních výzkumů. Ověření výsledků modelu s vývojem objektu prokazují dobrou shodu. Numerické modely umožnily detailněji zhodnotit funkčnost pilotní vodohospodářské stavby – přírodního spádového stupně v klimatických a geologických podmínkách České republiky.

Disertační práce obsahuje nové poznatky o počátku pohybu a kvantifikaci dnových splavenin v případě šterkonosných horských toků stanovených pomocí experimentálních výzkumů, numerických modelů ověřených na reálném objektu přírodního spádového stupně. Z uvedených postupů a vyhodnocení vyplývají doporučení pro navazující práce:

- Rozvést proces mobilního armování pro případ proudění o malých relativních hloubkách.
- Z výsledků měření tvaru rychlostního profilu analyticky stanovit počátek pohybu splavenin s využitím závislosti Shieldsova kritéria na úhlu vnitřního tření, jelikož vliv úhlu vnitřního tření doposud nebyl plně stanoven.
- Porovnat matematické modely popisující třídění zrn v krycí vrstvě.
- Provést analýzu transportu splavenin vícerozměrným numerickým modelem a výsledky porovnat s terénním měřením v podmínkách České republiky (objekt přírodního spádového stupně).
- Simulovat absolutní počátek pohybu splavenin trojrozměrným numerickým modelem.

10 LITERATURA

- ANSYS. Interaktivní manuál ANSYS 14.0 Workbench. 2011.
- BATHURST, J. C., GRAF, W. H., CAO, H. H. Bed Load Discharge Equations for Steep Mountain Rivers. *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, edited by C. R. Thorne, J. C. Bathurst and R. D. Hey, 1987. pp. 453-491.
- BAYAZIT, M. Flow structure and sediment transport mechanics in steep channels. *Proceedings of EU: Mechanics of Sediment Transport*, 156, 1982. pp. 197-206.
- BETTES, R., FRANGIPANE, A. A one-layer model to predict the time development of static armour. *Journal of hydraulic Research*, 41(2), 2003. pp. 179-194.
- BOGÁRDI, J. *Sediment transport in alluvial streams*. ed.1. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1978. 826 p. ISBN 963 05 1826 0.
- BUFFINGTON J. M. The Legend of A. F. Shields. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 1999. pp. 376-387.
- BUFFINGTON J. M., MONTGOMERY D. R. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, Vol. 33(8), 1997. pp. 1993-2029.
- BUNTE, K., ABT, S. R. *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. Fort Collins, Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2001. 428 p.
- DAMGAARD, J. S., WHITEHOUSE, R. J. S., SOULSBY, R. L. Bed-load sediment transport on steep longitudinal slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(12), 1997. pp. 1130-1138.
- DEY, S., DEBNATH, K. Influence of streamwise bed slope on sediment threshold under stream flow. *J. Irrig. Drain. Engineering*, 126(4), 2000. pp. 255-263.
- DEY, S., RAJU, U. Incipient motion of gravel and coal beds. *Sadhana*, 27(5), 2002. pp. 559-568.
- DWIVEDI, A. Mechanics of sediment entrainment. *Doctoral thesis*. The University of Auckland, 2010.
- ETTEMA R., ARNDT R., ROBERTS P., WAHL T. *Hydraulic Modelling - Concepts and Practise*. ASCE manuals and Reports on Engineering Practise No. 97, Virginia, 2000.
- FENTON, J. D., ABBOTT, J. E. Initial movement of grains on a stream bed: the effect of relative protrusion. *Proceeding of the Royal Society of London A.*, 352, 1977. pp. 523-537.
- FERNÁNDEZ LUQUE, R. F. *Erosion and transport of bed-load sediment*. Delft, 1974.
- FERNÁNDEZ LUQUE, R. F., VAN BEEK, R. V. Erosion and Transport of Bed-Load Sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 14(2), 1976. pp. 127-144.
- FORMANN, E., HABERSACK, H. M., SCHOBBER, S. Morphodynamic river processes and techniques for assessment of channel evolution in Alpine gravel bed rivers. *Geomorphology*, 90, 2007. pp. 340-355.
- GARCÍA M. H. The Legend of A. F. Shields, Discussion by Marcelo H. García, Member, ASCE. *Journal of Hydraulic Engineering*, September 2000. pp. 718-720.
- GRAF W. H., SUSZKA L. Sediment transport in steep channels. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 5(1), 1987. pp. 11-26.
- GRASS. Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *Journal of Fluid Mechanics*, 50(2), 1971. pp. 233-255.

- GREGORETTI, C. The initiation of debris flow at high slopes: experimental results. *Journal of Hydraulic Research*, 38(2), 2000. pp. 83-88.
- GUENTER, A. Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen. *Abhandlung zur Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften*, Zurich, 1971. 70 p.
- HEC-RAS. River Analysis System. *Hydraulic Reference Manual*, Version 4.1, 2010.
- HUNZINGER, L. Morphology in river widenings of limited length. *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology*, Zurich, 1998. 7p.
- CHIEW, Y., PARKER, G. Incipient sediment motion on nonhorizontal slopes. *Journal of Hydraulic Research*, 32(5), 1994. pp. 649-660.
- JULIEN, P. Y. *Erosion and Sedimentation*. Colorado State University, Cambridge university press, 2nd edition, 2010. 371 p. ISBN 978-0-521-53737-7.
- KALIŠ, J. *Hydraulický výzkum balvanitých skluzů*. VVÚH, Brno University of Technology, 1970.
- KANELLOPOULOS, P. M. Incipient Motion Under Shallow Flow Conditions. *Master thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998. p. 150.
- KEULEGAN, G. H. Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 21, 1938. pp. 707-741.
- KOLÁŘ V., PATOČKA, C., BÉM, J. *Hydraulika*. SNTL – Nakladatelství technické literatury ALFA, Praha, 1983. 475 s.
- LAMB, M. P., DIETRICH, W. E., VENDITTI, J. G. Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research*, 113, 2008. pp. 1-20.
- LAU, L., ENGEL, P. Inception of sediment transport on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(5), 1999. pp. 544-547.
- MEYER-PETER, E., MÜLLER, R. Formulas for Bed-Load Transport. *International Association for Hydraulic Structures Research*, Stockholm, second meeting, 1948. pp. 39-65.
- MIZUYAMA, T. Bedload Transport in Steep Channels. *Doctoral Thesis*. Kyoto University, January 1977. 118 p.
- MUELLER, E. R., PITLICK, J., NELSON, J. N. Variation in the reference Shields stress for bed load transport in gravel-bed streams and rivers. *Water Resources Research*, 41, 2005. pp. 1-10.
- NEILL, C. R. Mean-velocity criterion for scour of coarse uniform bed-material. *Proceedings of Congress IAHR*, 3, Colorado State University, Fort Collins, USA, 1967a. pp. 46-54.
- NEILL, C. R. Stability of coarse bed-material in open-channel flow. *Research council of Alberta*, Edmonton, 1967b.
- NIKORA, V., GORING, D., MCEWAN, I., GRIFFITHS, G. Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 2001. pp. 123-133.
- NIKURADSE, J. Laws of flow in rough pipes. *Technical memorandum 1292*. National Advisory Committee for Aeronautics. Translation of “Strömungsgesetze in rauhen Röhren” VDI-Forschungheft 361. Beilage zu “Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens” Ausgabe B Band 4, July/August 1933. Washington, 1950.
- NOVAK, P., ČÁBELKA, J. *Models in hydraulic engineering, Physical principles and design applications*. Pitman Advanced Publishing Program, 1981.
- OLSEN, N. R. B., ABERLE, J., KOLL, K. Resolving large bed roughness elements with an unstructured hexahedral grid. *River Flow 2010*, 2010. pp. 377-383. ISBN 978-3-939230-00-7.

- PAPANICOLAOU, A. N. The role of turbulence on the initiation of sediment motion. *Doctoral Thesis*. Virginia Polytechnic institute and State Univeristy, 1997.
- POKRAJAC, D., MANES, C. Velocity measurements of a free-surface turbulent flow penetrating a porous medium composed of uniform-size spheres. *Transport in Porous Media*, 2009.
- RECKING, A. An experimental study of grain sorting effects on bedload. *Doctoral Thesis*. Institut National des Sciences Appliquess de Lyon, 2006.
- ROHÁČOVÁ, D. Vliv zrnitosti krycí vrstvy na hydraulickou drsnost dna. *Diplomová práce*, Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodních staveb, Brno, 2013. 77 s.
- ROUŠAR, L., VESELÝ, J., ZACHOVAL, Z., TUREČEK, B. Zhodnocení funkce přírodního spádového stupně na řece Morávce pod rozdělovacím objektem Vyšní Lhoty. *Vodní hospodářství*, 62(11), 2012. s. 352-355. ISSN 1211-0760.
- ROUŠAR, L., ROHÁČOVÁ, D., SMELÍK, L., VESELÝ, J. Armovací proces krycí vrstvy dna šterkonosného toku za vysokých hodnot relativní drsnosti. *Závěrečná zpráva*, Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodních staveb, 2013, Brno. 13 s.
- SALEM, A. M. The effects of the sediment bed thickness on the incipient motion of particles in a rigid rectangular channel. *Seventeenth International Water Technology Conference, IWTC17*, 2013.
- SCHLICHTING, H. *Boundary-layer theory*. McGRAW-HILL book company, 1979. 817 p.
- SCHVIDCHENKO, A. B., PENDER, G. Flume study of the effect of relative depth on the incipient motion of coarse uniform sediments. *Water Resources Research*, 36(2), 2000. pp. 619-628.
- SHIMIZU, Y., TSUJIMOTO, T., NAKAGAWA, H. Experiment and macroscopic modelling of flow in highly permeable porous medium under free-surface flow. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 8(1), 1990. pp. 69-78.
- SUSZKA, L. Modification of transport rate formula for steep channels. *Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Lecture Notes in Earth Sciences*, 37, 1991. pp. 59-70.
- SUZUKI, K., HANO, A. Grain size change of bed surface layer and sediment discharge of an equilibrium river bed. *Proceedings, International Seminar on Grain sorting*, Ascona, Switzerland, 1992. pp. 151-156.
- VESELÝ, J., PAŘÍLKOVÁ, J., ZACHOVAL, Z., MALEŇÁK, J. Fyzikální model přírodního spádového stupně na řece Morávce pod jezem Vyšní Lhoty. *Závěrečná zpráva*, LVV ÚVST FAST VUT v Brně, 2001.
- WHITEHOUSE, R. J. S., HARDISTY, J. Experimental assessment of two theories for the effect of bedslope on the threshold of bedload transport. *Marine Geology*, 79, 1988. pp.135-139.
- WIBERG, P. L., SMITH, J. D. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, 23(8), 1987. pp. 1471-1480.
- YALIN, M. S. *Mechanic of sediment transport*. Pergamon Press Ltd., Germany, 1972. 290 p.
- YEN, B. C. Open Channel Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 2002. pp. 20-39.
- ZACHOVAL, Z., PAŘÍLKOVÁ, J., ROUŠAR, L., ROHÁČOVÁ, D. Tvar rychlostního pole v blízkosti dna za vysokých hodnot relativní drsnosti. *In 25th symposium on anemometry*, Institute of Hydrodynamics ASCR, Praha, květen 2011. pp. 75-84.
- ZANKE, U. C. E. On the influence of turbulence on the initiation of sediment motion. *International Journal of Sediment Research*, 18(1), 2003. pp. 17-31.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno, příjmení, titul: Ladislav Roušar, Ing.
Narozen: 1985 v Poličce
Rodinný stav: svobodný
Bydliště: Radčice 24, Skuteč 539 73, Česká republika
E-mail: rousar.l@fce.vutbr.cz

Vzdělání

2011 - dosud Doktorský studijní program na Fakultě stavební VUT v Brně
v oboru: Vodní hospodářství a vodní stavby.
2008 - 2011 Navazující magisterský studijní program na Fakultě stavební VUT
v Brně v oboru: Vodní hospodářství a vodní stavby.
2004 - 2008 Bakalářský studijní program na Fakultě stavební VUT v Brně
v oboru: Vodní hospodářství a vodní stavby.
2000 - 2004 Střední odborná škola stavební, Vysoké Mýto. Zaměření:
Vodohospodářské stavby.

Zahraněční stáže

2013 Colorado State University, Fort Collins (USA): Department of
Civil Engineering.
2009 - 2010 Aarhus University, Aarhus (Dánsko), Department of
Environmental Engineering.

Vědecká činnost

2014 Sestavení elektronického glosáře odborných termínů a jejich
anglických ekvivalentů – spoluřešitel.
2014 Charakteristika zatopení nízkých pravoúhlých přelivů se širokou
korunou – spoluřešitel.
2013 Transport dnových splavenin přes přeliv pravoúhlého průřezu se
širokou korunou – spoluřešitel.
2013 Aplikace metody EIS v objektu ČOV při měření provzdušnění –
spoluřešitel.
2012 Počátek pohybu splavenin za vysokých hodnot relativní drsnosti –
řešitel.
2012 Armovací proces krycí vrstvy dna štěrkonosného toku za
vysokých hodnot relativní drsnosti – řešitel.
2012 Průtokové charakteristiky pravoúhlého přelivu se širokou korunou
– spoluřešitel.
2012 Stanovení hodnoty součinitele drsnosti vodních toků vybranými
empirickými vzorci – spoluřešitel.

2011 Experimentální výzkum a numerické modelování úplavu za návodní hranou přelivu se širokou korunou obdélníkového průřezu – spoluřešitel.

Pracovní zkušenosti

2009 - 2013 Pöyry Environment a.s. – hydrodynamické modely, hydrotechnické výpočty, grafické práce.
2007 - 2008 ŽP PROJEKT s.r.o. – geodetické práce, projekční práce.
2006 - 2007 Agroprojekce Litomyšl, spol. s r.o. – geodetické práce, projekční práce.
2005 Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s r.o. – odběr vzorků vody, vrtné práce, výroba filtračních náplní.

Zahraníční pracovní zkušenosti

2014 Srbsko (Provod, s.r.o.) – zmapování povodňových škod zasažených obcí Bogatic a Koceljevo.
2008 Island (INEX) – stavba pergoly, obnova pěších cest.

Publikace v recenzovaných, impaktovaných časopisech a indexovaná konference

ZACHOVAL, Z., ROUŠAR, L. Flow structure in front of the broad-crested weir. *Experimental Fluid Mechanics 2014*, 18. 11. 2014 – 21. 11. 2014, Český Krumlov, přijato.

ROUŠAR, L., ZACHOVAL, Z. Incipient motion of coarse uniform sediment. *Journal of Hydraulic Research*, v recenzním řízení.

ZACHOVAL, Z., ROUŠAR, L. Incipient Transport of Single Particles over Broad-Crested Weirs. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, v recenzním řízení.

ZACHOVAL, Z., KNĚBLOVÁ, M., ROUŠAR, L., RUMANN, J., ŠULC, J. Discharge coefficient of a rectangular sharp-edged broad-crested weir. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, 62(2), 2014. p. 145-149. ISSN: 0042-790X.

ROUŠAR, L., VESELÝ, J., ZACHOVAL, Z., TUREČEK, B. Přírodní spádový stupeň na řece Morávce – vysvětlení. *Vodní hospodářství*, 63(2), 2013. s. 58. ISSN 1211-0760.

ZACHOVAL, Z., MISTROVÁ, I., ROUŠAR, L., ŠULC, J., ZUBÍK, P. Zone of flow separation at the upstream edge of a rectangular broad-crested weir. *Journal of Hydrology and Hydromechanic*, 60(4), 2012. p. 288-298. ISSN 0042-790X.

ROUŠAR, L., VESELÝ, J., ZACHOVAL, Z., TUREČEK, B. Zhodnocení funkce přírodního spádového stupně na řece Morávce pod rozdělovacím objektem Vyšní Lhoty. *Vodní hospodářství*, 62(11), 2012. s. 352-355. ISSN 1211-0760.

SUMMARY

This dissertation thesis with the title “The limits of movement and quantification of bedload amount for gravel-bed rivers” in detail summarizes the findings in the field of sediment transport extending for flow at small relative height and generalizing their applicability for practical activity. The thesis enriches inception motion and bedload quantification in the case of gravel-bed rivers by experimental researches, numerical models and the verification of results in river widening (river bed drop).

The literature review summarizes results and authors conclusions that are often mutually excluded. Analyzing their values and procedures the assessment was carried out of present knowledge concerning inception motion, sediment transport, sorting of surface layer, roughness coefficients and hydraulic roughness. The criteria for inception motion were defined based on dimensionless analysis expressed by Shields criteria for full submerged cohesionless homogenous grains placed on a flat horizontal bed at unaerated full turbulent flow. The partial conclusions showed the experiments had to be performed to complete missing information and allowed to quantify the individual effects.

Measurements took place in the Laboratory of Water Management Research of the Department of Water Structures at the Faculty of Civil Engineering of Brno University of Technology. During the experiments bedload mass discharge was measured from which transport equations were evaluated for homogenous and heterogenous bed materials in the case of unaerated full turbulent flow and small relative height. Evaluated equations were compared with the most commonly used transport equations and newly Meyer-Peter and Müller relationship was extended for this specific flow conditions. Point's velocities were measured by UVP Monitor in axis along flume. Velocity profiles were plotted from point's velocities and the influence of structure of homogenous and heterogenous bed materials on velocity profile was determined. The bed surface of homogenous material was scanned by laser for one case chosen measurement at initial motion of bedload and newly imported into a three dimensional numerical model. Velocity profile from numerical model was verified with measured and theoretical velocity profiles. In the case of heterogenous bed material the change of Nikuradse's equivalent sand roughness height was determined for initial and final surface layer sorting. Practically, equations for needed determination of Nikuradse's equivalent sand roughness height were determined and compared with available author's relationships.

Contemporary knowledge about sorting process were analyzed and explained for main sorting ideas. Performed experiment with heterogeneous material allowed to describe in detail process of static sorting in surface layer for unaerated full turbulent flow at small relative height. The bed stability was expressed in terms of a change of active flow width due to final surface layer sorting. In addition, the surface layer thickness was evaluated.

The findings from experimental part were verified with the object of nature-inspired river widening. Flow characteristics were simulated by two dimensional numerical model for present state. Sediment transport analyze and bed level development were simulated by one dimensional model of the set parameters from

experimental conclusions. The verification of models results with present state yields good agreement. Verified models allowed to describe the functionality of the pilot hydrotechnics structure – river bed drop in climatic and geological conditions of Czech Republic.