

A. Pohyb hrubozrnných splavenin v bystrinách

Pohyb splavenin v tocích je složitý proces, jehož mechanismus je předmětem zkoumání již více než sto let. V průběhu let se poznávání zákonitosti tohoto procesu prohlubuje, ale dostupné informace jsou stále nejspíše dostatečné pro zformulování ucelené teorie vedoucí k uspokojivě přesnému předpovídání pohybu splavenin v tocích. Hlavními důvody jsou na jedné straně množství podmínek a parametrů ovlivňujících proces a na straně druhé omezené možnosti sledovat a popsat proces pomocí experimentu jak v laboratorních podmínkách tak tím spíše v podmínkách polních, tedy přímo v tocích. Důsledkem je, že v literatuře existuje celá řada empiricky založených predikčních metod pro pohyb splavenin, jejichž platnost je omezena zpravidla jen na konkrétní podmínky pro něž byly metody navrženy a ověřeny. Extrapolace empirických metod do podmínek jiných často nevede k úspěchu, jak prokázaly mnohé publikované pokusy o verifikaci navržených metod nezávislými daty.

Vi se, že mechanismus transportu částic v proudu vody je různý pro částice unášené působením turbulence toku (částice suspendované v proudu [suspended load], typicky relativně jemné částice) a pro částice uvalené do pohybu především erozí dna proudem toku (dnové splaveniny [bed load], typicky hrubé částice, jež turbulence proudu není schopna rozptýlit v proudu). Za současného stavu poznání problematiky platí, že modelovat a předpovídat chod dnových splavenin je obtížnější a méně přesné než předpovídat chod suspendovaných splavenin.

Tato literární práce se zabývá pohybem hrubých dnových splavenin. Cílem je sebrat v literatuře a následně zhodnotit metody pro výpočet transportního průtoku dnových splavenin v tocích. Předmětem hodnocení je, zda klasické, často v literatuře citované, metody pro výpočet pohybu dnových splavenin mohou být úspěšně extrapolovány do podmínek transportu velmi hrubých částic (velikost částic větší než 64 mm).

A1. Pohyb dnových splavenin v sterkových korytech ($2 \text{ mm} < d < 64 \text{ mm}$)

A1.1 Stručný přehled predikčních metod

Podle způsobu svého odvození se rovnice pro chod dnových splavenin (přesněji pro transportní průtok dnových splavenin q_s [kg/(m.s)]) dělí na predikční rovnice vycházející z

- efektivního smykového napětí, (rozdílného napětí mezi napětím skutečným a kritickým)
- efektivního průtoku (rozdílného transportním průtokem splavenin mezi průtokem skutečným a kritickým; užíváno zvláště u toku s velkým sklonem, kde hloubku toku, a tedy dnové smykové napětí, není možné dobře experimentálně určit)
- výkonu proudu (stream-power formulae)
- pravděpodobnosti výskytu jevu (formulae based on probabilistic concepts).

Existují také predikční rovnice navrženy pro speciální podmínky jako jsou

- velký sklon dna toku
- nízké smykové napětí ve dne
- široké zrnitostní rozdělení transportovaného materiálu.

Všechny zde diskutované metody však vycházejí z podmínky ustáleného a rovnoměrného proudění.

Výzkumné středisko WES (Water Experimental Station) spadající pod US Army Corps of Engineers vyvinulo výpočetní programy SAM a HEC-6, jejichž součástí je několik z literatury vybraných modelů pro pohyb dnových splavenin. Některé originální modely WES pro potřeby svých výpočetních programů modifikovala kalibrací vlastními daty. Při rozhodování o použití některého z nabízených modelů je důležité uvážit pro jaké podmínky byl model kalibrován (velikost částic a zrnitostní rozložení dnového materiálu, sklon toku atd).

Tabulka 1a. Modely zahrnuté do výpočetních programů vyvinutých v WES:

<i>Autor (Rok)</i>	<i>Použití</i>	<i>Poznámka</i>
Ackers-White (1973)	sand and/or gravel bed streams	original eq. pure empirical; modified by WES
Ackers (1993)		
Einstein(-Brown) (1950)	multiple grain size for sand and gravel-bed streams	more physically and stochastically-based; modified by WES
Copeland-Thomas (1989)	multiple grain size extending the function to larger gravel sizes	modification of Laursen (1958)
Mayer-Peter and Muller (1948)	multiple grain size for gravel-bed streams	data: lab. zlab se dny různých zrnitosti ($d = 0.3 - 29 \text{ mm}$) a $\rho_s = 1300 - 4200 \text{ kg/m}^3$. Pro dno byly použity materiály s úzkým i širokým zrnitostním rozdělením.
Parker (1990)	multiple grain size for gravel (only particles coarser than 2 mm)	data: $d=44-76 \text{ mm}$ na povrchu, sklony 0.2-1% (Oak Creek), calibrated by data from very steep coarse-bedded streams
Profitt and Sutherland (1983)	sand and gravel bed streams	multiple grain size modification of Ackers-White formula
Yang (1973, 1984)	multiple grain sand and gravel (finer than 10 mm)	modified by WES

Tabulka 1b. Některé další významné modely:

<i>Autor (Rok)</i>	<i>Použití</i>	<i>Poznámka</i>
Abrahams (2003)	pro sheet flow; modifikace Bagnoldovy rovnice	data: 55 měření v lab kanálech a tlakových potrubí z literatury
Bagnold (1966, 1980)	pro sheet flow	energetický přístup
Engelund and Hansen (1967)	toky s neomezenou nabídkou dnových splavenin	
Schoklitsch (1962)	toky s neomezenou nabídkou dnových splavenin	doporučeno v Bathurst et al (1987)
Sun and Donahue (2000)	toky s částečným transportem	viz Habersack a Laronne (2002)
van Rijn (1986)		overena pro částice $< 1.5 \text{ mm}$
Wilcock and Crowe (2003) Wilcock and Kenworthy (2002)	toky s částečným transportem (sterk do 64 mm a směsi sterku a pisku)	data: toky a zlab (pisky od 0.5 mm a sterky do 64 mm).
Yalin (1972, 1977)	toky s neomezenou nabídkou dnových splavenin	rce založena na popisu procesu
Zanke (1999)	toky s částečným transportem	analytická rovnice

A1.2 Analýza predikčních metod založených na laboratorních experimentech

Obecný tvar bezrozměrné transportní rovnice pro průtok dnových splavenin je

$$\Phi = \beta \theta^{p_2}$$

a jednotlivá v ní obsažená bezrozměrná čísla

$$\Phi = \frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad \theta = \frac{\tau}{\rho_w(s-1)gd}$$

Φ ... (Einsteinův) bezrozměrný průtok dnových splavenin [-],

q_s průtok dnových splavenin [kg/(s.m)],

θ bezrozměrné smykové napětí na povrchu dna, Shieldsovo číslo [-],

τ smykové napětí na povrchu dna, $\tau = \rho_w g R_b S$ [Pa],

β bezrozměrný parametr pro smykové podmínky u dna [-],

d charakteristická velikost částice [m],

s specifická váha částice, $s = \rho_s / \rho_w$ [-].

p_2 ... kalibrační parametr rovnice [-].

Fyzikální význam těchto bezrozměrných čísel je následující:

- Shieldsovo číslo je poměrem setrvačné síly proudící vody nad dnem jejíž smykový účinek působí jako hnací síla na částici ve dne a váhy částice zmniejsené o vliv Archimedovy síly

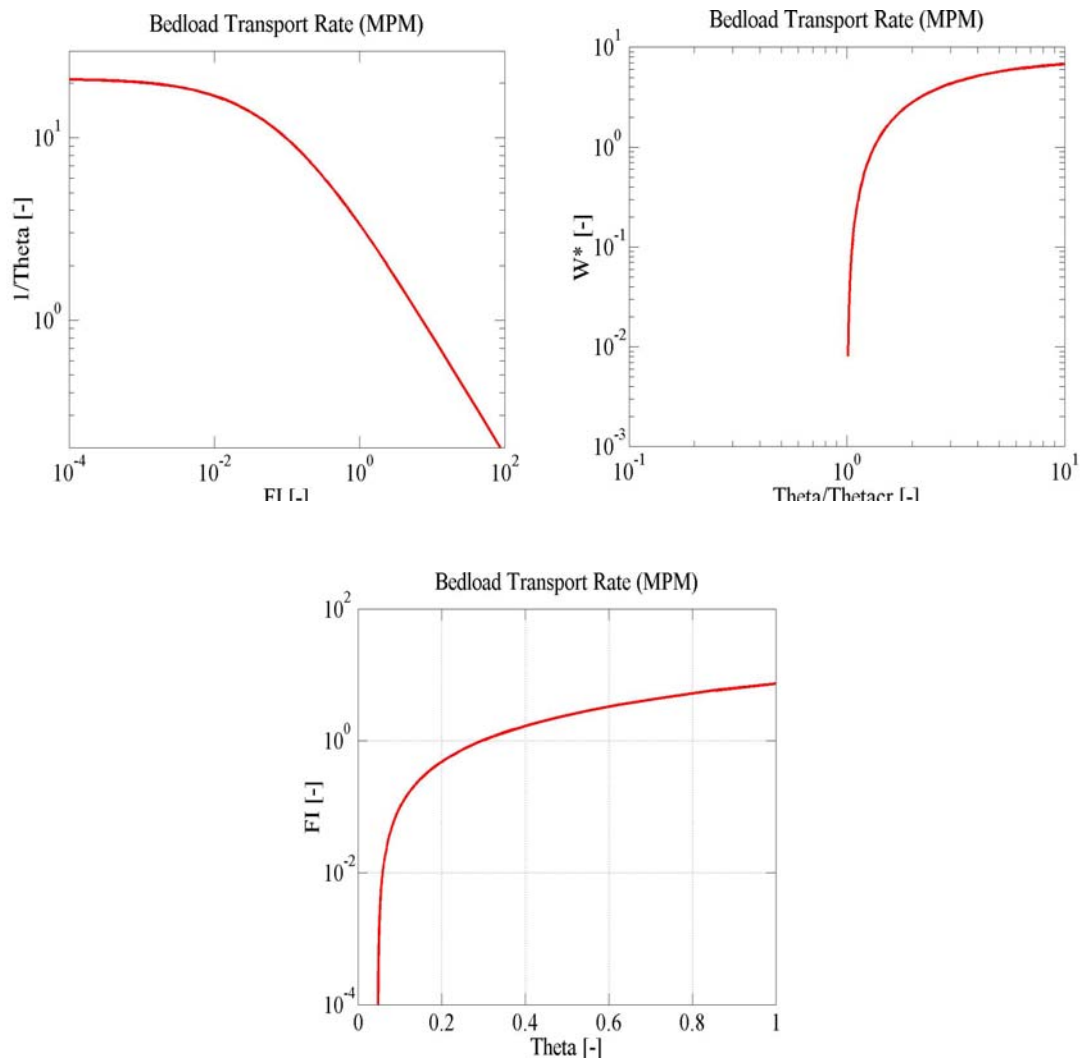
- Einsteinovo číslo je poměrem průtoku dnových splavenin a sedimentačního toku reprezentovaného součinem usazovací rychlosti částice a průměru částice ($v_t \cdot d$).

V souvislosti s výpočtem pohybu dnových splavenin se v literatuře nejčastěji cituje a v evropské praxi pravděpodobně nejvíce používá rovnice Meyer-Peterova a Mullerova, 1948, (dale jen MPM), a to buď v originální nebo upravené podobě. Tato empirická, na hodnocení excesivního smykového napětí založená, rovnice byla kalibrována daty sbíranými Meyer-Peterem a jeho spolupracovníky při pokusech v zlabu hydraulické laboratorie ETH v Curychu v průběhu 30. a 40. let. Z této laboratorie pocházejí také pozdější data a teoretické rovnice publikované v doktorských pracích Jaggiho (1983) a Rickenmanna (1990). Tyto práce se zaměřují na pohyb dnových splavenin ve zlabu velkého sklonu ($S > 3\%$, MPM data byla sebrána pro sklon zlabu do 2.5 %). Rozmezí testovaných materiálů v rámci databáze již byla kalibrována originální MPM je v Tab. 1a. Originální rovnice má poněkud nepřehledný tvar (viz např. Gomez a Church, 1989), který ale lze za použití Einsteinova bezrozměrného transportního toku, Φ , interpretovat jednodušším zápisem (Rickenmann, 2001)

$$\Phi = 8 \left(\frac{n_g}{n_t} \theta - \theta_{cr} \right)^{1.5} \quad \text{kde } \theta_{cr} = 0.047.$$

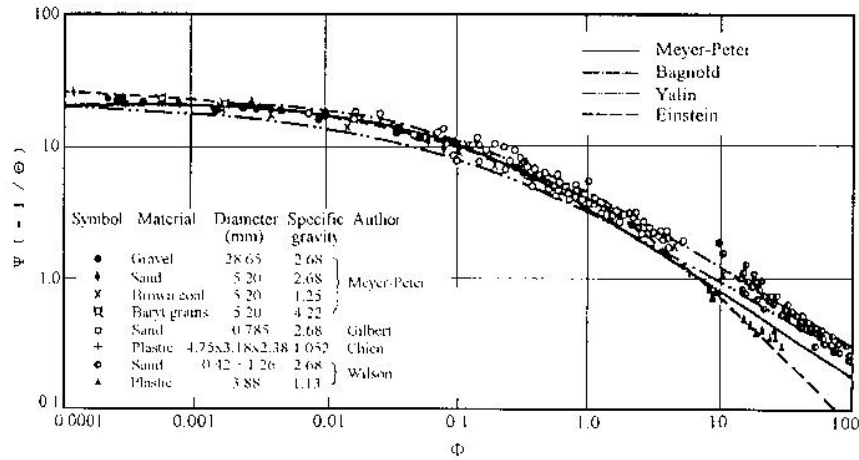
Rozdíl mezi $n_g =$ Manningovým n vztahujícím se k drsnosti dnového zrna a $n_t =$ Manningovým n získaným z měřeného celkového odporu dna lze často zanedbat (MPM pro $n_g = n_t$ je použit napr. v Cheng, 2002 nebo Chanson, 1999, 2004)

$$\Phi = 8(\theta - 0.047)^{1.5} = (4\theta - 0.188)^{1.5}.$$



Obr. 1. MPM rovnice v různých souřadnicích bezrozměrných čísel.

Chien a Wan (1998) porovnali metody Meyer-Petera, Einsteina, Bagnolda a Yalina převedením všech rovnic na společný tvar $1/\theta = f_n(\Phi)$ a konstatovali relativně malý rozdíl mezi rovnicemi kromě oblasti extrémně nízkých a extrémně vysokých Φ (obr. 2). Monografie venuje analýze rozdílu mezi metodami velkou pozornost a zabývá se podrobně způsobem modelování vlivu zrnitostního rozložení transportovaných částic na transportní tok splavenin u jednotlivých modelů.



Obr.2. Porovnaní několika klasických rovnic pro průtok dnových splavenin (Chien a Wan, 1998).

Rickenmann (1991, 2001) doplnil MPM databazi o data Jaggiho, Smarta a sve (vsechny z hydraulicke laboratore ETH), cimz databazi rozsiril predevsim co do rozsahu merenych sklonu zlabu, a vyhodnocenim celkove databaze dosel k rovnici

$$\Phi = 2.5\sqrt{\theta}(\theta - \theta_{cr})Fr$$

pri zanedbani vlivu zrnitostniho rozdeleni materialu a pri uvazovani pouze castic specificke hustoty $s = 2.68$. Pro podminky pouze vysokeho sklonu ($0.03 < S < 0.2$) Rickenmannovi vychazi jako presnejsi rovnice

$$q_s = 5.8(q - q_{cr})S^{2.0}$$

kde q je jednotkovy průtok.

Diskutovany typ rovnic pocita s excesivnim (efektivnim) smykovym napetím prevysujícím kritické napětí a je použitelný pouze pro kladné hodnoty excesivního smykového napětí (zpravidla tedy pro podmínky středního až silného chodu dnových splavenin). Kritické napětí je parametr, jež je těžké dobře definovat a ještě těžší měřit. Vágní definice říká, že je to hraniční hodnota smykového napětí pro začátek pohybu částic ve dne. Při heterogenitě dna není ale jasné, jak velké částice, v jak velké části plochy dna a v jaké časové frekvenci se mají nebo nemají dávat do pohybu, aby bylo možno sledované podmínky vyhlásit za kritické. Kritické napětí proto bývá v modelech uváděno spíše jako jistá referenční hodnota charakterizující malý ale stálý chod splavenin (tedy hodnota vyšší než jsou ty na přechodu dna nebo části dna z klidu do pohybu). Technicky se jedná vlastně o pomocný parametr pomocí něhož zavádíme do modelu vliv velikosti částic. Analýza rovnic ukáže (viz níže), že tento způsob zavedení velikosti částic do modelu pro chod dnových splavenin není právě šťastný. Říká se, že nepřesnost plynoucí z rozdílných výsledků různých predikčních rovnic pro průtok

dnových splavenin je značně menší než nepřesnost zanesena do libovolné rovnice způsobem určení kritického dnového smykového napětí, s níž rovnice pracují.

Případná rovnice bez kritického napětí by byla atraktivní především pro podmínky slabého chodu splavenin, tedy nízkých θ . Paintal (1971) ukázal, že obecná rovnice nahrazuje Einsteňův model (1950) za velmi nízkých θ (mezi 0.007 a 0.07) při $p_2 = 16$ a $\beta = 5.56 \times 10^{18}$. Zatím se však nepodařilo najít rovnici obecného typu, která by se obešla bez kritické hodnoty smykového parametru v celém širokém rozsahu Shieldových čísel.

Nedávne analýzy ukázaly, že tvar obecné rovnice bez θ_{cr} je aplikovatelný v oblastech vysokých hodnot Shieldova čísla. Za podmínek sheet flow ($\theta > 0.8$) platí podle Abrahamsem (2003) provedené analýzy laboratorních dat Smarta, Rickenmanna a Nnadi & Wilsona, že $p_2 = 1.5$ a $\beta = U/u^*$, kde U je střední rychlost proudu vody. Protože $u^* = U(\lambda_b/8)^{0.5}$, vychází pro Abrahamsovu rovnici $\beta = (8/\lambda_b)^{0.5}$. Cheng (2002) ukázal, že pro proudění $\theta \gg \theta_{cr}$ (a tedy $\theta - \theta_{cr} \approx \theta$) se rovnice MPM, Bagnolda, Englund-Fredsoea a Yalina všechny zjednodušují na $\Phi = \beta\theta^{1.5}$ s konstantním β , jehož hodnoty se pohybují mezi 8 (MPM) a zhruba 13 (Bagnold, Yalin, Wilson). Porovnání hodnot koeficientu p_2 (při β branem jako číslo, tedy nezávislem na jakémkoliv parametru) z rovnic Paintala a Abrahamse nabízí následující trend. Hodnota p_2 je vysoká u nízkých θ a klesá za podmínek zvyšujícího se dnového smykového napětí až ke konečné hodnotě 1.5 pro vysoká θ .

Pro rovnice s nezanedbatelným vlivem θ_{cr} na θ je obecný tvar parametru $\beta = \kappa(1 - \frac{\theta_{cr}}{\theta})^{p_3}$, kde κ a p_3 [-] jsou kalibrační parametry rovnice. Pro zjednodušenou MPM rovnici v tvaru s β je $p_3 = 1.5$ a $\kappa = 8$ (viz. Smart, 1998). Cheng (2002) se za použití laboratorních dat z literatury (Gilbert, MPM, Wilson, Paintal) pokusil zformulovat regresní rovnici pro celou širokou oblast Shieldových čísel, jež by vyhovovala tvaru obecné rovnice a vyhnula se nutnosti použít kritické smykové napětí. Cheng použil exponenciální vztah mezi β a θ , aby pokryl trend v širokém rozmezí hodnot Theta. Podle Chengovy rovnice je $p_2 = 1.5$ a $\beta = 13 \cdot \exp(-0.05/\theta^{1.5})$. Tato rovnice dává za vysokých Theta vyšší průtok splavenin než MPM, pro $\theta < 0.13$ jsou předpovězené průtoky u obou rovnic velmi podobné. Kritika (Smart, 1998) k Chengově rovnici poznamenává, že konstanta 0.05 ve vypočtu parametru β je zakuklené $\theta_{cr} = 0.047$ z MPM rovnice, porovnání se Smartovými daty z curyšského zlábu navíc ukazuje, že Chengem předpovězené hodnoty za vysokého Theta ($0.1 < \theta < 3.4$) jsou příliš vysoké. Smartova data však reprezentují proudění s velkým sklonem a proto nejsou k porovnání nejvhodnější. Každou transportní rovnici je zřejmě třeba modifikovat pro potřeby velkého sklonu (viz. Rickenmann, 2001).

Souhrně lze říci, že Φ versus θ rovnice mají exponent p_2 rovný 3/2 (1.5) pro vysoká θ , v oblasti malých hodnot Shieldova čísla (oblast typická pro sterkové toky) se stává Φ velmi příkrú (a nelineární funkcí) $1/\theta$ (viz. Obr. 1). To znamená, že už malá změna θ přináší velkou změnu Φ a tedy vypočteného průtoku dnových splavenin. Tato velká citlivost rovnice je zdrojem značné předpovědní nejistoty. Theta obsahuje dnové smykové napětí a charakteristickou velikost zrna transportovaného materialu. Nejistoty v určení těchto parametrů jsou potenciálním zdrojem velkých nepřesností ve vypočtených q_s . Toto nebezpečí narůstá se snižujícím se θ . Pro sterkové toky platí, že dnová smyková napětí zpravidla jen o málo převyšují kritické nebo referenční smykové napětí (typický

θ/θ_{cr} nepřevyšuje 2 ani za povodni, Wilcock, 2004), spadají tedy právě do nebezpečné zóny silné závislosti vypočítávaného průtoku splavenin na vhodném určení velikosti částice a dnového smykového napětí.

Dalsí úpravy obecné rovnice:

Při zanedbání vlivu dnových útvarů platí $p_2 = p_3$. Za podmínek intenzivního pohybu částic při velkém sklonu dna má p_2 tendenci růst z 1.5 na $p_2=2.5$ (Rickenmann, 2001) až $p_2=3$ (Istanbulluoglu et al, 2003). Istanbulluoglu et al (2003) v přehledu transportních rovnic z literatury uvádí další variace obecné rovnice: Yalin (1977) ukázal, že κ by mělo být 17 pro vysoká θ ; rozptýl κ hodnot mezi 4-40 uvádí různé rovnice shromážděné v Yalin, 1977 a Simon and Senturk, 1977.

Pro všechny popsány metody je společné, že vycházejí z velmi omezeného množství dat, přičemž použítá data jsou všechna laboratorní (většina z ETH a Queen's University). Tyto modely tudíž v sobě nemají zabudovaný mechanismy pro řešení problému spojených s pohybem dnových splavenin ve skutečných tocích a zejména v bystrinách. Jde hlavně o problémy nerovnovážného a částecného transportu. Tyto aspekty splaveninového režimu toku jsou diskutovány v následující kapitole.

A1.3 Analýza predikčních metod uvažujících poměry ve skutečných tocích

Pro chod dnových splavenin je typické, že se mění v prostoru (liši se v různých lokalitách podél toku, ale i v různých místech jednoho příčného profilu). Předpovědní modely užívají střední hodnotu smykového napětí (střední pro celou šířku dna v sledovaném příčném profilu), čímž zavádějí do výpočtu nepřesnost plynoucí ze zjednodušení reálné situace. Silná nelinearita transportní rovnice navíc způsobuje, že odchylky od střední hodnoty se v extrémech zesilují a vytváří relativně velké chyby v odhadu lokálního transportu za lokálně velmi nízkých nebo velmi vysokých smykových napětí. Metody pro určení lokálního smykového napětí existují, vyžadují však lokální měření v toku.

Dalším zdrojem nepřesnosti je zanedbání rozdílu mezi celkovým smykovým napětím ve dne (získaným pro příčný profil výpočtem z hloubky a sklonu) a napětím působícím na zrna ve dne (skin friction, grain stress) a způsobujícím jejich transport. Napětí působící na zrna je jen částí celkového napětí, zbytek působí na překážky ve dne a v proudu. Určení této části celkového napětí, jež působí na zrna a je pohybnou silou jejich transportu je možné přibližnými metodami (metody drag partitioning).

Pro sterkové reky je typické, že povrch dna je tvořen většími částicemi než podloží dna. Toto je důsledek vymílání a unášení menších částic z povrchu dna. Zrnitostní složení povrchu dna se takto přirozeně třídí a hrubne. Při různých průtocích jsou postupně odnášeny různé frakce dnových částic a na povrchu dna zůstávají jen nejhrubší částice, které ani relativně silný proud není schopen přemístit. Tomuto jevu se říká opevnování dna (armouring). Procesem opevnování dna se postupem času na povrchu dna omezuje (obzvláště lokálně) nabídka transportovatelných částic. Tento proces má vliv na změny v chodu dnových splavenin. Není však uvažován v klasických rovnicích (viz výše), které nerozlišují mezi zrnitostním složením povrchu dna a dnového

podlozi a uvazují implicitně podložní materiál pro celé dno (tzv. substrate-based models). Jejich alternativou jsou tzv. surface-based modely, diskutovány níže. Haschenburger a Wilcock (2003) zkoumali vliv povodňového průtoku na přirozeně opevněný povrch hrubozrnného dna. Dle jejich výzkumu nejsou ani nekolikaleté povodně sto narušit nebo odplavit přirozeně opevněnou horní vrstvu dna, což má kromě praktických výhod spojených se stabilitou dna i výhodu v jednodušší předpovědi transportního průtoku splavenin za nekolikaletých povodní. Až extrémnější povodně jsou schopny rozrušit a odplavit opevněný povrch dna. V době mezi těmito povodněmi se uplatňuje částečný (selektivní) transport související s přirozeným opevněním dna (a partial transport, viz např. Wilcock, 2003, nebo Habersack a Laronne, 2002).

Při rozhodování o vhodnosti použití nějaké rovnice je potřeba uvážit, jestli simulujeme tok ve splaveninové rovnováze (neexistuje deficit nabídky transportovatelných částic na povrchu dna) nebo jestli máme co do činění s podmínkami částečného (selektivního) transportu splavenin v toku. Rovnice odvozené pouze pro rovnovážný stav nejsou použitelné v podmínkách částečného transportu (Habersack a Laronne, 2002). S částečným transportem, bezně se vyskytujícím v alpských rekách (Habersack a Laronne, 2002), počítají např. rovnice Parkera et al (1982), Parkerova (1990), Zankeova (1999), Sun & Donahue (2000) a Wilcockova & Croweova (2003).

Snaha formulovat obecný transportní model pro pohyb dnových splavenin v tocích hrubozrnného podloží se musí vypořádat s problémem určení reprezentativní velikosti transportovatelných dnových částic pro potřeby modelu, zvláště v souvislosti s případným tříděním frakcí na povrchu dna. Užitečné může být zavedení bezrozměrného čísla

$$W^* = \frac{\Phi}{\theta^{1.5}}$$

v němž se velikost částice nevyskytuje. Referenční hodnota $W^*=0.002$ odpovídá hodnotě $1.004\theta_{cr}$ v MPM rovnici. Pro vysoké hodnoty Theta (a tedy $\theta - \theta_{cr} \approx \theta$) je $W^* = \text{konst}$ (neboť $\beta = \text{konst.}$, viz předcházející kapitola).

Pro sterkové toky se zdají být vhodné modely rozeznávající možný rozdíl mezi částicemi reprezentujícími povrch dna a částicemi reprezentujícími splaveninový materiál. Modely vycházející z materiálu povrchu dna se označují SBTM, tj. Surface-Based Transport Models. SBTM modely jsou schopny simulovat přechodné jevy ve dne jako opevnění dna (armoring), vymílání (scour) nebo zanasení (aggradation). S formováním moderních SBTM modelů přišel v 80. letech Parker (první verze v Parker et al, 1982). Tento model byl jako jeden z prvních založen na polních měřeních (Oak Creek data sebrána Milhousem, 1973). Často citována je v literatuře SBTM verze z roku 1990 (Parker, 1990), založená jak na polních tak na laboratorních měřeních. S daleko rozšířenou verzí SBTM modelu přišli Wilcock a Croweova, 2003. Rozšíření modelu bylo umožněno novými výsledky testů ve zlabu, jež byly poprvé provedeny jako sdružené sledování charakteristik proudění vody, chodu splavenin a zrnitosti složení dna. Model nově zahrnuje i vliv pískové fáze na chod sterku. Dle pozorování a dle modelu zvyšuje přítomnost písku transportní kapacitu sterkových splavenin.

Wilcockův & Croweova model počítá transport zvláště pro každou frakci materiálu zastupenou ve dne. Základní vztah je stejný jako u jiných SBTM modelů pro zrnité různorodý sediment, totiž $W^*_i = \text{fn}(\tau/\tau_{ci})$, kde

i oznaceni frakce, jejiz transport je pocitan

$$W_i^* \dots \text{bezrozmerné číslo } W_i^* \text{ pro frakci } i, W_i^* = \frac{(s-1)gq_{si}}{F_i u_*^3} \quad [-]$$

q_{si} prtok dnovych splavenin i -te frakce [kg/(s.m)],

τ smykove napeti na povrchu dna, $\tau = \rho_w g R_b S$ [Pa],

u_* smykova rychlost na povrch dna [m/s],

F_i pomerne mnozstvi i -te frakce ve dne [-],

τ_{ri} referencni smykove napeti ve dne pro i -tou frakci [Pa].

Referencni napeti τ_{ri} se urcuje pomoci tzv. funkce kryti dna (hiding function), jez vztahuje τ_r k charakteristickym velikostem zrna pocitane i -te frakce, d_i , a zrna na povrchu dna, d_{sm} , a k pomernemu mnozstvi piskove frakce ve dne, F_s .

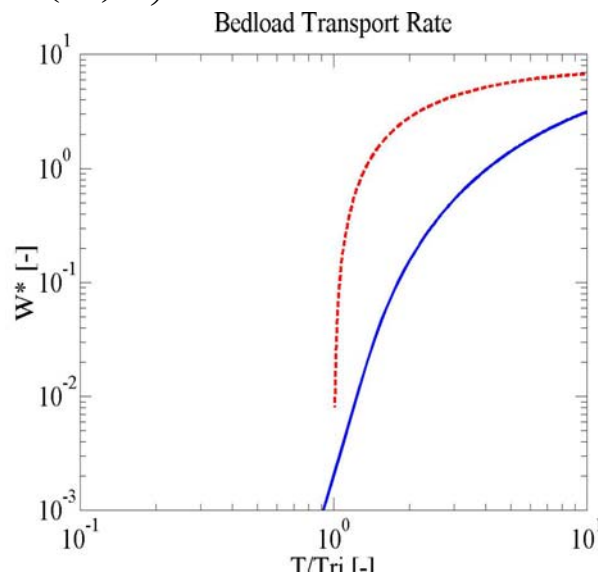
Model Wilcocka a Croweove tvori nasledujici soustava rovnic

$$\tau_{sm} = (0.021 + 0.015 \exp[-20F_s])(s-1)\rho g d_{sm}$$

$$\tau_{ri} = \tau_{sm} \left(\frac{d_i}{d_{sm}} \right)^{1 + \exp\left[1.5 \frac{d_i}{d_{sm}}\right]^{0.67}} \quad \text{funkce kryti dna}$$

$$\frac{(s-1)gq_{si}}{F_i u_*^3} = 0.002 \left(\frac{\tau}{\tau_{ri}} \right)^{7.5} \quad \text{pro } \tau / \tau_{ri} < 1.35$$

$$\frac{(s-1)gq_{si}}{F_i u_*^3} = 14 \left(1 - \frac{0.894}{\left(\frac{\tau}{\tau_{ri}} \right)^{0.5}} \right)^{4.5} \quad \text{pro } \tau / \tau_{ri} \geq 1.35.$$



Obr. 3. Wilcock & Crowe(-) a MPM (--) rovnice pro stejnozrnný material.

Vyznamnou prednosti SBTM modelu je, ze muze byt pouziti jak k predpovedi prutoku splavenin jiste frakce dnoveho materialu na zaklade dnoveho smykoveho napeti a charakteristicke velikosti zrna na povrchu dna tak i opacne k predpovedi dnoveho smykoveho napeti a charakteristicke velikosti zrna na povrchu dna na zaklade zadaneho transportniho prutoku q_s (a velikosti transportovaneho zrna). Tato moznost dovoluje pomoci SBMT modelu hodnotit stabilitu dna (najme odolnost prirodzene opevneneho dna) pro ruzne transportni prutoky. Tato moznost nefunguje u substrate-based modelu!

Tzv. dvoufrakcni transportni model pro smes piskovych a sterkovych splavenin (Wilcock, 1998; Wilcock and Kenworthy, 2002) byl zpracovan jako alternativa k SBMT modelu. Ke kalibraci tohoto modelu bylo pouzito laboratornich i polnich dat.

A1.4 Hodnoceni/Modifikace metod polnimi experimenty

Rovnice pro pohyb dnovych splavenin jsou obecne neprilis presne v kvantitativnim urcovani transportnich prutoku. Jejich hlavni devizou je schopnost urceni trendu pri zmenach podminek na toku. Vyznamne zpresneni predpovedni schopnosti rovnic pro kvantitativni urceni transportniho prutoku na konkretnim useku toku lze dosahnout kalibraci rovnice pomoci vzorku a dat z useku toku v nemz prutok splavenin vypocitavame nebo aspon z toku podobneho. Bohuzel, polnich dat je zatim v literature malo a prezentovana mereni jsou casto neuplna nebo nedostatecne presna. Napriklad, vzorky nejsou odebrany zvlast pro povrch dna a pro podpovrchovou vrstvu dna. Dale, ruzne zpusoby mereni chodu dnovych splavenin maji ruzne ucinnosti. Zatimco zachytne kose maji ucinnost pouhych 40-60%, Helley-Smithuv sampler dosahuje ucinnosti az 100 % (Habersack a Laronne, 2002).

Tabulka 2. Některé články obsahující polní data pro overení transportních rovnic.

<u>Zdroj / Lokalita</u>	<u>Zrno [mm] povrch / podvrstva</u>	<u>Sirka[m] / Hloubka</u>	<u>Sklon [%]</u>	<u>Prutok [m³/s]</u>	<u>Transp.t [kg/(ms)]</u>
Habersack and Laronne (2002) / Drau River	??/ 38.7 celkove: 1-70	40 / 1.4	0.19	Q _m =64 Q ₂ = 380	0.30
Bakke et al (1999) / 8 toku (Oak, Paradise etc)	32-154 / 9-30		0.12-1		
Chang (1994) / Stony Creek	?? / 5-9			Q ₄₀ =395	
Martin (2002) / Vedder River	/ 10-34 (d ₅₀)	100 / 1.7	0.035- 0.46	Q ₁ =350 Q _m asi 50	
Andrews (1994) / Sagehen Creek	58 / 30	4.85 / 0.41	1	Q _{full- bank} =2.0	0.0005- 0.035
Andrews (2000) / Virgin River	0.062-128	7.8 / 0.58	0.4	Q _{f-b} =7.1	1060 t/y
Bunte et al (2004) / St Louis Creek, Little Granite Creek	76 / 41 69 / 41	6.5/0.38, 14.3/0.39	1.7 1.7	Q _{f-b} = 4.0 Q _{f-b} = 5.7	
Curch and Hassan (2001, 2002) / Harris Creek	64-76 / 16-45 (d ₅₀)	10-20 / ??	1.3	Q ₁ = 19 Q _{max} = 35	
Reid and Laronne (1995) / 8 toku	1.4-60 / 6-20	2.9-14.6 / ??	0.07-6.7		
Lisle et al (2000) / 6 toku (Redwood Creek, Grouse Cr. etc)	11-39 / 6.3-27	12-101 / ??	0.12- 0.64	Q _{f-b} = 11- 430	
Shvidchenko and Kopaliani (1998) / Laba	58 / 26	100 / 1	0.5	Q _m =87.1, Q ₁ =411	
Eaton and Lapointe (2001) / Sainte Marguerite River	55 /	38 /	0.28	Q ₁ =90 Q _{max} =246	

Habersack a Laronne (2002) porovnali 14 z literatury vybraných rovnic (mimo klasických, MPM, Einstein atd, i novější, Parker, Zanke, Sun & Donahue) s experimentálními daty získanými v alpské sterkové řece Drau ($d_{10} \sim 3$ mm, $d_{50} \sim 13$ mm, $d_{90} \sim 60$ mm) za nízkých a středních transportních toků splavenin. Protože žádná z rovnic nedávala v originální podobě hodnoty uspokojivě podobné hodnotám měřeným, modifikovali nebo prekalibrovali autoři nejbezpečněji užívané rovnice dle změřených dat. MPM rovnice dala lepší aproximaci dat pro $\tau_{cr} = 0.042$ (místo originálních 0.047). V Parkerově rovnici byly pro potřeby lepší aproximace dat upraveny koeficienty ve funkci krytí dna, po této úpravě se předpovědní schopnost modelu velmi zlepšila. Habersack a Laronne zdůrazňují potřebu aspoň nějakého vzorku pro doladění předpovědní rovnice na konkrétní podmínky toku. Pro alpské sterkové řeky doporučují rovnice pracující s širokým zrnitostním rozdělením dna a s možností částečného transportu dnových splavenin.

Martin (2002) použila data sebrána v řece Vedder v Britské Kolumbii za období 10 let k porovnání různých transportních modelů. Rovnice MPM a Bagnoldovy (originální a upravená) všechny určily nižší transportní průtok sterku než bylo pozorováno v řece. Manipulaci s hodnotou kritického Shieldsova čísla bylo možno ovlivnit modelované transportní průtoky, ale nikoliv podstatně snížit rozdíl mezi polními daty a vypočtenými výsledky. Bagnoldova rovnice se zdála dávat o něco lepší výsledky než MPM, ale Martin opatrně dodává, že výsledky její studie nevedou k jednoznačnému upřednostnění jedné z testovaných rovnic.

Bakke et al (1999) ukazuje na datech sebraných s 8 sterkovými potoky a řekami, jak kalibrovat Parkerovu et (1982) metodu pro potřeby konkrétní lokality v toku a hodnotí, že po kalibraci je metoda kvalitním předpovědním modelem transportního průtoku dnových splavenin.

Chang (1994) simuloval chod dnových splavenin, jež se objevil za 40-leté povodně na potoku Stony Creek pomocí modelu MPM, Engelund-Hansen, Yang and Parker (1990). Z porovnání vysly jako nejúspěšnější modely Parkera a Yanga, MPM spocítal chod splavenin menší než měřené a Engelund-Hansen chod splavenin nadhodnotil.

Andrews (1994) porovnal transport velmi hrubých částic pozorovaný po řadu let na sterkovém potoce Sagehen Creek (transport rozdělen pro frakce od 5 mm do 128 mm) za běžných průtoků. Pozorované velmi malé transportní průtoky velmi hrubých částic se velmi dobře shodovaly s výpočty Parkerovou metodou (Parker et al, 1982).

Andrews (2000) dokumentuje rozsáhlá měření z Virgin River v Utahu zajímavá především kvalitou měření chodu splavenin a velkým rozsahem průtoku, v němž byla měření po dobu 5 let prováděna. Chod splavenin je hodnocen po frakcích, od jemných transportovaných v suspenzi (až částice větší než 1 mm jsou dle Andrewa transportovány v Virgin River jako dnové splaveniny) a po hrubé oblázky 90-128 mm (jejich chod byl však minimální i při maximálním pozorovaném průtoku). Zajímavým příspěvkem je také ukázání vlivu dnové drsnosti na transportní průtok splavenin. Dno Virgin River je tvořeno velmi hrubými částicemi (např. i kameny > 250 mm) a dle Andrewse je skin friction odpovídající za transport splavenin je jen částí (asi 60% pro běžný (bank-full) průtok) celkového smykového napětí ve dne. Při zahrnutí tohoto vlivu do výpočtu transportního průtoku vykazuje Parkerova metoda (Parker et al, 1982; Parker, 1990)

velmi dobrou shodu s měřeními transportními průtoky dnových splavenin. Za celou dobu pozorování činil chod dnových splavenin jen 0.4% celkové váhy transportovaných splavenin (zbytek byly částice < 1 mm transportovány v suspenzi), protože jejich částice tvořily 90% povrchu dna a více než 75% povrchové vrstvy dna. Asi 75% z celkového množství dnových splavenin bylo transportováno při $Q \leq (6.0 \text{ m}^3/\text{s})$. Povodňové průtoky činily často více než $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ale měly příliš krátké trvání než aby transportovaly významné množství dnových splavenin.

Bunte et al (2004) popisují použití lapace dnových splavenin (bedload trap) a porovnávají jeho účinnost s Helley-Smithovým samplerem. Součástí příspěvku jsou také dosti úplná data získaná měřeními dnových splavenin pomocí lapace ve dvou tocích (lapac porizuje dobře vzorky pokud dnové splaveniny neobsahují částice mimo rozmezí 4 – 128 mm) za nízkých i vysokých transportních průtoků. Příspěvek nepřináší porovnání dat s předpovědními modely.

Church a Hassan (2001, 2002) měřili chod splavenin na sterkovém potoce Harris Creek. Dno potoka má slabě bimodální složení a je relativně stabilní. Za nízkých průtoků není zadná zrnitostní frakce zastoupena ve dne v pohybu. Za středních průtoků ($Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$, dnové smykové napětí > 27 Pa) je v pohybu dnový písek a hrubší frakce ($d > 8 \text{ mm}$) jsou v pohybu částečně. Za vysokých průtoků (> 43 Pa) je částečně mobilní jen frakce větší než 16 mm, zbytek dna je v pohybu. Částice nejhrubší frakce se téměř nepremísťují ani za jednoleté povodně. Pro splaveninový režim je charakteristická velká rozmanitost ve výskytu částečného transportu, tož platí o hranici počátku pohybu jednotlivých dnových tvoricích zrnitostních frakcích. Tyto podmínky (jež vedou k výskytu odolného přirozeně opevněného dna) jsou zřejmě důvodem sledovaných velmi nízkých transportních průtoků splavenin (i za velkých průtoků vody).

Reid and Laronne (1995) porovnávají měřené transportní průtoky ve sterkových tocích různých typů: toky s průtoky jednodenními (efemerními, Nahal Yatir), sezonními (Goodwil Creek) a celoročními (5 toků). Zajímavé je srovnání transportních průtoků podle stupně přirozeného opevnění dna. Jednodenní tok Nahal Yatir nemá přirozeně opevněné dno a chod splavenin je o několik řádů vyšší než u nejvíce opevněného celoročního toku Oak Creek.

Lisle et al (2000) studují lokální změny v dnovém smykovém napětí a jejich vliv na mobilitu sterkového dna a používají pro jejich ilustraci měření ze 4 kalifornských a 2 coloradských toků (velikost zrna na povrchu dna kolem 35 mm, pod povrchem kolem 15 mm).

Shvidchenko a Kopaliani (1998) popisují hydraulické modelování poměru na kavkazské řece Laba ve dvou laboratorních zlábech

Eaton a Lapointe (2001) popisují vliv velkých povodňových průtoků na chod dnových splavenin a morfologii oblázkového koryta řeky Sainte Marguerite v Québecu.

A2. Pohyb dnových splavenin v oblázkových korytech ($d > 64 \text{ mm}$)

A2.1 Diskuze použitelných metod

V kapitole A1 byly diskutovány klasické substrate-based modely (MPM, Einstein etc) uvažující zhruba homogenní rozložení částic na povrchu a v podpovrchové vrstvě

dna a modernější surface-based modely (Parker et al, Wilcock et al), jež rozlišují mezi zrnitostním rozložením podpovrchové vrstvy dna a povrchu dna sterkových toků.

Klasické modely jsou založeny na experimentech pro dna jejichž velikost zrna nepřevyšuje hodnotu zhruba 20-30 mm. V literatuře nebyly nalezeny predikční modely substrate-based typu zformulované speciálně pro transportní průtoky velmi hrubých dnových splavenin. Nutno ale říci, že ve velmi hrubozrnných korytech se podmínky vhodné pro aplikaci substrate-based modelu v podstatě nevyskytují.

Surface-based modely, uvažující různé zrnitostní rozdělení na povrchu a v podpovrchové vrstvě dna, jsou aspoň částečně otestovány i pro hrubé frakce do přibližně 128 mm na povrchu dna. Tyto modely jsou jako podmínkami za nichž byly overeny tak procesy jež zohledňují vhodnější pro extrapolaci do oblázkových až balvanitých koryt než substrate-based modely.

A2.2 Diskuze polních dat

Dat vhodných pro overení extrapolace platnosti transportních rovnic formulovaných pro sterkové toky do oblázkových až balvanitých toků je v literatuře velmi málo. Důvodem nedostatku potřebných dat je, že velmi hrubé splaveniny se v horních úsecích toků (kde se nacházejí) dávají do významného pohybu jen za extrémních průtoků vody. Ty se vyskytují zřídka a navíc je v případě jejich výskytu velmi obtížné pohyby splavenin průběžně měřit. V praxi se pohyb dnových splavenin vyvolaný extrémním průtokem vody často určuje až zpětně ze změn, které průchod extrémního průtoků (povodně) v korytě toků způsobil. Tento způsob určování v sobě nese značnou míru nejistoty o přesnosti odhadnutého transportního toku splavenin za průchodu extrémního průtoků vody. Zároveň je velmi obtížné modelovat podmínky chodu velmi hrubozrnných splavenin na fyzikálních modelech v laboratorii. U laboratorního zlabu může být totiž problémem dosáhnout kombinace průtoků vody a sklonu zlabu vhodné k simulování chodu velmi hrubých splavenin.

Koryta v nichž k pohybu velmi hrubozrnných (oblázkových a hrubších) částic dochází se nejčastěji vyskytují v horských oblastech, mají zčásti kamenitý povrch dna (podstatná část povrchu dna je tvořena kameny a balvany) a jsou strmých sklonů. Jedinou geografickou oblastí, kde se zdá být problematice chodu velmi hrubozrnných splavenin koryty velkého sklonu věnována soustavněji pozornost jsou Alpy.

Typickým je pro tento typ toků značný rozdíl mezi splaveninovým režimem za běžných a za extrémních průtoků. Zatímco za běžných průtoků je transportní průtok velmi malý stejně jako nabídka transportovatelného materiálu na povrchu dna (a limited sediment availability, pohybuje se jen část dna), za extrémních průtoků se do pohybu dostává podstatná část dna a odpadá problém s omezenou nabídkou transportovatelných částic. Podmínka omezené nabídky za běžných průtoků musí být vzata v úvahu při modelování transportního průtoků, stejně jako vliv velké drsnosti dna na s skin-friction spojeným dnovým smykovým napětím, jež uvádí dnové částice do pohybu. Take musí být posouzena vhodnost té které rovnice pro podmínky nízkých transportních toků splavenin, jež jsou typické pro splaveninový režim v obláčko-kamenitých horských tocích za běžných průtoků.

Tabulka 3a. Overene clanky obsahujici polni data pro oblazkova a hrubsi koryta:

<i>Autor (Rok)</i>	<i>Pouziti</i>	<i>Poznamka</i>
Bathurst et al (1987)	toky strmých sklónu	9 toku (z toho 5 oblazkových), 3 zlaby (sterkove dno)
Lenzi et al (1999)		Rio Cordon, i extrémni Q
D'Agostino and Lenzi (1999)		Rio Cordon, i extrémni Q
Lenzi et al (2004)	$d_m = 130 \text{ mm}$	Rio Cordon, i extrémni Q

Bathurst et al (1987) uvadeji vysledky chodu splavenin v nekolika tocich s oblazkovým dnem (Pitzbach, Tanllwyth, Elbow, Clearwater, Aare).

Transport dnových splavenin v balvanitem hornim useku alpske reky Rio Cordon je diskutovan v clancich Lenziho a jeho spolupracovníku (Lenzi et al, 1999; D'Agostino and Lenzi, 1999; Lenzi et al, 2004). Popisovana pozorovani a mereni byla sebrana v 17 let dlouhem casovem obdobi a zahrnuji i obdobi extrémních prutoku. Stredni velikost zrna ve dne pozorovaneho toku je 130 mm.

Tabulka 3b. Neoverene zdroje obsahujici polni data pro oblazkova a hrubsi koryta:

<i>Autor (Rok)</i>	<i>Pouziti</i>	<i>Poznamka</i>
Asti (1999)		MSc diplomova prace, nepublikovano
Blizard (1994)		MSc diplomova prace, nepublikovano
Johnejack and Megahan (1991)	Idaho channels	
Rickenmann (1994)	Erlenbach (strmy tok)	
Rickenmann (1997)	svycarske bystriny (strmy tok)	

A3. Zaverecne shrnuti

Klasicke (substrate-based) rovnice nejsou vhodne pro predpoved transportního prutoku dnových splavenin v tocich se dnem slozenym z ruznoznych castic jejichz nejhrubsi frakci je hruby sterk nebo jeste vetsi castice. Klasicke rovnice nezohlednuji proces prirodzeného opevnenovani dna jez se bezne vyskytuje v hrubozrných korytech a vyznamne ovlivnuje chod dnových splavenin.

Moderni (surface-based) rovnice dokazi lepe modelovat podminky za nichz se chod dnových splavenin hrubozrnými koryty deje a mohou poskytnout mnohem presnejsi predpoved transportního prutoku dnových splavenin. V pripade velkeho rozdielu mezi velikosti sunutych dnových castic a velikosti nepohyblivých castic prirodzene opevneného dna (urcujících drsnost povrchu dna) musi byt pro potreby modelu urceno, jaka cast celkoveho dnoveho smykoveho napeti zpusobuje pohyb dnových splavenin (skin friction).

Rozbor vzorku sebranych v useku toku pro nejz ma byt transportni rovnice uplatnena mohou podstatne zlepšit predikcni schopnost pouzite rovnice. Vzorky musi charakterizovat zrnitostni rozdeleni jak na povrchu dna tak v podpovrchove vrstve dna.

V literatuře nebyly nalezeny žádné modely formulované speciálně pro chod splavenin větších než hrubozrnné sterky ($d > 64$ mm). Nicméně, v literatuře diskutované surface-based modely pro hrubozrnné sterky se zdají být extrapolovatelné do podmínek transportu větších částic. V literatuře existuje několik zdrojů polních dat, jež mohou být použity k ověření predikčních modelů pro tuto oblast.

Sklon toku podstatným způsobem ovlivňuje chod dnových splavenin. Transportní modely jsou standardně navrženy pro toky sklonu nepřevyšujících zhruba 2-3%. Pro toky větších sklonů je potřeba modely modifikovat. Reserše shrnuje v literatuře nalezené návrhy na modifikaci transportní rovnice pro potřeby strmých toků.