

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.

Vsechny zde diskutovane metody vsak vychazeji z podmínky ustaleneho a rovnomerneho proudeni.

Vyzkumne stredisko WES (Water Experimental Station) spadajici pod US Army Corps of Engineers vyvinulo vypocetni programy SAM a HEC-6, jejichz soucasti je nekolik z literatury vybranych modelu pro pohyb dnovych splavenin. Nektere originalni modely WES pro potreby svych vypocetnich programu modifikovala kalibraci vlastnimi daty. Pri rozhodovani o pouziti nektereho z nabizenych modelu je dulezite uvazit pro jake podmínky byl model kalibrován (velikost castic a zrnitostni rozlozeni dnového materialu, sklon toku atd).

Tabulka 1a. Modely zahrnuté do vypocetnich programu vyvinutych v WES:

<i>Autor (Rok)</i>	<i>Pouziti</i>	<i>Poznamka</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 ruznych zrnitosti ($d = 0.3 - 29 \text{ mm}$) a $\rho_s = 1300 - 4200 \text{ kg/m}^3$. Pro dno byly pouzity materialy s uzkyim i širokyim zrnitostnim rozdelenim.
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. Nektere dalsi vyznamne modely:

<i>Autor (Rok)</i>	<i>Pouziti</i>	<i>Poznamka</i>
Abrahams (2003)	pro sheet flow; modifikace Bagnoldovy rovnice	data: 55 mereni v lab kanalech a tlakovych potrubí z literatury
Bagnold (1966, 1980)	pro sheet flow	energeticky pristup
Engelund and Hansen (1967)	toky s neomezenou nabidkou dnovych splavenin	
Schoklitsch (1962)	toky s neomezenou nabidkou dnovych splavenin	doporuceno v Bathurst et al (1987)
Sun and Donahue (2000)	toky s castecnym transportem	viz Habersack a Laronne (2002)
van Rijn (1986)		overena pro castice $< 1.5 \text{ mm}$
Wilcock and Crowe (2003) Wilcock and Kenworthy (2002)	toky s castecnym transportem (sterk do 64 mm a smesi sterku a pisku)	data: toky a zlab (pisky od 0.5 mm a sterky do 64 mm).
Yalin (1972, 1977)	toky s neomezenou nabidkou dnovych splavenin	rce zalozena na popisu procesu
Zanke (1999)	toky s castecnym transportem	analyticka 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, $\tau = \rho_w g R_h S$ [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 nade dnem jejíž smykový účinek působí jako hnací síla na částici ve dne a váhy částice zmniejsené o vliv Archimedovy síly

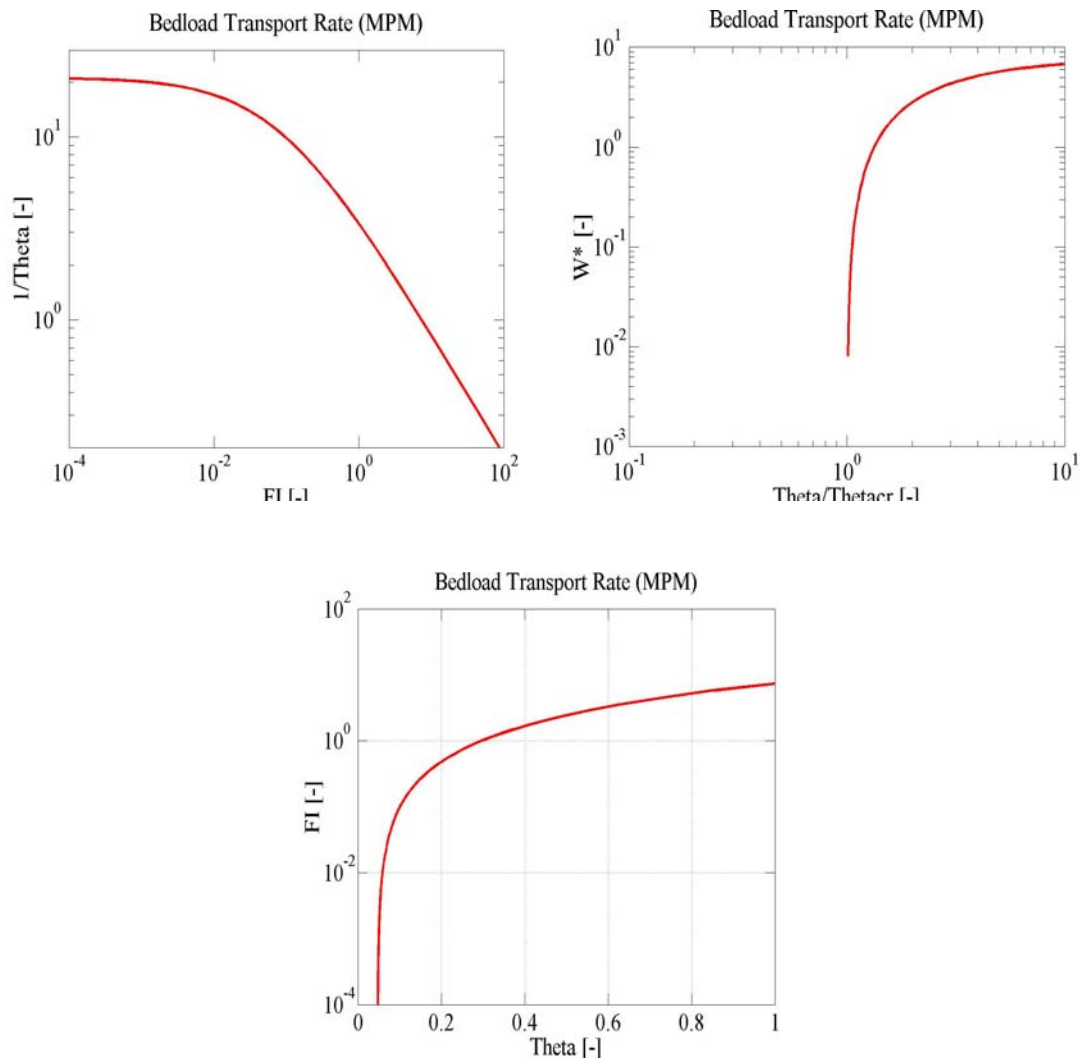
- Einsteinovo číslo je poměrem průtoku dnových splavenin a sedimentačního toku reprezentovaného součinem usazovací rychlosti částice a průměru částice ($v_t d$).

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)

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

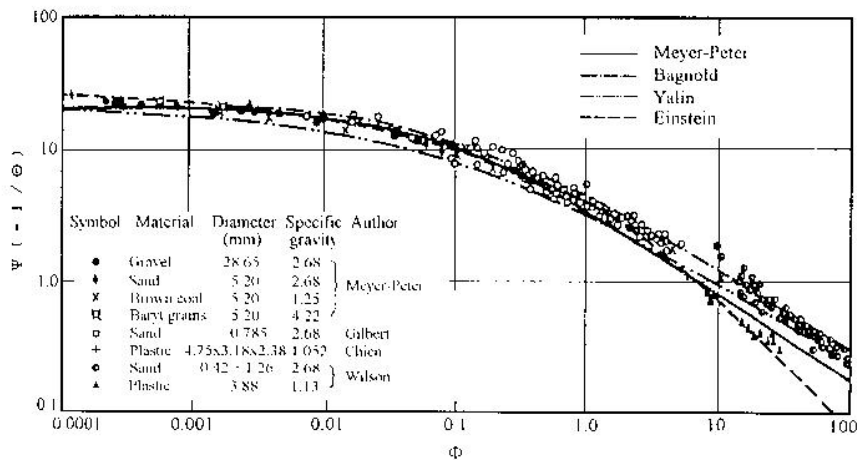
Rozdil mezi $n_g = \text{Manningovym } n$ vztahujicim se k drsnosti dnoveho zrna a $n_t = \text{Manningovym } n$ ziskany z mereneho celkoveho odporu dna lze casto zanedbat (MPM pro $n_g = n_t$ je pouzito napr. v Cheng, 2002 nebo Chanson, 1999, 2004)

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



Obr. 1. MPM rovnice v ruznych souradnicich bezrozmernych cisel.

Chien a Wan (1998) porovnali metody Meyer-Petera, Einsteina, Bagnolda a Yalina prevedenim vseh rovnic na spolecny tvar $1/\theta = f_n(\Phi)$ a konstatovali relativne maly rozdil mezi rovnicemi krome oblasti extremne nizkych a extremne vysokych Φ (obr. 2). Monografie venuje analyze rozdilu mezi metodami velkou pozornost a zabyva se podrobne zpusobem modelovani vlivu zrnitostiho rozlozeni transportovanych castic na transportni tok splavenin u jednotlivych modelu.



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 značne menší než nepresnosť zanesená do ľubovoľnej rovnice spôsobom určenia kritického dnového smykového napätia, s nimi rovnice pracujú.

Pripadná rovnica bez kritického napätia by bola atraktívnejšie predovšetkým pre podmienky slabého chodu splavenin, teda nízkych θ . Paintal (1971) ukázal, že obecná rovnica nahradzuje Einsteinov model (1950) za veľmi nízkych θ (medzi 0.007 a 0.07) pri $p_2 = 16$ a $\beta = 5.56 \times 10^{18}$. Zatiaľ sa však nepodarilo nájsť rovnicu obecného typu, ktorá by sa obešla bez kritickej hodnoty smykového parametru v celom širokom rozsahu Shieldových čísel.

Nedávne analýzy ukázali, že tvar obecných rovníc bez θ_{cr} je aplikovateľný v oblastiach vysokých hodnôt Shieldsova čísla. Za podmienok sheet flow ($\theta > 0.8$) platí podľa Abrahamsem (2003) provedené analýzy laboratorných dát Smarta, Rickenmanna a Nnadi & Wilsona, že $p_2 = 1.5$ a $\beta = U/u_*$, kde U je stredná rýchlosť prúdu vody. Pretože $u_* = U(\lambda_b/8)^{0.5}$, vychádza pre Abrahamsovú rovnicu $\beta = (8/\lambda_b)^{0.5}$. Cheng (2002) ukázal, že pre prúdenie $\theta \gg \theta_{cr}$ (a teda $\theta - \theta_{cr} \approx \theta$) sa rovnice MPM, Bagnolda, Englund-Fredsoea a Yalina všetchny zjednodušujú na $\Phi = \beta\theta^{1.5}$ s konštantným β , jeho hodnoty sa pohybujú medzi 8 (MPM) a zhruba 13 (Bagnold, Yalin, Wilson). Porovnaním hodnôt koeficientu p_2 (pri β branom ako číslo, teda nezávislým na jakomkoľvek parametre) z rovníc Paintala a Abrahamse nabíza nasledujúci trend. Hodnota p_2 je vysoká u nízkych θ a klesá za podmienok zvyšujúcich sa dnového smykového napätia až ke konečnej hodnote 1.5 pre vysoké θ .

Pro rovnice s nezanedbateľným vplyvom 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 rovnicu 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 Shieldsovyh 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 výpočtu parametru β je zakulklene $\theta_{cr} = 0.047$ z MPM rovnice, porovnaním se Smartovými daty z curysskeho zlabu navíc ukazuje, že Chengem předpovězené hodnoty za vysokého Theta ($0.1 < \theta < 3.4$) jsou příliš vysoké. Smartova data však reprezentují prúdenie s veľkým sklonem a preto nejsou k porovnání najvhodnejšie. Každou transportní rovnicou je zrejme treba modifikovat pro potreby veľkeho sklonu (viz. Rickenmann, 2001).

Souhrně lze říci, že Φ versus θ rovnice mají exponent p_2 rovny 3/2 (1.5) pro vysoké θ , v oblasti malých hodnot Shieldsova 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 materiálu. Nejistoty v určování 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.

Dalsi upravy 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 popsání 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 částecího transportu. Tyto aspekty splaveninového režimu toku jsou diskutovány v následující kapitole.

A1.3 Analýza predikčních metod uvážujících 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 schop 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 uvážován v klasických rovnicích (viz výše), které nerozlišují mezi zrnitostním složením povrchu dna a dnového

podlozi a uvazuji implicitne podlozni material pro cele dno (tzv. substrate-based models). Jejich alternativou jsou tzv. surface-based modely, diskutovene nize. Haschenburger a Wilcock (2003) zkoumali vliv povodnového prutoku na prirodzene opevneny povrch hrubozrnného dna. Dle jejich vyzkumu nejsou ani nekolikaleté povodne sto narusit nebo odplavit prirodzene opevnenu horni vrstvu dna, coz ma krome praktickych vyhod spojenych se stabilitou dna i vyhodu v jednodussi predpovedi transportního prutoku splavenin za nekolikaletych povodni. Az extremnejsi povodne jsou schopny rozrusit a odplavit opevneny povrch dna. V dobe mezi temito povodnemi se uplatnuje castecny (selektivni) transport souvisejici s prirodzenym opevnovanim dna (a partial transport, viz napr. Wilcock, 2003, nebo Habersack a Laronne, 2002).

Pri rozhodovani o vhodnosti pouziti nejake rovnice je potreba uvazit, jestli simulujeme tok ve splaveninove rovnovaze (neexistuje deficit nabidky transportovatelných castic na povrchu dna) nebo jestli máme co do cineni s podmínkami castecneho (selektivního) transportu splavenin v toku. Rovnice odvozené pouze pro rovnovazny stav nejsou pouzitelne v podmínkach castecneho transportu (Habersack a Laronne, 2002). S castecnym transportem, bezne se vyskytujicim v alpskych rekach (Habersack a Laronne, 2002), pocitaji napr. 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 tocich hrubozrnného podlozi se musi vypořadat s problemem urceni reprezentativni velikosti transportovatelných dnových castic pro potreby modelu, zvlaste v souvislosti s pripadnym tridenim frakci na povrchu dna. Uzitecne muze byt zavedeni bezrozmerného cisla

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

v nemz se velikost castice nevyskytuje. Referencni hodnota $W^*=0.002$ odpovida hodnotě $1.004\theta_{cr}$ v MPM rovnici. Pro vysoke hodnoty Theta (a tedy $\theta - \theta_{cr} \approx \theta$) je $W^* = konst$ (nebot $\beta = konst.$, viz predchazejici kapitola).

Pro sterkové toky se zdaji byt vhodné modely rozeznávajici možny rozdíl mezi casticemi reprezentujicimi povrch dna a casticemi reprezentujicimi splaveninovy material. Modely vychazejici z materialu povrchu dna se oznacuji SBTM, tj. Surface-Based Transport Models. SBTM modely jsou schopny simulovat prechodne jevy ve dne jako opevnovani dna (armoring), vymilani (scour) nebo zanaseni (aggradation). S formovanim modernich SBTM modelu prisel v 80. letech Parker (prvni verze v Parker et al, 1982). Tento model byl jako jeden z prvnych zalozen na polnich merenich (Oak Creek data sebrana Milhousem, 1973). Casto citovana je v literature SBTM verze z roku 1990 (Parker, 1990), zalozena jak na polnich tak na laboratornich merenich. S dale rozsirenou verzi SBTM modelu prisli Wilcock a Croweova, 2003. Rozsireni modelu bylo umožneno novymi vysledky testu ve zlabu, jez byly poprve provedeny jako sdruzené sledovani charakteristik proudeni vody, chodu splavenin a zrnitosti slozeni dna. Model nove zahrnuje i vliv piskové faze na chod sterku. Dle pozorovani a dle modelu zvysuje pritomnost pisku transportni kapacitu sterkových splavenin.

Wilcockuv & Croweova model pocita transport zvlast pro kazdou frakci materialu zastupenou ve dne. Zakladni vztah je stejny jako u jinych SBTM modelu pro zrnite ruznorodý sediment, totiz $W^*_i = fn(\tau/\tau_{ci})$, kde

i oznaceni frakce, jejiz transport je pocitan

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

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

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

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

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

τ_{ri} referencni smykové 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 .

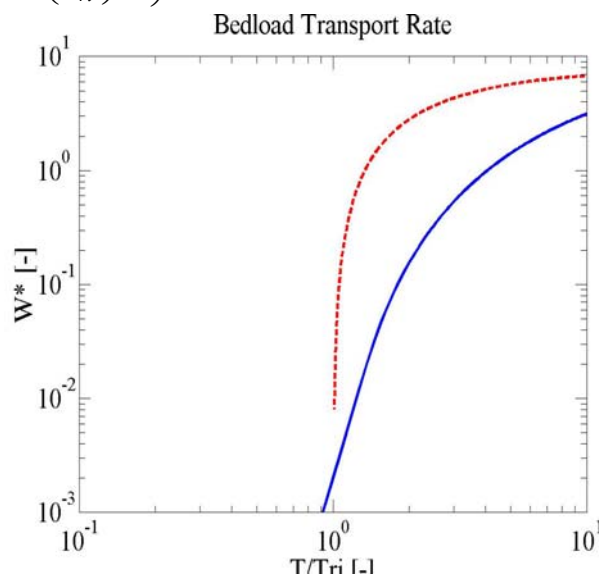
Model Wilcocka a Croweove tvori nasledujici soustava rovnic

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

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

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

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



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 prtok 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. Nektore clanky obsahujici polni data pro overeni transportnich rovnic.

<i>Zdroj / Lokalita</i>	<i>Zrno [mm] / povrch / podvrstva</i>	<i>Sirka[m] / Hloubka</i>	<i>Sklon [%]</i>	<i>Prtok [m³/s]</i>	<i>Transp.t [kg/(ms)]</i>
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 vybranych rovnic (mimo klasickych, MPM, Einstein atd, i novejsi, Parker, Zanke, Sun & Donahue) s experimentalnimi daty ziskany v alpske sterkovre rece Drau ($d_{10} \sim 3$ mm, $d_{50} \sim 13$ mm, $d_{90} \sim 60$ mm) za nizkych a strednich transportnich toku splavenin. Protoze zadna z rovnic nedavala v originalni podobe hodnoty uspokojive podobne hodnotam merenym, modifikovali nebo prekalibrovali autori nejbezneji uzivane rovnice dle zmerenych dat. MPM rovnice dala lepsi aproximaci dat pro $\tau_{cr} = 0.042$ (misto originalnich 0.047). V Parkerove rovnici byly pro potreby lepsi aproximace dat upraveny koeficienty ve funkci kryti dna, po teto uprave se predpovedni schopnost modelu velmi zlepila. Habersack a Laronne zduraznuji potrebu aspon nejakeho vzorku pro doladeni predpovedni rovnice na konkretni podminky toku. Pro alpske sterkovre reky doporucuji rovnice pracujici s širokym zrnitostnim rozdelenim dna a s moznosti castecneho transportu dnovych splavenin.

Martin (2002) pouzila data sebrana v rece Vedder v Britske Kolumbii za obdobi 10 let k porovnani ruznych transportnich modelu. Rovnice MPM a Bagnoldovy (originalni a upravena) vsechny urcily nizsi transportni prutok sterku nez bylo pozorovano v rece. Manipulaci s hodnotou kritickeho Shieldsova cisla bylo mozno ovlivnit modelovane transportni prutoky, ale nikoliv podstatne snizit rozdil mezi polnimi daty a vypoctenymi vysledky. Bagnoldova rovnice se zdala davat o neco lepsi vysledky nez MPM, ale Martin opatrne dodava, ze vysledky jeji studie nevedou k jednoznacnemu uprednostneni jedne z testovanych rovnic.

Bakke et al (1999) ukazuje na datech sebranych s 8 sterkovych potoku a rek, jak kalibrovat Parkerovu et (1982) metodu pro potreby konkretni lokality v toku a hodnoti, ze po kalibraci je metoda kvalitnim predpovednim modelem transportniho prutoku dnovych splavenin.

Chang (1994) simuloval chod dnovych splavenin, jez se objevil za 40-lete povodne na potoku Stony Creek pomoci modelu MPM, Engelund-Hansen, Yang and Parker (1990). Z porovnani vysly jako nejuspesnejsi modely Parkera a Yanga, MPM spocital chod splavenin mensi nez mereny a Englung-Hansen chod splavenin nadhodnotil.

Andrews (1994) porovnal transport velmi hrubych castic pozorovany po radu let na sterkovem potoce Sagehen Creek (transport rozdelen pro frakce od 5 mm do 128 mm) za beznych prutoku. Pozorovane velmi male transportni prutoky velmi hrubych castic se velmi dobre shodovaly s vypocty Parkerovou metodou (Parker et al, 1982).

Andrews (2000) dokumentuje rozsahla mereni z Virgin River v Utahu zajimava predevsim kvalitou mereni chodu splavenin a velkym rozsahem prutoku, v nemz byla mereni po dobu 5 let provadena. Chod splavenin je hodnocen po frakcich, od jemnych transportovany v suspenzi (az castice vetsi nez 1 mm jsou dle Andrewa transportovany v Virgin River jako dnove splaveniny) a po hrube oblazky 90-128 mm (jejich chod byl vsak minimalni i pri maximalnim pozorovanem prutoku). Zajimavym prispivkem je take ukazani vlivu dnove drsnosti na transportni prutok splavenin. Dno Virgin River je tvoreno velmi hrubymi casticemi (napr. i kameny > 250 mm) a dle Andrewse je skin friction odpovedna za transport splavenin je jen casti (asi 60% pro bezny (bank-full) prutok) celkoveho smykoveho napeti ve dne. Pri zahrnuti tohoto vlivu do vypoctu transportniho prutoku vykazuje Parkerova metoda (Parker et al, 1982; Parker, 1990)

velmi dobrou shodu s merenými transportními prutoky 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 prutoky 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 prutoků. 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 prutoků není zadná zrnitostní frakce zastoupena ve dne v pohybu. Za středních prutoků ($Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$, dnové smykové napětí > 27 Pa) je v pohybu dnový písek a hrubší frakce ($d > 8 \text{ mm}$) jsou v pohybu částečně. Za vysokých prutoků (> 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 prutoků splavenin (i za velkých prutoků vody).

Reid and Laronne (1995) porovnávají měřené transportní prutoky ve sterkových tocích různých typů: toky s prutoky jednodenními (efemerními, Nahal Yatir), sezonními (Goodwil Creek) a celoročními (5 toků). Zajímavé je srovnání transportních prutoků 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 povrch dna kolem 35 mm, pod povrchem kolem 15 mm).

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

Eaton a Lapointe (2001) popisují vliv velkých povodňových prutoků 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 (původně) 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 (sterkové dno)
Lenzi et al (1999)		Rio Cordon, i extrémní Q
D'Agostino and Lenzi (1999)		Rio Cordon, i extrémní Q
Lenzi et al (2004)	$d_m = 130 \text{ mm}$	Rio Cordon, i extrémní Q

Bathurst et al (1987) uvádějí výsledky chodu splavenin v několika tocích s oblazkovým dnem (Pitzbach, Tanllwyth, Elbow, Clearwater, Aare).

Transport dnových splavenin v balvanitem horním useku alpské řeky Rio Cordon je diskutován v clancích Lenziho a jeho spolupracovníku (Lenzi et al, 1999; D'Agostino and Lenzi, 1999; Lenzi et al, 2004). Popisována pozorování a měření byla sebrána v 17 let dlouhém časovém období a zahrnují i období extrémních průtoků. Střední velikost zrna ve dne pozorovaného 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 diplomová práce, nepublikováno
Blizard (1994)		MSc diplomová práce, nepublikováno
Johnejack and Megahan (1991)	Idaho channels	
Rickenmann (1994)	Erlenbach (strmý tok)	
Rickenmann (1997)	svycarské bystriny (strmý tok)	

A3. Závěrečné shrnutí

Klasické (substrate-based) rovnice nejsou vhodné pro předpověď transportního průtoku dnových splavenin v tocích se dnem složeným z různorodých částic jejichž nejhrubší frakce je hrubý šterk nebo ještě větší částice. Klasické rovnice nezohledňují proces přirozeného opevnění dna jež se běžně vyskytuje v hrubozrnných korytech a významně ovlivňuje chod dnových splavenin.

Moderní (surface-based) rovnice dokáží lépe modelovat podmínky za nichž se chod dnových splavenin hrubozrnnými koryty děje a mohou poskytnout mnohem přesnější předpověď transportního průtoku dnových splavenin. V případě velkého rozdílu mezi velikostí sunutých dnových částic a velikostí nepohyblivých částic přirozeně opevněného dna (určujících drsnost povrchu dna) musí být pro potřeby modelu určeno, jaká část celkového dnového smykového napětí způsobuje pohyb dnových splavenin (skin friction).

Rozbor vzorku sebraných v useku toku pro nějž má být transportní rovnice uplatněna mohou podstatně zlepšit predikční schopnost použité rovnice. Vzorky musí charakterizovat zrnitostní rozdělení jak na povrchu dna tak v podpovrchové vrstvě 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.