

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ

Matematické modelování transportu
sedimentů otevřených koryt za podpory
GIS/CAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Zezulák DrSc.

Diplomant: Bc. Zuzana Kielarová

2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Katedra aplikované geoinformatiky a územního
plánování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Kielarová Zuzana

Environmentální modelování

Název práce

Matematické modelování transportu sedimentů otevřených koryt za podpory GIS/CAD.

Anglický název

Sediment transport modeling in open channels supported by GIS/CAD.

Cíle práce

Provést numerickou simulaci transportu sedimentů na vybraném území a vytvořit obecnou metodiku řešení daného problému. Práce prověří možnosti přípravy vstupních dat numerických modelů a vizualizace výsledků pomocí nástrojů GIS nebo CAD.

Metodika

V této práci bude zpracována literární rešerše transportu sedimentů v otevřených korytech. Na zájmovém území bude zpracována případová studie pomocí vybraného matematického modelu včetně vizualizace a zhodnocení výsledků.

Harmonogram zpracování

1. Vytvoření zadání práce, stanovení cílů a vypracování metodiky: 06/2011
2. Příprava podkladů: 07/2012 – 08/2012
3. Vlastní vypracování: 09/2012 – 03/2013
4. Odevzdání práce: 04/2013

Rozsah textové části

cca 40 - 50 stran

Klíčová slova

matematické modelování, advekce-dífuze, transport sedimentů, hydraulika otevřených koryt

Doporučené zdroje informací

- [1] Hunt B.: Fluid Mechanics For Civil Engineers. University Of Canterbury Christchurch, New Zealand, 1995.
- [2] CHAU K.W.: Application of the Preissmann scheme on flood propagation in river systems in difficult terrain. Hydrology in Mountainous Regions, Lausanne Symposia, August 1990. IAHS Publ. no. 193. Switzerland, 1990.
- [3] US Army Corps Of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual Version 4.0: User's Manual. USA, 2008.
- [4] US Army Corps Of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System Version 4.0: User's Manual. USA, 2008.

Vedoucí práce

Zezulák Jiří, prof. Ing., DrSc.

Konzultant práce

Ing. Jiří Sovina, Ph.D.

Ing. Petra Šimová, Ph.D.
Vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 14.2.2013

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala sama pod vedením prof. Ing. Jiřího Zezuláka DrCs., a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne.....

.....

Bc. Zuzana Kielarová

MOTTO:

ČLOVĚK PŘECE MUSÍ NĚCO CHTÍT, MUSÍ MÍT PŘED SEBOU NĚJAKOU
CESTU,

O KTERÉ VÍ, KAM VEDE. A KDYŽ VĚŘÍ, ŽE JE SPRÁVNÁ, MÁ PO NÍ JÍT A
TŘEBA ZAKOPÁVAT O KAMENY.

Poděkování

Ráda bych poděkovala prof. Ing. Jiřímu Zezulákovi DrCs. za vedení a trpělivost během vypracovávání diplomové práce. Poděkování patří také povodí Odry s.p. za poskytnutí potřebných dat k vytvoření modelu.

Nemalé díky patří všem mým přátelům a známým, kteří mě v krizi vždy povzbudili, a jsem za to ráda.

Největší poděkování samozřejmě patří celé mé rodině. Mým bratrům Filipovi Kielarovi, Martinovi Čechu-Kielarovi a jeho manželce Janě Čechové, Ondřeji Kielarovi, kteří mě také neustále povzbuzovali při psaní práce a za všechnu pomoc, kterou mi vždy poskytl. Nejdůležitějšími lidmi, kterým patří velké poděkování, jsou rodiče Pavel a Ljuba Kielarovi. Vždy nás při studiích podporovali finančně, materiálně a psychicky, i když to ne vždy bylo jednoduché.

V Praze dne

.....

Bc.Zuzana Kielarová

ABSTRAKT

Tématem diplomové práce je vytvoření modelu transportu sedimentů v programu HEC – RAS ve spolupráci s GIS. Rešeršní část se věnuje popisu sedimentů (charakteristiky, počátek pohybu, funkce pro výpočet) nacházející se v korytech toků. V praktické části je sestaven model transportu sedimentů na řece Opavě s využitím programu ArcGIS s extenzí HEC–geoRAS.

Práce se zabývá obecným pohledem na danou problematiku a tak vytváří obecný návod.

Klíčová slova:

transport sedimentů, modelování, HEC-RAS, GIS

SUMMARY

The objective of this diploma thesis is the construction of a model of sediment transport in the HEC-RAS program using GIS tool. Description of riverbed sediments (characteristics, motion initiation, models for calculation) is presented in the introduction. Model of sediment transport (HEC-RAS), constructed using the Arc-GIS program with HEC-reoRAS extension, in the river Opava is presented in the practical part of this dissertation. This dissertation focuses on achieving a general approach to the problem and thus aims to provide a general solution.

Keywords:

Sediment transport, modeling, HEC-RAS, GIS

OBSAH:

1. ÚVOD.....	10
1.1. Cíle práce	11
2. CHARAKTERISTIKA SEDIMENTŮ	12
2.1. Rozdělení sedimentů	12
2.1.1. Splaveniny (<i>bed load</i>).....	12
2.1.2. Plaveniny (<i>suspended load</i>).....	13
2.1.3. Smyv z povodí (<i>wash load</i>)	13
2.1.4. Hranice splavenin a plavenin	13
2.2. Fyzikální popis sedimentů	13
2.2.1. Velikost zrn.....	13
2.2.2. Zrnitostní složení	16
2.2.3. Tvar zrn.....	17
2.2.4. Obrus zrn.....	17
2.2.5. Měrná hmotnost, měrná tíha	19
2.2.6. Sedimentační rychlost.....	20
3. VLIV SEDIMENTŮ NA KORYTO TOKU.....	22
3.1. Počátek pohybu splavenin	24
3.1.1. Kritická rychlost proudu	24
3.1.2. Unášecí síla proudu.....	26
3.2. Dnové útvary	29
3.2.1. Rovné dno (<i>plane bed</i>).....	29
3.2.2. Vrásky (čeřiny, <i>ripples</i>)	29
3.2.3. Duny (<i>dunes</i>).....	30
3.2.4. Lavice.....	30
3.2.5. Antiduny (<i>antidunes</i>)	30
3.2.6. Krycí vrstva (přirozená dnová dlažba).....	31
4. PRŮTOK SEDIMENTŮ	32
4.1. Průtok splavenin (<i>bed load</i>).....	32
4.2. Průtok plavenin	35
4.3. Celkový průtok sedimentů	36

5. MATEMATICKÉ MODELÝ	40
5.1. Program HEC–RAS.....	40
5.1.1. Analýza transportu sedimentů v programu HEC - RAS.....	41
5.2. Příprava dat a vizualizace výsledků	46
5.2.1. CAD	46
5.2.2. GIS	48
6. METODIKA.....	50
6.1. Popis zájmového území.....	50
6.1.1. Informace o toku	50
6.1.2. Klimatické poměry	51
6.1.3. Geomorfologie, Geologie, Hydrogeologie a půdní poměry	52
6.1.4. Hydrologické poměry	53
6.2. Sestavení modelu	54
6.2.1. DATA	54
6.2.2. Práce v programu ArcGIS.....	54
6.2.3. MODEL	55
7. VÝSLEDKY	59
7.1. HEC – RAS	59
7.2. Vizualizace výsledků v programu ArcGIS	63
8. DISKUZE	64
9. ZÁVĚR	65
10. SEZNAM SYMBOLŮ, OZNAČENÍ A ZKRATEK.....	66
11. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	69
12. POUŽITÁ LITERATURA.....	70
13. PŘÍLOHY	73

1. Úvod

Stékání vody po terénu, proudění v bystřinném či říčním korytě působí erozivně na povrch terénu nebo na dno a břehy koryt vodních toků. Pokud zeminy nebo horniny nemohou odolávat účinkům proudění, začínají se jejich jednotlivé částice pohybovat ve směru proudění (Výbora et al., 1989). Sedimenty jsou v korytech reprezentovány různě velkými částicemi hornin (Tlapák, Herynek 2001).

Transport sedimentů (v české literatuře někdy označováno, jako pohyb splavenin) v otevřených korytech je zkoumán několik desetiletí, přičemž je snaha najít co nejlepší popis tohoto problému. I přesto se objevují otázky, na které není jednoduchá odpověď.

Sedimenty, které se vyskytují v toku, mohou být rozděleny na organické či minerální. Organické částice se dostávají do toku např. spadem listů, větviček či úmrtím organismů. Jejich pohyb je velmi náhodný. Většina studií se zaměřuje na pohyb sedimentů minerálního původu (Bogárdi J., 1974).

Pevné částice minerálního původu se vytvářejí erozní činností vody v povodí toku a to smýváním půdy a horninových zvětralin a také v korytě toků vymíláním dna, podemláváním a strháváním břehů (Tlapák, Herynek, 2001).

Tvorba, pohyb a usazování sedimentů je zcela přirozený proces. Tento proces může zvětšen intenzivnějším vlivem lidské činnosti, což může mít za následek změnu průtočnosti a kapacity koryta. Tyto vlastnosti mohou být negativní např. při povodních. Při úpravách toků je dobré se seznámit se s druhy sedimentů a zákonitostmi jejich pohybu v korytě.

V průběhu zkoumání chování transportu sedimentů, které trvá více než dvě stě let, bylo odvozeno několik formulací, jež popisují daný problém. Zatím neexistuje žádná univerzální rovnice, která by mohla být použita současně pro proudění kapaliny a transport částic.

Ne všechny formulace se hodí pro každý tok. Jednotlivá vyjádření používaná pro výpočet pohybu sedimentů, se liší, a proto je důležité mít přehled o dalších vlastnostech koryta tak, aby byl zvolen vhodný model pro daný tok. Měla by se vždy zvolit taková metoda, která odpovídá fyzikálně-geografickým podmínkám.

K výpočtům je potřeba přistupovat uváženě, aby se základní podmínky a předpoklady v metodách shodovaly se stavem v přírodě (Macura, Szolgay, 1990).

Na základě vyvinutých vyjádření, která popisují transport sedimentů, bylo vytvořeno několik počítačových modelů. Mohou být 1-D až 3-D často se k popisu transportu sedimentů používají 1-D modely (např. MIKE-11 od firmy DHI, HEC-RAS (dříve HEC-6 od US Army, GSTARS (vyvíjen U. S. Bureau of Reclamation). Srovnání různého softwaru uvádí ve své práci Yang (2002).

1.1.Cíle práce

Úkolem první části této práce je seznámit s vlastnostmi, počátkem a popisem transportu tuhých částic korytem z dostupných literárních zdrojů.

V druhé části je cílem sestavení modelu transportu sedimentů v programu HEC-RAS 4.1 v zájmovém území. Hlavním cílem práce je seznámení se s možnostmi přípravy dat, vizualizací a analýzou výsledků v programu ArcGIS.

Model byl sestaven na řece Opavě z poskytnutých podkladů z Povodí Odry s.p. a Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (ČÚZK).

Transport sedimentů může být užitečný pro zjištění změny povodňových území či při zanášení vodních děl.

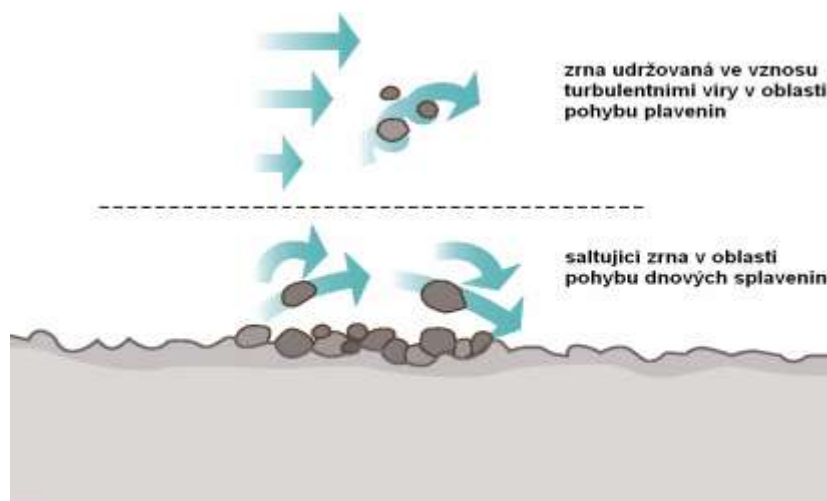
2. Charakteristika sedimentů

K důležitým charakteristikám sedimentů patří velikost a tvar zrn, zrnitostní složení, usazovací rychlost a měrná hmotnost (hustota) částic.

Důležité rozdělení částic ve vodním toku je také založeno na tom, kde se tyto částice nacházejí a jak se v proudící kapalině pohybují.

2.1. Rozdělení sedimentů

Sedimenty se dělí na splaveniny a plaveniny, podle toho jak se pohybují a kde se v korytě nacházejí (obr. 1).



Obrázek 1 - rozdíl mezi splaveninami a plaveninami (přednášky říčního inženýrství ČVUT, zdroj: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/RIN/ke_stazeni/prednasky/8/RIN_8-1.pdf)

2.1.1. Splaveniny (*bed load*)

Splaveniny jsou hrubší částice, které voda valí (koulí) či posouvá po dně (Macura, 1981). Pohybují a přemísťují se vždy diskontinuálně (přerušovaně), přitom podstatně pomaleji

než proud vody. Mají krátce trvající pohyb a limitovanou délku absolvované dráhy na toku. Tento pohyb se střídá se stavem klidu a jeho obnovení nastává jen tehdy, když se vytvoří potřebné podmínky opět k pohybu částic (Macura, Szolgay, 1990).

Splaveniny jsou důležitější pro tvorbu dna koryta a při výpočtech množství splavenin v korytě je na ně kladen větší důraz než na plaveniny (Zachoval, 2009).

2.1.2. Plaveniny (*suspended load*)

Plaveniny jsou jemné částice, které jsou rozptýleny v celém průtočném profilu. Tyto částice jsou trvale vodou obklopené a unášeny vodním proudem (Tlapák, Henrynek, 2001).

2.1.3. Smyv z povodí (*wash load*)

Brunner (2010a) uvádí ještě jednu kategorii sedimentů, která je v anglické literatuře označována jako ***wash load***. Jedná se o velmi malé a jemné částice plavenin, které jsou unášeny proudem a nevyskytují se v dnových sedimentech. Jedná se o částice, které se do koryta dostávají smyvem z povodí.

Tento sediment není většinou zahrnován do výpočtu transportu celkového množství průtoku tuhých částic.

2.1.4. Hranice splavenin a plavenin

Mezi plaveninami a splaveninami není definovaná přesná hranice. Širší hranici tvoří písky s velikostí částic v rozmezí od 0,05-7 mm. Závisí na hydraulické povaze vodního proudu a zejména na unášecí síle. Některá zrna mohou být v určité fázi posouvána po dně a unášena proudem vody (Tlapák, Henrynek, 2001).

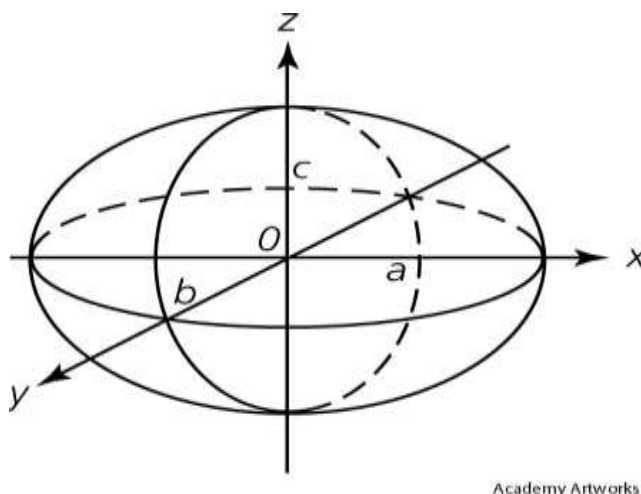
Částice podléhají kvantitativním, ale i kvalitativním přeměnám (např. obroušení, rozpadání, sedimentaci apod.). Kvalitativní změna se projevuje ve změně způsobu pohybu částice, tzn. přechodem ze splaveninového režimu do režimu plaveninového (Macura, Szolgay, 1990).

2.2. Fyzikální popis sedimentů

2.2.1. Velikost zrn

Velikost zrn je jeden z nejvýznamnějších a běžně užívaných fyzikálních parametrů. Je posuzován podle rozměru zrna. Pokud by částice měly tvar koule či krychle určení by bylo snadné, ale bohužel v přírodě se taková tvarová souměrnost vyskytuje velmi zřídka (Výbora, 1978). V tocích mají sedimenty mnoho různých tvarů od kulatých po ploché (Garde, Raju, 1977).

Tvarově se zrna nejvíce podobají trojosému elipsoidu s osami a , b , c (obr. 2), kde osa a je nejdelší, b je střenění a c je nejkratší osa (Macura, Szolgay, 1990)



Obrázek 2-trojosý elipsoid (zdroj:<http://images.yourdictionary.com/ellipsoid>)

Ze známých hodnot trojosého elipsoidu můžeme následně definovat velikost (průměr) zrna. Rozdělení je podle Macura, Szolgay (1990) :

Triaxální průměr zrna (d)

$$d = \frac{a+b+c}{3} \quad (2.1)$$

Triaxální průměr zrna (rov. 2.1) je fiktivní druh průměru, který poměrně dobře vystihuje tvar zrna. Při hromadném odběru je stanovení triaxálního průměru vzácné a zdlouhavé.

Sítový průměr zrna (d_s)

Sítový průměr zrna se určuje proséváním na soustavě sít. Je definován jako průměr nejmenšího oka, kterým může částice propadnout.

Geometrický průměr zrna (d_g)

Geometrický průměr zrna odpovídá průměru koule stejného objemu, jako je částice o osách a, b, c . Tento průměr je definovaný je výrazem (rov.2.2):

$$d_g = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad (2.2)$$

usazovací průměr (d_w)

Usazovací průměr se používá se pro charakteristiku zrn menších než 1 mm, Výbora (1978) dokonce uvádí průměr zrn 0,01 mm. Je to průměr koule stejné hmotnosti, jako je daná částice, která by při volném pádu ve vodě s teplotou 24 °C klesala stejnou konečnou sedimentační rychlostí w . Usazovací průměr se nepoužívá pro hrubší splaveniny.

Jde o metodu, která bere v úvahu i tvar zrna (Liu, 2001).

Pro určení velikosti písčitých částic se používá metoda síťového průměru, usazovací průměr je používán pro určení jílovitých a prachovitých. Rozdělení sedimentů podle velikosti je uvedeno v tabulce 1:

Tabulka 1 - rozdělení splavenin podle velikosti částic (Tlapák, Henryek, 2001)

Kategorie splavenin	Druhy splavenin	Průměr zrna [mm]
Posouvané – splaveniny	Balvany	500
	Kameny, valouny	70-500
	Hrubý štěrk	30-70
	Střední štěrk	15-30
	Drobný štěrk	7,00-15,00
	Hrubý písek	7,00-2,00
	Střední písek	0,1-2
Unášené – plaveniny	Jemný písek	0,05-0,1
	Hrubý prach (kal)	0,01-0,05
	Jemný prach	0,002-0,01
	Fyzikální jíl	0,000x-0,002

2.2.2. Zrnitostní složení

Zrnitostní složení může být vyjádřeno číselně či graficky. Jde o kvantitativní charakteristiku procentuálního hmotnostního podílu zrn určitých velikostních skupin (frakcí) na celkové hmotnosti směsi v suchém stavu. Frakcí nazýváme vytříděnou skupinu zrn určité velikosti. Hranice mezi skupinami nemají žádný fyzikální význam (Macura, Szolgay, 1990).

Zrnitostní složení se často znázorňuje graficky ve formě křivky zrnitosti, přičemž na vodorovné ose se vynášejí průměry zrn a na svislé ose jejich procentuální podíly z hmotnosti vysušené směsi (Macura, Szolgay, 1990).

Z průběhu křivky můžeme odvodit homogenitu materiálu. Homogenní směsi se v přírodě nevyskytují, jejich uplatnění je převážně v laboratořích (Macura, Szolgay, 1990).

K řešení některých úloh je potřeba sedimenty (splaveniny) charakterizovat jednou veličinou. Pro tento účel se většinou volí průměr efektivního zrna d_e - rovnice 2.3 (Výbora et al., 1989). Průměrným efektivním zrnem se rozumí fiktivní stejnozrný materiál, který bude mít při stejných hydraulických podmínkách stejný průtok sedimentů jako přirozená směs (Macura, Szolgay, 1990).

$$d_e = \frac{\sum d_i \cdot p_i}{100} \quad (2.3)$$

kde d_i je aritmetický průměr zrna a p_i znamená procentuální obsah dané frakce. Příklad výpočtu efektivního zrna je uveden níže.

Tabulka 2 - zrnitostní složení (Macura, 1981)

d_i [mm]	160	80	40	20	10	5
p_i [%]	5	10	30	15	15	25

$$\sum d_i \cdot p_i = 3375 \quad d_e = \frac{3375}{100} = 33,75 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{vzor výpočtu efektivního zrna}$$

V některých případech nemusí být vždy použitý průměr efektivního zrna. Z křivky zrnitosti lze stanovit velikost zrna, při které je hmotnost všech menších zrn i % celkové hmotnosti vzorku. Obvykle se určují hodnoty: d_{35}, d_{50}, d_{65} a d_{90} (Kovář, 1988).

2.2.3. Tvar zrn

Při posuzování tvaru zrn se vychází z trojosého elipsoidu (obr. 2) s osami a (nejdelší), b a c (nejkratší). Často se pro popis tvaru zrna používá tvarový součinitel (*shape factor*) popsán následující rovnicí.

$$S.F. = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \quad (2.4)$$

S.F. ... tvarový součinitel (*shape factor*)

Koule mají tvarový součinitel rovný 1, kdy se neznevýhodňuje žádná osa. Pro elipsy o poměru délek os 1:1:3 by měl mít tvarový součinitel hodnotu okolo 0,577, zrna písku mají průměrnou hodnotu tvarového součinitele přibližně 0,7 (Sturm, 2010).

Tvar zrn lze stanovit i dalšími metodami:

- Metoda poměrů hlavních tří os ($a > b > c$), viz tabulka 3 (Výbora, 1978)
- Součinitel plochosti dle Cailleauxa (Macura, Szolgay, 1990)

$$i = \frac{a+b}{2 \cdot c} \quad (2.5)$$

Tabulka 3 - klasifikace tvaru zrn podle jejich rozměrů trojosého elipsoidu (Výbora, 1978)

Poměr hlavních rozměrů	Název
$b/a > 0,66; c/b < 0,5$	velmi plochá
$b/a > 0,66; c/b < 0,66$	plochá
$b/a > 0,66; c/b > 0,66$	izometrická
$b/a < 0,66; c/b > 0,66$	tyčinkovitá
$b/a < 0,66; c/b < 0,66$	plochá tyčinkovitá

2.2.4. Obrus zrn

Zrna se při pohybu po dně rozpadávají, obrušují a tím se zmenšuje jejich velikost a hmotnost. Postupně zrna získávají tvar elipsoidu. Částice vyvřelých a metamorfovaných

hornin se při obrušování blíží svým tvarem více kouli, než zrna z flyšových oblastí (Macura, Szolgay, 1990).

Velikost obrusu při daném petrografickém složení materiálu vykazuje závislost na dráze, na níž došlo k úbytku hmotnosti (Výbora et al., 1989). Tomuto problému se věnoval H.Sternberg (1875), který jej popsal následující rovnicí:

$$dG = -c \cdot G_0 \cdot ds \quad (2.6)$$

$$\frac{dG}{ds} = -c \cdot G_0 \quad (2.7)$$

$$-\int_{G_0}^G \frac{dG}{G} = -c \int_0^s ds \quad (2.8)$$

Po integraci při počátečních podmínkách ($s=0$, $G=G_0$) dostaneme následující vztah:

$$G = G_0 \cdot e^{-c \cdot s} \quad (2.9)$$

G_0 hmotnost zrna na začátku dráhy

G hmotnost zrna na konci vykonané dráhy

ds změna dráhy

c součinitel obrusu – *coefficient of abrasion*

Součinitel obrusu c je úbytek částice o hmotnosti 1kg na dráze 1 km (tabulka 4). Měřením bylo zjištěno, že hodnoty součinitele obrusu c leží mezi $0.003 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$ a $0.03 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$.

Vzdálenost, kterou musí zrna urazit, aby se zmenšila na polovinu je pro jednotlivé druhy hornin následující:

Amfibolit 200-250 km; křemen 140 km; žula a rula 100-150 km; dolomit 60 km; slín 30km.

Zrna se nikdy nezmenší na nulovou hodnotu, ale pouze do určité velikosti, po té jsou unášena jako plaveniny (Kovář, 1988).

Tabulka 4- hodnoty součinitele obrusu c (Výbora et al.,1989)

Hornina	Součinitel C	
	Zaoblená zrna	Ostrá zrna
Kvarcit (křemen)	$6,97 \cdot 10^{-4}$	
Žula	$2,25 \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 10^{-4}$	$8,56 \cdot 10^{-3}$
Rula	$2,25 \cdot 10^{-3}$	
Dolomit	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$5,42 \cdot 10^{-2}$
Amfibolit	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$5,07 \cdot 10^{-3}$
Vápenec	$8,78 \cdot 10^{-3} = 1,59 \cdot 10^{-3}$	$5,07 \cdot 10^{-2}$
Pískovec	$4,12 \cdot 10^{-2}$	$4,43 \cdot 10^{-1}$

2.2.5. Měrná hmotnost, měrná tíha

Měrná hmotnost sedimentů ρ_s se definuje jako poměr hmotnosti částic k jejich objemu, jednotkou je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

V některých výpočtech je uváděna měrná tíha splavenin, kdy je měrná hmotnost vynásobena gravitačním zrychlením (rov. 2.10).

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g \quad (2.10)$$

Jednotkou měrné tíhy je $\text{N} \cdot \text{m}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ (Macura, Szolgay, 1990).

V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty měrné hmotnosti a tíhy některých druhů částic. Často se používá univerzální hodnota, která je v tab. 5 uvedena pro štěrky a písky.

Tabulka 5 - hodnoty měrné hmotnosti a měrné tíhy různých druhů sedimentů (Macura, Szolgay, 1990)

Druh splavenin	ρ_s	γ_s
	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3} = \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$
Štěrk, písky	2650	26500
Prachovité písky, písčité hlíny	2670	26700
Prachovité hlíny	2700	27000
Jílovité hlíny, jíly	2750	27500

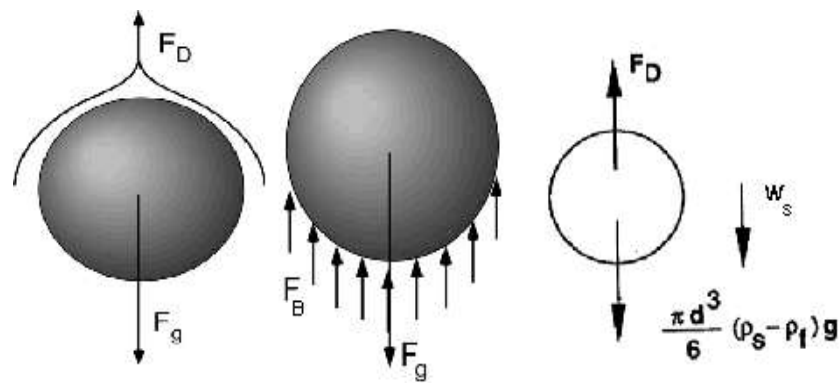
2.2.6. Sedimentační rychlost

Sedimentační rychlost w (*fall velocity*) je důležitá charakteristika sedimentů, která se používá v transportních rovnicích. Jedná se o funkci vlastností materiálu (d , ρ_s , g) a kapaliny (ρ , μ). Vztah sedimentační rychlosti (rov.2.16) v klidné kapalině jako první zveřejnil Sir George Stokes v roce 1851. Stokes předpokládal kulový tvar částice. Při rovnoměrném pohybu tělesa v kapalině bude odpor tělesa (F_D , rov. 2.11), působící proti pohybu, v rovnováze (rov. 2.15) s tíhou tělesa (G_s , rov. 2.14) (Výbora et al., 1989). Tíha tělesa je rozdílem síly gravitační (F_G , rov. 2.12) a síly vztlakové (F_B , rov. 2.13).

$$F_D = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w_s \quad (2.11) \quad F_G = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_s \cdot g \quad (2.12)$$

$$F_B = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_v \cdot g \quad (2.13) \quad F_G - F_B = G_s = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_s - \rho_v) \cdot g \quad (2.14)$$

$$3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot w_s = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_s - \rho_v) \cdot g \quad (2.15) \quad w_s = \frac{(\rho_s - \rho_v)}{18} \cdot \frac{g \cdot d^2}{\mu} \quad (2.16)$$



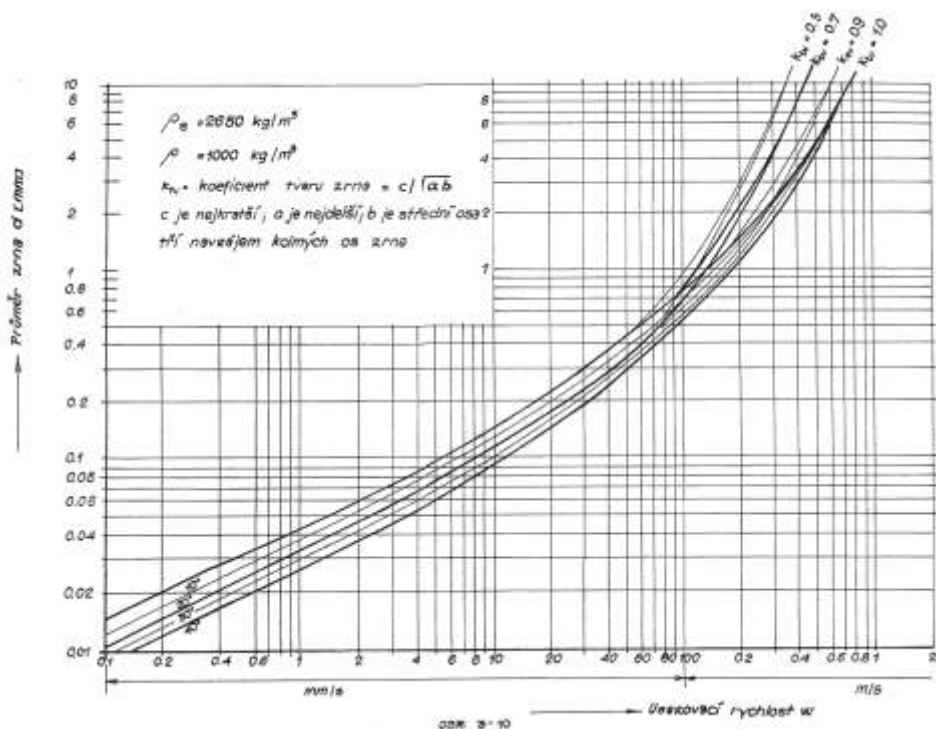
Obrázek 3 - síly působící na klesající částici v tekutině ((přednášky říčního inženýrství ČVUT, zdroj: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/RIN/ke_stazeni/prednasky/8/RIN_8-1.pdf))

Platnost vztahu (rov. 2.16) je omezena hodnotou Reynoldsova čísla (Re) (rov.2.17), která musí být menší než 0,1.

$$Re = \frac{w_s \cdot d}{\nu} \quad (2.17)$$

Pro větší hodnoty Reynoldsova čísla byly odvozeny později další vztahy, většinou charakterizující kulové částice. Zrna v tocích budou mít rychlost odlišnou, protože mají většinou jiný tvar než kulovitý (Výbora et al., 1989).

Zpracování rovnice 2.16 graficky i s vlivem tvaru je na obrázku 4.



Obrázek 4 - sedimentační rychlost závislá na průměru částic (Kovář, 1988)

Zahrnutím tvaru částice se zabýval Heywood, který vyvinul jednoduchou grafickou metodu, jež určovala vliv tvaru zrna na rychlost sedimentace a zavedl výraz pro odporový součinitel (C_D) pomocí konstantního objemu K (rov. 2.18) (Sturm, 2010 ex Heywood 1962).

$$K = \frac{\text{objem částice}}{d^3} \quad (2.18)$$

$$C_D = \frac{8 \cdot K}{\pi} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \cdot \frac{g \cdot d}{w^2} \quad (2.19)$$

Pokud se do rovnice pro odporovou sílu (2.11) dosadí odporový součinitel (2.19), jež bude v rovnováze s tíhou tělesa (2.14), lze vyjádřit sedimentační rychlost vztahem (2.21).

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot C_D \cdot A \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot C_D \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot w_s^2 \quad (2.20)$$

$$w_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_v)}{\rho_v} \cdot \frac{g \cdot d}{C_D}} \quad (2.21)$$

Tato rovnice platí, když jsou hodnoty Re čísla v rozmezí 0,1 až 500. Rovnice 2.21 nejde řešit explicitně právě proto, že je odporový součinitel funkcí Re čísla $C_D=f(\text{Re})$ (Sturm, 2010). Je proto vyžadována aproximace Reynoldsova čísla či odporového součinitele nebo iterativní řešení (Brunner, 2010a)

3. Vliv sedimentů na koryto toku

Dokud jsou síly působící na dno koryta menší než jejich mezní hodnoty, je materiál na dně koryta v klidu a dno je možné považovat za stabilní. Jestliže ale dosáhne tečné napětí kritickou hodnotu, nebo ji překročí, začíná pohyb částic (Mareš, 1985).

Často je problém definovat počátek pohybu. Kramer v roce 1965 definoval tři typy pohybu (Mareš, 1985 ex. Kramer, 1965):

- Slabý – jen několik částic se pohybuje. Pohybující se zrna mají proti ostatním zrnům malé průměry.

- Střední pohyb – zrna středního průměru se začínají pohybovat. Pohyb už není jen lokální, nelze stanovit počet zrn na jednotku plochy. Zatím na dně nenastávají žádné větší deformace.
- Hlavní pohyb – pohybuje se celá splaveninová směs na dně.

Při pohybu částic vznikají plaveniny a splaveniny, čímž se mění některé vlastnosti koryta. Dochází k přetváření koryta, kdy se formuje příčný, ale i podélný profil. Koryto se prohlubuje, zakřivuje a rozšiřuje (Výbora et al., 1989).

Transport sedimentů ovlivňuje rychlost proudění, což lze vyjádřit v následujících rovnicích 3.1 a 3.2. Rychlost proudící vody s nerozpuštěnými tuhými částicemi je menší než rychlost vody samotné. Označíme-li V jako objem čisté vody a splavenin a V_1 jako objem pouze splavenin, pak celková hmotnost vody a splavenin bude:

$$M = (V - V_1) \cdot \rho + V_1 \cdot \rho_s \quad (3.1)$$

Předpokladem je stejná hodnota hybnosti čisté vody a vody se splaveninami.

$$V \cdot \rho \cdot v = [(V - V_1) \cdot \rho + V_1 \cdot \rho_s] \cdot v_s \quad (3.2)$$

v ... je průřezová rychlost čisté vody

v_s ... průřezová rychlost vody a splavenin

Pokud si vyjádříme v_s dostaneme:

$$v_s = v \frac{\rho}{\rho - \frac{V_1}{V}(\rho - \rho_s)} \quad (3.3)$$

Jelikož $\rho < \rho_s$ a $V_1 < V$, je zřejmé, že hodnota zlomku je menší než jedna a proto musí být $v_s < v$ (Výbora et al., 1989).

K ukládání částic dochází v místech, kde klesá unášecí schopnost proudu, sedimenty se usazují a vytvářejí různé zrnitostní složení a tvary na dně (Výbora et al., 1989).

Množství splavenin v tocích se velmi různí podle geologických, pedologických, morfologických a jiných podmínek v povodí i ve vlastním korytě, jakož i podle hydraulických vlastností toku. Průtok splavenin se vyjadřuje se specifickým průtokem splavenin, což je množství, které projde korytem toku o šířce 1 m za 1 sekundu ($\text{kg s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$). Znalost průtoku splavenin je důležitá pro řešení úprav toků i různých navrhovaných vodohospodářských zařízení a staveb (Tlapák, Henrynek, 2001).

3.1. Počátek pohybu splavenin

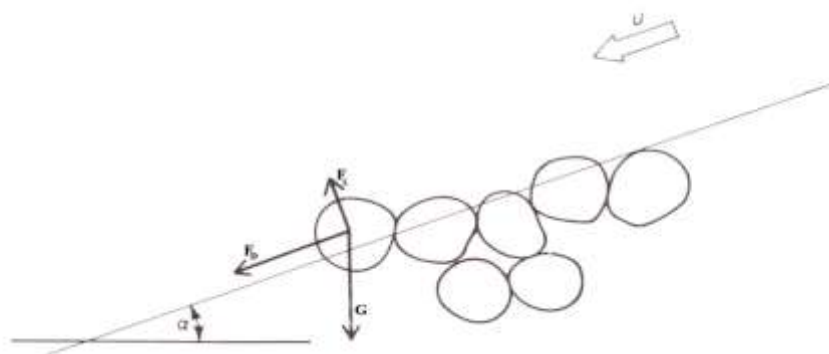
Je těžké určit počátek pohybu sedimentů. Více méně záleží na definici jednotlivých autorů (Yang, 2006). Nejdříve se začnou pohybovat vyčnívající částice a při větším průtoku se do pohybu dává více a více splavenin. Pohyb nejdříve začíná překlopením či posunem, při zvýšení rychlosti dochází k válení či koulení po dně, které přechází v poskakování nebo unášení částic proudem. Některé výše uvedené stavy nastat nemusí. Záleží jak na vlastnostech proudící tekutiny, tak na vlastnostech částic, které jsou přenášeny (Kolář, 1978).

Při určování začátku pohybu splavenin se vytvořily určité zjednodušené představy o působení proudícího média na materiál tvořící dnové sedimenty. Na částice působí síly, které se snaží uvést částice do pohybu. Teorie, které se zabývají popisem počátku pohybu splavenin, jsou založené buď na kritické rychlosti proudu - vymílací rychlost (*velocity approach*) nebo na kritické unášecí síle proudu - tečná síla na dně (*shear stress approach*).

3.1.1. Kritická rychlost proudu

Kritická rychlost proudu je tzv. nevymílací rychlostí proudu (v_v). Síly působící na ponořenou částici na dně jsou v rovnováze a tím je bráněno v pohybu částic. Pokud tato rychlost není překročena, pak nedochází k narušení stability dna (Výbora et al., 1989). Jde o maximální hodnotu rychlosti při rovnoměrném pohybu (Kolář, 1978).

Síly působící na ponořenou částici jsou znázorněny na obrázku 5: tíha ponořené částice (F_G ; rov. 3.6), hydrodynamický tlak (rov. 3.4) a hydrodynamický vztlak (F_L ; rov. 3.5) (Mareš, 1985).



Obrázek 5 - Síly působící na částice na dně (Graf, 1971)

$$F_D = C_D \cdot k_1 \cdot d^2 \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad (3.4)$$

$$F_L = C_L \cdot k_2 \cdot d^2 \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \quad (3.5)$$

$$F_G = G = k_3 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^3 \quad (3.6)$$

C_D ... odporový součinitel

C_L ... vztlačkový součinitel

d ... průměr zrna

k_1, k_2, k_3 ... tvarové součinitele

u ... rychlost vody u dna

Nevymílací rychlost se vyjadřuje ze vztahu (3.7), kde úhel φ vyjadřuje přirozenou sklonitost materiálu a úhel α je sklon dna, při němž začíná pohyb částic.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{G \cdot \sin \alpha + F_D}{G \cdot \cos \alpha - F_L} \quad (3.7)$$

Po dosazení rovnic 3.4 a 3.5 do rovnice 3.7 a úpravě rovnice, dostaneme výraz:

$$\frac{u_{kr}^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \cdot g \cdot d} = \frac{2 \cdot k_3 (\operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \alpha - \sin \alpha)}{C_D \cdot k_1 + C_L \cdot k_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (3.8)$$

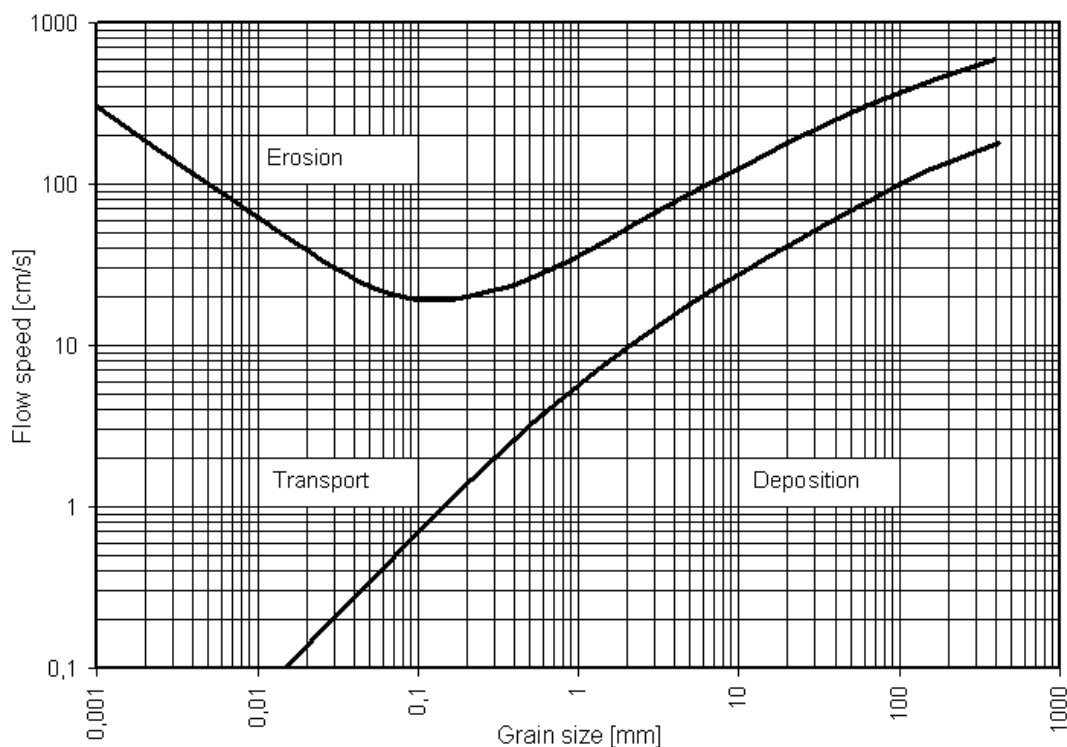
Pravou stranu rovnice zapsat jako koeficient **A**, který v sobě zahrnuje vlastnosti částic (tvar, velikost, zrnitostní složení atd.), dynamiku proudu (má vliv na koeficienty C_D a C_L), sklon dna a sklonitost vnitřního úhlu sedimentů na dně (Graf, 1971). Tím pádem může být rovnice kritické rychlosti zapsána následovně:

$$u_{kr} = \sqrt{A \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \cdot g \cdot d} \quad (3.9)$$

Existuje několik experimentálních formulací (např. od F.J. Mavise, Gončarova, Leviho atd.), kteří popisují kritickou rychlost proudu a jsou zjednodušením rovnice 3.9. Parametry těchto vyjádření byly většinou určeny buď laboratorními pokusy či přímým měřením

na tocích (Bogárdi, 1974). Většinou tyto vzorce nemají všeobecnou platnost a liší se ve výsledcích (Kovář, 1988).

V roce 1935 popsal Hjulström graficky vztah mezi rychlostí a průměrem zrna (obr. 6). K popisu použil průměrnou rychlost proudu a předpokládal, že průměrná rychlost je asi 40 krát větší než rychlost u dna pro hloubku větší jak 1 m (Graf, 1971).



Obrázek 6- eroze -transport- sedimentace částic podle Hjulströma (Graf, 1971)

3.1.2. Unášecí síla proudu

Významný a široce používaný přístup ke stanovení počátečního pohybu částic je diagram Shieldse z roku 1936 založený na tečném napětí (τ). Shields předpokládal, že faktory popisující počátek pohybu částic jsou tečné napětí (τ), rozdíl hustot mezi sedimentem a tekutinou ($\rho_s - \rho$ či $\gamma_s - \gamma$), rozměr částice (d), kinematická viskozita (ν) a gravitační zrychlení (g). Vztah mezi proměnnými v Shieldsově rovnici (rov. 3.10) byl určen experimentálně. Výsledky jsou uvedeny v grafu (obr. 7), kde jsou zahrnuty výsledky dalších autorů. Prostor nad křivkou určuje, že se částice bude pohybovat a naopak (Yang, 2006).

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = f\left(\frac{u_* \cdot d}{\nu}\right) \quad (3.10)$$

τ_c ... kritické tečné napětí na dně

γ, γ_s ... měrná hmotnost vody, částice (výpočet rovnice 2.10)

ν ... kinematická viskozita ($\nu = \mu/\rho$; dynamická viskozita/hustota vody)

Levá strana rovnice 3.10 je tzv. Shieldsův parametr (θ) a pravá strana rovnice 3.10 je funkcí Re čísla, které se značí jako Re_* a nazývá se splaveninové Reynoldsovo číslo.

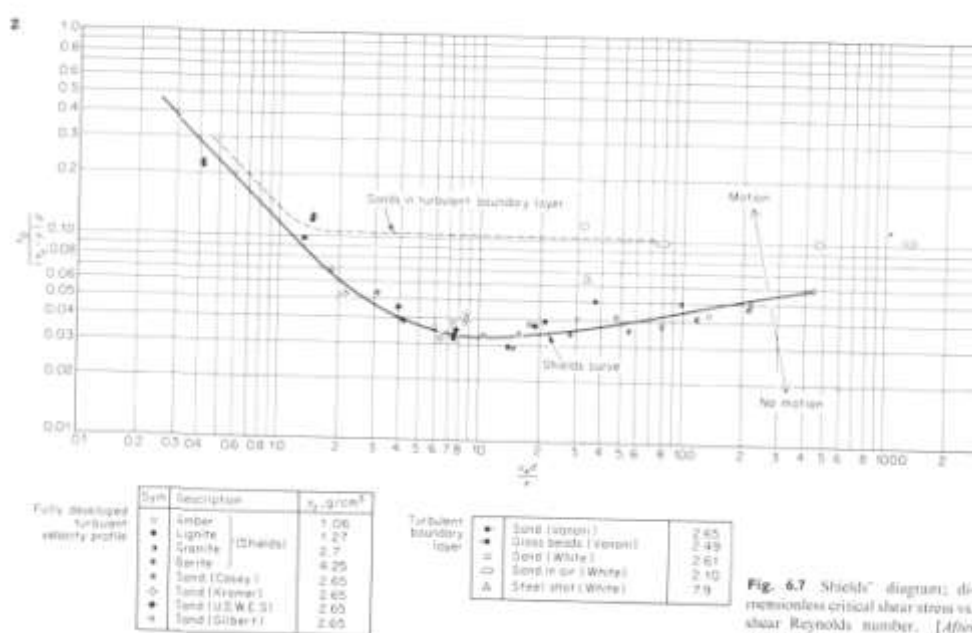
Třecí rychlost (u_*) vyjadřuje rovnice 3.12 a kritické tečné napětí (τ_c) je definováno výrazem 3.11.

$$\tau_c = \gamma \cdot R \cdot S \quad (3.11)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad \text{či} \quad u_* = \sqrt{g \cdot S \cdot R} \quad (3.12)$$

R ... hydraulický poloměr

S ... sklon



Obrázek 7 - Shieldsův diagram (Graf, 1971)

Na obr. 7 můžeme rozlišit tři hlavní oblasti: laminární, přechodnou a turbulentní. Určeny jsou přibližnou hodnotou splaveninového Re_* čísla, nebo porovnáním tloušťky viskózní podvrstvy (δ , rov. 3.13) a průměrem zrna (d) (Graf, 1971).

$$\delta = \frac{11,6 \cdot \mu}{\rho \cdot v_*} \quad (3.13)$$

Rozlišení oblastí:

a) Laminární ($Re_* \approx 2; d < \delta$)

Částice jsou uzavřeny laminárním filmem, jejich pohyb je výhradně způsobován viskózním účinkem a nezávisí na turbulenci. Podmínky proudění jsou podobné pohybu tekutiny omezené hladkými stěnami (Graf, 1971).

b) Přechodná ($Re_* \approx 10; d \approx \delta$)

Laminární podvrstva z části pokrývá splaveninové částice a z části je přerušena. Podle Shieldsova diagramu tomuto případu odpovídá Shieldsův parametr.

$$\theta = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d} = 0,03 \quad (3.14)$$

Pod touto hodnotou by nemělo k pohybu částic docházet (Graf, 1971).

c) Turbulentní ($Re_* > 500; d > \delta$)

Dochází k porušení laminární podvrstvy drsností dna, která je zdrojem turbulence. Shieldsův parametr by měl být roven:

$$\theta = 0,06$$

Hodnota může být i nižší okolo 0.047 (Graf, 1971).

Shieldsův diagram se stále široce používá k určení popisu, začátku pohybu dnových částic. V praxi dochází k úpravám křivky v závislosti na místních podmínkách, ale většinou jsou změny nepatrné.

3.2. Dnové útvary

Splaveniny se pohybují po dně jednotlivě nebo ve dnových útvarech, které se rozdělují na rovné dno, vrásky (čeřiny), duny, lavice a antiduny (obr. 8). Existence dnových splavenin je závislá na Froudově čísle (Fr ; rov. 3.15) (Kolář, 1978).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3.15)$$

Při pohybu dnových útvarů se mění charakteristiky sedimentů (zrnitostní složení) a charakteristiky proudu (např. množství plavenin v proudu, rychlost). Se změnou tvaru dna se mění také vodní hladina (Garde, Raju, 1977).

Kromě základních typů dnových útvarů mohou existovat různé mezitypy. V přirozených korytech mohou různé dnové útvary existovat vedle sebe či za sebou (Kolář, 1978).

3.2.1. Rovné dno (*plane bed*)

Nastává v případech, když není překročena kritická rychlost u_c (resp. kritické tečné napětí τ_c), tudíž nedochází ani k pohybu splavenin po dně (Garde Raju, 1977).

Druhým případem, kdy se může objevit rovné dno, je přechod mezi dunami a antidunami. V tomto případě se Froudovo číslo pohybuje v rozmezí 0,7 -1 a dochází k pohybu splavenin (Patočka, Macura, 1978).

Pokud se vyskytnou rovné dno, nedochází k narušování vodní hladiny (např. vlny, víry...).

3.2.2. Vrásky (čeřiny, *ripples*)

Vrásky jsou většinou složeny z jemnozrnného materiálu s průměr zrna menšími než 0,6 mm. Vrásky se podobají vlnkám, které mají trojúhelníkovitý tvar, mají vlnovou délku pod 60cm a výšku do 6 cm (Patočka, Macura, 1978).

Pohybují se po proudu rychlostí menší než průřezová rychlost proudu. Nijak neovlivňují vodní hladinu, ale vznik vrásek ovlivňuje drsnost a tím i průtok splavenin a plavenin v toku (Kovář, 1988).

3.2.3. Duny (*dunes*)

Duny vytvářejí podobný tvar jako vrásky s mírným sklonem proti proudu. Po proudu odpovídá sklon přirozenému sklonu materiálu. Objevují se při vyšších průtocích vody a splavenin než vrásky. Při menších průtocích se na svazích dun mohou z jemnozrnného materiálu vytvářet vrásky. Pohybují se po proudu. Vznikají, když je $Fr < 0,6$ (Patočka, Macura, 1978).

Mohou ovlivňovat hladinu toku. Vlny na vodní hladině mají jiný průběh než duny (Kolář, 1978). Duny mohou ovlivňovat i hloubku. Při vyšších rychlostech duny rychle rostou, nejmenší hloubka je na hřebenu duny, kde je i největší rychlost vody. Následně může být duna smyta a může být vytvořeno rovné dno či jiný tvar (Liu, 2001).

3.2.4. Lavice

Lavice se tvoří podobně jako vrásky či duny, ale jsou z hrubozrnnějšího materiálu s malým obsahem jemných částic. Jejich pohyb po proudu je rychlejší než u vrásek a dun. Splaveniny se nejvíce pohybují v čele lavice, pak se pohyb postupně zmenšuje a na konci téměř ustává. K narušování lavic dochází při vyšších rychlostech, kdy dochází k odtrhávání některých částic a následnému ukládání na následující lavici (Kovář, 1988).

3.2.5. Antiduny (*antidunes*)

Antiduny jsou dnové útvary, které se vytváří při $Fr > 0,8$. Mohou se pohybovat po proudu, proti proudu či stát na místě. Chování antidun, závisí na vlastnostech splavenin a podmínkách proudění (Patočka, Macura, 1978). Pohyb antidun probíhá, když na náběhové straně poklesne tečné napětí, dochází na ni k ukládání splavenin. Na opačné straně ke straně náběhové se splaveniny vymílají (Kovář, 1988).

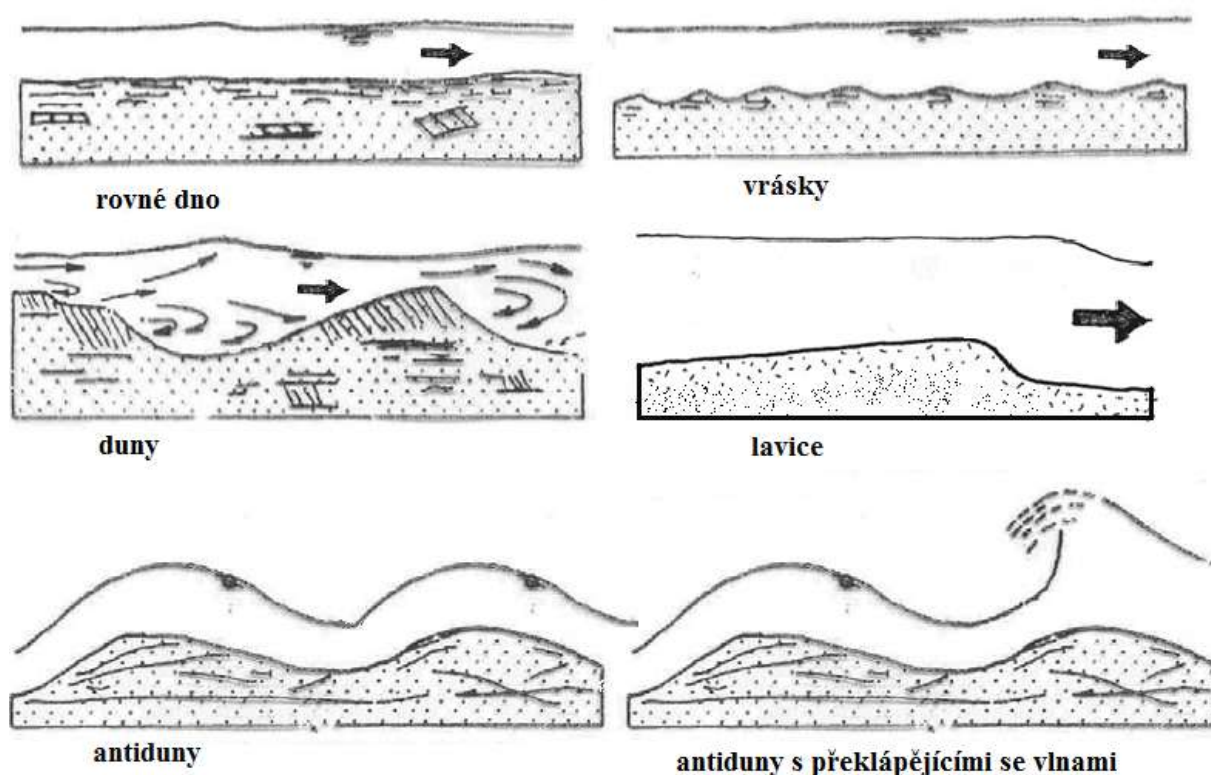
Vlnová délka (λ) je určena rovnicí 3.16, výška závisí na hloubce a rychlosti vodního proudu.

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v^2}{g} \quad (3.16)$$

Hladina je výrazně sfázována se dnem a symetrické vlny určují přítomnost antidun. Vlny s rostoucím Fr číslem rostou, až ztratí stabilitu a rozpadnou se směrem proti proudu (Kolář, 1978).

3.2.6. Krycí vrstva (přirozená dnová dlažba)

Vlivem nepravidelného pohybu splavenin dochází ke třídění materiálu a dochází ke vzniku tzv. krycí vrstvy, kdy se splaveniny v horní vrstvě uloží tak, že vzdorují odpavení. Většinou se splaveniny uloží šupinovitě. Dno chráněné krycí vrstvou se dá do pohybu až při značně vyšším průtoku (Kovář, 1988).



Obrázek 8- tvary na dně (přednášky říčního inženýrství ČVUT,
zdroj:http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/RIN/ke_stazeni/prednasky/8/RIN_8-1.pdf)

4. Průtok sedimentů

K pohybu sedimentů v korytě bylo odvozeno několik formulací, jež lze rozdělit na průtok splavenin (částice na dně), průtok plavenin (vznášející se částice) či celkový průtok sedimentů. Metody vznikly za určitých podmínek, které vymezují rozsah jejich použití.

4.1. Průtok splavenin (*bed load*)

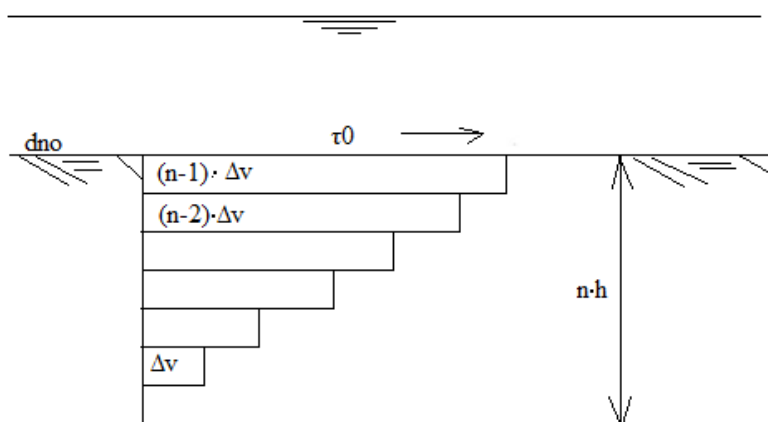
Rovnic, které popisují pohyb splavenin u dna, bylo vyvinuto několik, často podobné. Rovnice byly proto rozděleny podle typu do tří skupin (Graf, 1971):

DuBoysův typ rovnic, který je založen na vztahu tečného napětí (τ_0) a kritického tečného napětí (τ_{0kr})

První rovnice, která se věnovala transportu dnových splavenin, byla odvozena DuBoysem. Po té ho následovalo několik dalších, většinou vycházeli z jeho předpokladů (Garde, Raju, 1977).

DuBoys předpokládal, že odnos splavenin nastává v n vrstvách (obr. 9) s tloušťkou h , které jsou rovnoběžné ke dnu. Rychlost ve vrstvách je různá, zrna v povrchové vrstvě se pohybují rychlostí $(n-1) \cdot \Delta v$, kde Δv je přírůstek rychlosti mezi spodní přilehlou vrstvou a horní vrstvou. Pokud je rychlost mezi vrstvami rozložena lineárně, pak je průtok splavenin dán rovnicí 4.1 (Graf, 1971):

$$q_s = h \cdot \Delta v \cdot \frac{n(n-1)}{2} \quad (4.1)$$



Obrázek 9 - proudění splavenin na dně dle DuBoyse (Graf, 1971)

V nejnižší vrstvě, ve které je rychlost nulová, je v rovnováze tečné napětí a třecí síla (rov. 4.2). Pokud ale dojde k narušení rovnováhy, pak tečné napětí překročí mezní hodnotu a dojde k pohybu splavenin (4.3).

$$\tau_0 = \gamma \cdot D_h \cdot S = c_f \cdot n \cdot h \cdot (\gamma_s - \gamma) \quad (4.2)$$

$$\tau_{0kr} = c_f \cdot h \cdot (\gamma_s - \gamma) \quad (4.3)$$

c_f ...koeficient tření

Pokud se rovnice 4.2 a 4.3 dají do poměru, vyjde výraz pro počet vrstev $n = \tau_0 / \tau_{0kr}$ a vložení a úpravou rovnice 4.1 dostaneme následující vyjádření (DuBoysova rovnice) (Graf, 1971):

$$q_s = \left[\frac{h \cdot \Delta v}{2 \cdot \tau_{0kr}} \right] \cdot \tau_0 \cdot (\tau_0 - \tau_{0kr}) \quad (4.4)$$

$$\chi = \left[\frac{h \cdot \Delta v}{2 \cdot \tau_{0kr}} \right] \quad (4.5)$$

χ ... kvantitativní charakteristika sedimentů (splavenin)

Schoklistchův (1934) typ rovnic, který je založen na vztahu průtoku kapaliny a kritického tečného napětí, při němž se splaveniny začínají pohybovat.

Schoklistch pomocí laboratorních experimentů došel k vyjádření průtoku splavenin podobnou rovnicí jako DuBoys, přičemž tečnou sílu (τ_0) nahradil průtoky (q). Jedná se o základní rovnici, která byla následně různými autory upravována. Tyto rovnice jsou proto popisovány jako Schoklitschův typ rovnic.

$$q_s = \chi'' \cdot S^k \cdot (q - q_{kr}) \quad (4.6)$$

χ'' ... koeficient popisující charakteristiku sedimentů (splavenin)

Mezi tento typ rovnic patří empirický vztah, který vyvinuli a v roce 1948 publikovali Mayer-Peter a Müller. Vyjádření získalo oblibu v technické praxi (Výbora et al., 1989).

Autoři předpokládali, že sklon čáry mechanické energie (S) je určujícím parametrem pohybu splavenin. Část mechanické energie patří pohybu splavenin a část pohybu vody (Výbora et al., 1989). Rovnice vyjadřuje vztah mezi průměrným tečným napětím, které působí na částice a kritickým tečným napětím, které způsobuje transport splavenin. Jako obecný tvar se uvádí (Brunner, 2010a):

$$\left(\frac{k_r}{k'_r}\right)^{3/2} \cdot \gamma \cdot R \cdot S = A \cdot (\gamma_s - \gamma) \cdot d_e + B \cdot \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{2/3} \cdot g'_s \quad (4.7)$$

k_r ... drsnost dna (makrodrsnost)

k'_r ... povrchová drsnost vyvolaná zrnem (mikrodrsnost)

R ... hydraulický poloměr

g'_s ... hmotnostní průtok splavenin na jednotku šířky koryta

A, B ... experimentální součinitelé ($A=0,047$; $B=0,25$)

Vztah je založen na experimentech předpokládající rovné dno s částicemi písku a šterku. Vhodné rozmezí zrn je od 0,4 mm do 29 mm (Brunner, 2010a).

Einsteinův (1942) typ rovnic, který je založen na statistickém vyjádření sil vztaku.

Einstein, jenž vycházel z experimentálních poznatků DuBoyse a Schoklitsche, dospěl ke dvěma základním myšlenkám:

- (1) Stanovení kritických hodnot pro počáteční pohyb splavenin je velmi obtížné a skoro nemožné. Proto je vhodné se těmito myšlenkám vyhnout.
- (2) Pohyb splavenin závisí více na fluktuaci turbulentního proudění než na středních hodnotách sil proudění působících na částice. Tudíž lze chápat začátek a konec pohybu jako pravděpodobnostní jev, který je závislý na vztakové síle a tíze splaveniny pod vodou (Graf, 1971).

Einstein svou experimentální práci ukončil těmito tezemi:

Ustálená a intenzivní výměna částic existuje mezi pohybujícími se splaveninami a dnovým materiálem.

Pohyb probíhá v krocích, kdy střední délka těchto kroků je úměrná velikosti částice. Částice nezůstávají v souvislém pohybu, ale po nějaké době se usazují (Výbora et al., 1989).

Svou rovnicí se Einstein snažil vyjádřit podmínku rovnováhy výměny dnových splavenin mezi pohybující se vrstvou a dnem (rov.4.8) s tím, že počet částic usazených za jednotku času na jednotkové ploše (levá strana rov. 4.8) musí být rovný počtu erodovaných částic za časovou jednotku z této jednotkové plochy (pravá strana rov. 4.8) (Kolář, 1978).

Výsledná Einsteinova rovnice má tvar:

$$\frac{g_s \cdot p_d}{\rho_s \cdot g \cdot A_L \cdot k_v \cdot d^4} = \frac{p_0 \cdot P}{k_s \cdot k_t \cdot d^2} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho) \cdot g}{\rho}} \quad (4.8)$$

g_s ... hmotnostní měrný průtok splavenin

p_d ... hmotnostní procento frakce dnových splavenin

p_0 ... hmotnostní procento frakce materiálu dna

A_L ... součinitel délky kroku částice

P ... pravděpodobnost, že dojde k vymletí částice

k_s ... konstanta plochy částice

k_v ... konstanta objemu částice

k_t ... konstanta časového měřítka částice

Einstein zavedl bezrozměrné číslo, které nazval intenzita pohybu dnových splavenin (ϕ).

$$\phi = \frac{g_s}{\rho_s \cdot g} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^3}} \quad (4.9)$$

4.2. Průtok plavenin

Plaveniny jsou částice, které jsou obklopené vodou, přemísťované v suspenzi. Pokud jsou síly udržující částici v suspenzi menší než tíha částice, dochází k jejímu poklesu.

Množství plavenin se udává buď jako koncentrace pevných látek (počet pevných částic na objem), nebo jako průtok plavenin označující množství pevných látek transportovaných daným příčným profilem za jednotku času. Průtok plavenin na 1m šířky se označuje jako *měrný průtok* (Výbora et al., 1989).

Plaveniny zůstávají v proudu, pokud svislá složka turbulence je větší než usazovací rychlost (w). Pevné částice mají podobné dráhy, jako částice vody. Mění se množství a zrnitostní složení plavenin (Výbora et al., 1989).

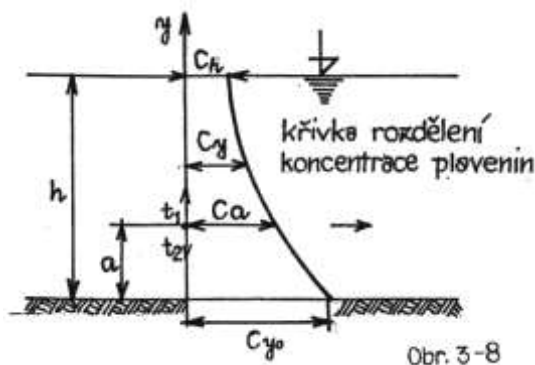
K pohybu částic v suspenzi dochází, pokud vertikální složka turbulence (levá část rov. 4.10), která vznáší částice vzhůru a složka, obsahující usazovací rychlost (pravá část rov. 4.10), jsou v rovnováze (Garde, Raju, 1977).

$$D \cdot \frac{dC}{dy} = -w \cdot C \quad (4.10)$$

D ... součinitel difuzivity

C ... koncentrace splavenin v hloubce y

Rovnice 4.10 je diferenciální rovnicí pro distribuci plavenin ve vertikálním směru. K získání relativní distribuce je potřeba ji integrovat v mezích mezi hloubkou y a hloubkou a (obr. 10) (Kovář, 1988). Po integraci a úpravě je získán vztah (4.11) koncentrace plavenin

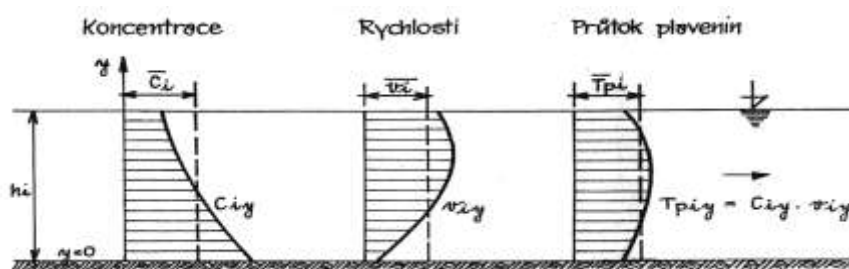


Obrázek 10 - křivka rozdělení koncentrace plavenin (Kovář, 1988)

$$\frac{C}{C_a} = e^{-w \cdot (y-a)/D} \quad (4.11)$$

Pokud známe vertikální složení sedimentů v toku, můžeme vypočítat průtok plavenin (rov.4.12).

$$g_p = \rho_s \cdot \int_0^h C \cdot u \cdot dy \quad (4.12)$$



Obrázek 11- vertikální distribuce plavenin, rychlosti a průtoku plavenin (Kovář, 1988)

4.3.Celkový průtok sedimentů

Celkový průtok sedimentů je obvykle součet množství plavenin a splavenin. Při nižších rychlostech, kdy se sedimenty pohybují při dně, je možné použít aproximované rovnice pro výpočet průtoku dnových splavenin.

Garde,Raju (Garde,Raju,1977) a Graf (Graf,1971) rozdělují dva přístupy, které se zabývají stanovením celkového průtoku splavenin – nepřímý a přímý.

První přístup je nepřímý, kdy v celkovém průtoku splavenin je zahrnut i smyv materiálu z povodí, který se v korytě vyskytuje jako tzv. *wash load*. Tímto přístupem se např. zabýval H.A.Einstein (Graf, 1971).

P.B.Toffaleti by jedním z autorů, který založil svou metodu na Einsteinově přístupu. Rozdělil vertikální distribuci suspendovaných částic do čtyř vrstev: horní, střední, dolní a dnová vrstva. V každé vrstvě je vypočítán průtok sedimentů nezávisle na sobě, celkový průtok je součtem ze všech čtyř vrstev. Ve vyjádření je zahrnutý vztah mezi charakteristikami sedimentů a hydraulickými charakteristikami. Vhodná velikost částic je v rozmezí 0,3-0,93 mm, metoda vede k uspokojivým výsledkům i pro částice průměrem zrn okolo 0,095 mm (Brunner, 2010a).

Toffaletiho rovnice transportu sedimentů v jednotlivých vrstvách:

$$g_{seD} = M \cdot \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0,756 \cdot z} - (2 \cdot d_e)^{1+n_v-0,756 \cdot z}}{1 + n_v - 0,756 \cdot z} \quad \text{dolní vrstva} \quad (4.13)$$

$$g_{seS} = M \cdot \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0,756 \cdot z} - \left[\left(\frac{R}{2,5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11,24}\right)^{1+n_v-z}\right]}{1+n_v-z} \quad \text{střední vrstva} \quad (4.14)$$

$$g_{seH} = M \cdot \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244 \cdot z} \cdot \left(\frac{R}{2,5}\right)^{0.5 \cdot z} \cdot \left[R^{1+n_v-1,5 \cdot z} - \left(\frac{R}{2,5}\right)^{1+n_v-1,5 \cdot z}\right]}{1+n_v-1,5 \cdot z} \quad \text{horní vrstva} \quad (4.15)$$

$$g_{seB} = M \cdot (2 \cdot d_e)^{1+n_v-0,756 \cdot z} \quad \text{dnová vrstva} \quad (4.16)$$

M... parametr koncentrace sedimentů

z....exponent popisující vztah mezi vlastnostmi sedimentu a hydraulickými charakteristikami

n_v ... exponent teploty

Druhý přístup je přímý, kdy předpokladem je, že při určování celkového průtoku sedimentů je materiál v korytě zásobován materiálem dna (Graf, 1971).

V tomto přístupu je zahrnut vztah k tečnému napětí (Garde, Raju, 1977). Existuje mnoho vyjádření, která jsou založena na tomto přístupu. Následně je popsáno několik funkcí od různých autorů, kteří tento problém řešili.

a) Laursen - Copeland

Laursen uvažoval, že důležitými parametry, které popisují celkový průtok, jsou poměr třecí rychlosti (u_*) k sedimentační rychlosti (w), velikosti zrna (d) k hloubce (D_h), koncentrace splavenin (C) a tečného napětí (τ_0) ke kritickému tečnému napětí (τ_{0kr}) (Garde, Raju, 1977). Později tuto rovnici zobecnil Copeland, který do rovnice zahrnul i transport štěrkových sedimentů.

Rovnice sestavená Laursenem, měla hranici průměru zrn od 0,011 – 4,08 mm (Garde&Raju, 1977). Po úpravě Copelandem je možné počítat v rozmezí od 0,011 – 29 mm (Brunner,2010a).

Laurensova rovnice upravená Copelandem:

$$C_m = 0,01 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{d_e}{D_h}\right)^{7/6} \cdot \left(\frac{\tau_0}{\tau_{0kr}} - 1\right) \cdot f\left(\frac{u_*}{w}\right) \quad (4.17)$$

C_m ... průtok koncentrace sedimentů (váha/objem)

D_h ... efektivní hloubka

b) Engelund - Hansen

Tito autoři navrhli, že celkový průtok sedimentů, je ve vztahu k tečnému napětí a tření na dně. Předpokládali, že dno je pokryto dunami, pohybující se po proudu, jenž nemění tvar (Garde, Raju, 1977). Tento přístup je vhodný pro koryta, která mají hlavně písčité složení s podstatným množstvím suspendovaných částic. Rozmezí průměru zrn, pro které je možné použití: 0,19 – 0,93 mm (Brunner,2010a).

$$g_{se} = 0,05 \cdot \gamma_s \cdot U^2 \cdot \sqrt{\frac{d_{50}}{g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} \cdot \left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) \cdot d_{50}}\right]^{3/2} \quad (4.18)$$

U ...průměrná rychlost proudu

c) Ackers - White

Předpokladem těchto autorů bylo, že jen tečné napětí na dně je podmínkou k transportu hrubého materiálu a jemný materiál je dominantní v suspenzi (jako plaveniny) (Garde, Raju, 1977). Transportní funkce byla založena na velikosti částic, jejich mobilitě a transportu (Brunner, 2010a).

Vztahem, který vyvinuli Ackers-White, je možné počítat s velikostí sedimentů v rozmezí 0,04 mm až 7 mm (Brunner, 2010a).

Vztah byl aplikován asi na 1000 experimentech, kdy hloubka vody byla větší než 0,4 m. Bylo stanoveno několik koeficientů (C_{exp} , A , F_{gr}). Funkce je vhodná pro různé typy dnových útvarů, jako je rovné dno, vrásky a duny (Brunner, 2010a).

Rovnice popisující koncentraci sedimentů:

$$C_{se} = C_{exp} \cdot \rho_s \cdot \frac{d_e}{D_h} \cdot \left(\frac{U}{u_*}\right)^n \cdot \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1\right) \quad (4.19)$$

C_{se} ...koncentrace sedimentů

C_{exp} ...experimentální koeficient

F_{gr} ... parametr mobility sedimentů

A ...kritický parametr mobility sedimentů

d) Přístup - Yang

Yang předpokládal, že dominantním faktorem popisující průtok sedimentů je unášecí síla (*stream power*; $US = rychlost \cdot sklon$), která je produktem rychlosti a tečného napětí. Vyjádření se skládá ze dvou rovnic, kdy jedna je pro písek a druhá pro štěrk. Rozmezí průměru zrn je mezi 0,062 – 7 mm (Brunner, 2010a).

Rovnice pro písek $d_e < 2\text{mm}$

$$\log C_{se} = 5,435 - 0,286 \cdot \log \cdot \frac{w \cdot d_e}{\nu} - 0,457 \cdot \log \cdot \frac{u_*}{w} + \left(1,799 - 0,409 \cdot \log \cdot \frac{w \cdot d_e}{\nu} - 0,314 \cdot \log \cdot u_* \cdot w \cdot \log \cdot (U \cdot Sw - U_{kr} \cdot Sw)\right) \quad (4.20)$$

Rovnice pro štěrk $d_e > 2\text{mm}$

$$\log C_{se} = 6,681 - 0,633 \cdot \log \cdot \frac{w \cdot d_e}{\nu} - 4,816 \cdot \log \cdot \frac{u_*}{w} + \left(2,784 - 0,305 \cdot \log \cdot \frac{w \cdot d_e}{\nu} - 0,282 \cdot \log \cdot u_* \cdot w \cdot \log \cdot (U \cdot Sw - U_{kr} \cdot Sw)\right) \quad (4.21)$$

Yang své rovnice upravoval i později, když se věnoval transportu sedimentů na Žluté řece.

Existuje řada dalších rovnic a přístupů, které se věnují celkovému transportu sedimentů. Autoři se snaží buď přijít na nějaký nový způsob či upravují dosavadní rovnice.

5. Matematické modely

K modelování transportu sedimentů existuje několik modelů. Většina jich obsahuje několik transportních rovnic od různých autorů s podmínkami použití (rozmezí průměru zrna, hloubka apod.), ke kterým by mělo být přihlíženo při vytváření modelu.

Yang (2002) popsal, že základní model, který se zabývá transportem sedimentů, by měl mít následující charakteristiky:

- obsahuje taková matematická vyjádření, která jsou odzkoušená
- model může být aplikován na otevřené koryto s okrajovými podmínkami
- model může být aplikován na říční a bystřinné proudění
- model počítá a simuluje změnu podmínek (hydraulika, tvar koryta) v podélném i příčném profilu
- model simuluje a predikuje geometrii koryta (hloubka, šířka)
- model simuluje rovnováhu a nerovnováhu transportu sedimentů
- model může zahrnout specifické podmínky, jako je stabilita či eroze
- model by neměl požadovat data, jež je těžké či nemožné získat

Modely počítající transport sedimentů můžou být 1D, 2D či 3D. Nejčastěji se používají 1D modely, neboť vyžadují nejméně dat, nepotřebují velké množství počítačové paměti a řešení je relativně stabilní (Yang, 2002).

Příklady 1D modelů zabývajících se transportem sedimentů: FLUVIAL, GSTARS, MIKE 11, HEC-RAS (dříve pro sedimenty HEC-6) a další. Software je buď volně dostupný např. HEC-RAS či komerční jako je např. software od DHI.

5.1. Program HEC-RAS

Jedná se o 1D hydrodynamický model, který slouží k modelování ustáleného a neustáleného proudění, transportu sedimentů a změny teploty ve vodním proudu. Software je vyvíjen U. S. Army Corps of Engineers River Analysis System a je volně dostupný. Jeho aktuální verzi (nyní HEC - RAS 4.1) s doprovodnou dokumentací lze najít na internetu:

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

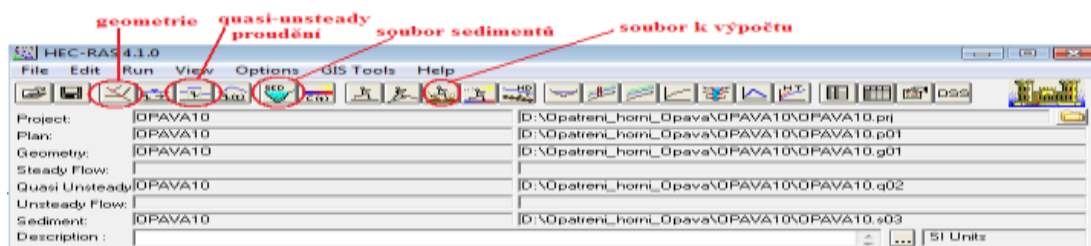
Hydrologic Engineering Center vytváří i další programové vybavení: srážko-odtokový model (HEC-HMS), simulace systému nádrží (HEC-ResSim), model povodňových škod

(HEC-FDA). Výstupy z HEC-RAS lze proto použít i v dalších programech vývojové dílny HEC.

5.1.1. Analýza transportu sedimentů v programu HEC - RAS

Model pro transport sedimentů je navržen tak, aby simuloval změnu geometrie koryta (vymílání či ukládání), určení stability koryta, průtok splavenin apod.

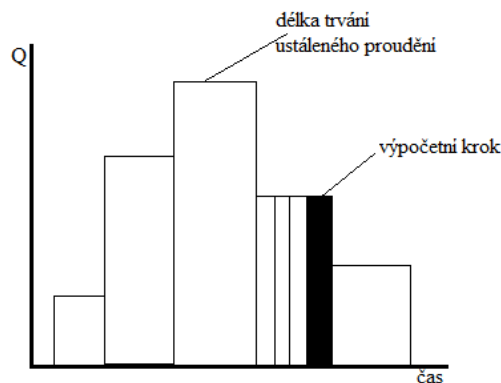
K vytvoření modelu a následné analýze transportu sedimentů v programu HEC- RAS, jsou vyžadovány následující soubory (obr. 12):



Obrázek 12 - potřebné soubory k analýze transportu sedimentů v HEC-RAS

- soubor geometrie koryta (Geometry file; *.g0x) – zahrnuje schematizaci říční sítě, příčné profily včetně inundace a struktury na toku, které charakterizují koryto. Jedná se o základní prvek modelu.
- soubor quasi-neustálého proudění (Quasi-unsteady file, *.q0x) – jedná se o speciální soubor, který je vázán k výpočtu transportu sedimentů. V tomto souboru se stanovují okrajové podmínky proudění, kde nejdůležitější jsou vnější okrajové podmínky. Jedná se o horní okrajovou podmínku popsanou časovou řadou průtoků (*Flow series*) a dolní okrajovou podmínku, která může být popsána časovou řadou hloubek (*Stage time series*), konsumpční křivkou (*Rating curve*) či normální hloubkou či sklonem hladiny (*Normal depth*). Vnitřní okrajové podmínky nejsou nutné, ale mohou být stanoveny pomocí boční časové řady průtoků (*Lateral flow series*) či rovnoměrné boční časové řady průtoků (*Uniform lateral flow series*).

Quasi-neustálé proudění je založeno na aproximaci série ustáleného proudění, kdy délka ustáleného proudění (*flow duration*) je rozdělena do několika výpočetních kroků - *computation increment* (obr. 12).



Obrázek 13 - výpočetní schéma quasi-neustáleného proudění (Brunner, 2010a)

Zavedení výpočetních kroků je založeno na předpokladu, že změna geometrie dna mezi výpočty hydraulických parametrů není dostačující. Proto podle velikosti proudění se zvolí vhodný počet výpočetních kroků, kdy dojde k přepočítání geometrie dna. Při nízkých hodnotách průtoků není potřebné mnoho výpočetních kroků, ale při vyšších průtocích je lepší stanovit menší časové kroky, kdy může docházet k častým změnám koryta. Menší časové kroky vedou k větší stabilitě modelu, i když výpočetní čas bude delší (Brunner, 2010b).

- soubor sedimentů (Sediment file, *.s0x) – v tomto souboru se stanovují potřebné hodnoty týkající se sedimentů. Vkládají se okrajové podmínky množství sedimentů a parametry k určení transportu sedimentů.

Parametry popisující transport sedimentů (obr.14) jsou:

Transport Function:	Meyer Peter Muller	Define/Edit Bed Gradation ...
Sorting Method:	Exner 5	
Fall Velocity Method:	Van Rijn	

Obrázek 14 - parametry popisující transport sedimentů

Výpočetní funkce (*transport function*):

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| 1. Ackers – White | 2. Engelund – Hansen |
| 3. Laursen (Copeland) | 4. Mayer – Peter Müller |
| 5. Toffaleti | 6. Yang |
| 7. Wilcock | |

Výběr funkce je důležitý a na něm závisí i výsledky modelu. Každá má okrajové podmínky (tab.6). Většinou jde o průměr zrna (d), hloubku (h), sklon dna (i), rychlost (v) atd. (Brunner, 2010b).

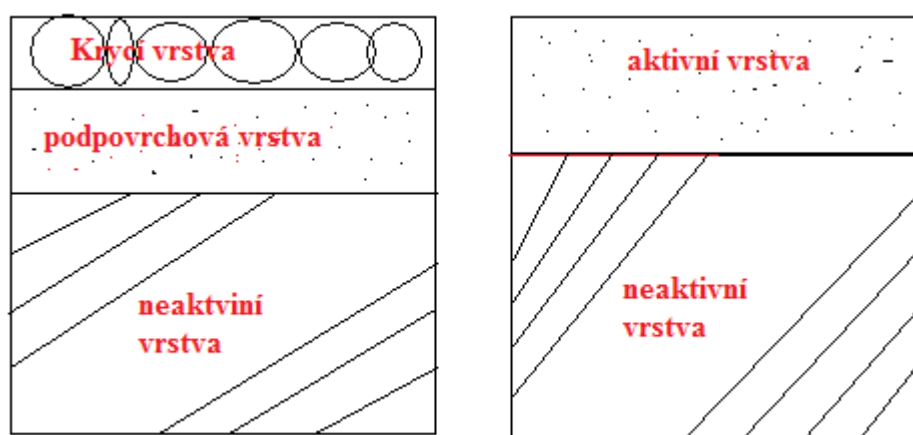
Autor rovnice	d_e		d		v		h		i	
	[mm]		[mm]		[m/s]		[m]		[-]	
Ackers-White	0,04	7	NA	NA	0,021	2,164	0,003	0,427	0,00006	0,037
Englund-Hansen	NA	NA	0,19	0,93	0,198	1,932	0,058	0,405	0,000055	0,019
Laursen (Copeland)	NA	NA	0,011	29	0,021	2,865	0,009	16,459	0,0000021	0,0018
Meyer-Peter-Müller	0,4	29	NA	NA	0,366	2,865	0,009	1,189	0,0004	0,020
Tofaletti	0,062	4	0,095	0,91	0,213	2,377	0,021	17,282	0,000002	0,019
Yang	0,15	7	NA	NA	0,244	1,951	0,012	15,240	0,000043	0,029
Wilcock	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabulka 6 - okrajové podmínky funkcí (Brunner, 2010b)

- Metody třídění zrn (*Sorting method*):**

K výběru jsou dvě možnosti a to třívrstvý model dna EXNER 5, kde je řešeno vymílání a ukládání v krycí vrstvě, druhou možností je dvouvrstvý model AKTIVNÍ VRSTVY, kdy je použití omezeno pro šterkové dno (Brunner, 2010b).

Vymílání a zanášení se realizuje fyzikálně jiným způsobem. Zanášení závisí především na usazovací rychlosti zrn, kdežto vymílání závisí na vzájemné interakci usazených zrn s proudem (Zachoval, 2009).



Obrázek 15 - model třídění zrn EXNER 5 a model AKTIVNÍ VRSTVY (Brunner, 2010a)

- **Sedimentační rychlost (*fall velocity method*):**

K výběru je několik metod, pro výpočet sedimentační rychlosti. První vztah týkající se sedimentační rychlosti je RUBYho přístup (1933), který je založen na kombinaci Stokesovy rovnice (jemné materiály) a impaktní formule (velké částice mimo Stokesu) (popsáno v kapitole 2.7).

Druhým vztahem je TOFFALETIho přístup (1968), který vytvořil tabulku rychlostí závislých na teplotě a velikosti částice, kdy tvarový součinitel zrna je 0,9 a měrná tíha částice (γ) rovnající se $2,65 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$.

Třetím vztahem je přístup VAN RIJNa (1993), který aproximoval křivky pro sedimentační rychlosti pro částice, které mají tvarový součinitel 0,7 a stanovil tři rovnice, které jsou závislé na průměru zrna (d).

Poslední možností je REPORT 12, který je podobný přístupu Van Rijna. Používá sedimentační rychlost k výpočtu nového Re čísla a následně znovu počítá sedimentační rychlost, dokud nebude rychlost v dané toleranci (Brunner, 2010a).

- **Zrnitostní složení a limity eroze a vymílání:**

Každý příčný profil musí být spojen se vzorkem zrnitostního složení dnových splavenin. Jeden vzorek zrnitostního složení může být spojen s několika příčnými profily nebo mohou být vzorky interpolovány mezi příčnými profily.

Vzorky zrnitostního složení (*Define/edit bed Gradation...*) se vytvářejí, vložením procentuálního zastoupení příslušné zrnitostní třídy. V HEC-RAS je definováno 20 zrnitostních tříd, které si může uživatel podle potřeb změnit (Brunner, 2010b).

U každého příčného profilu je nutné nastavit boční limity pro erozi a vymílání, maximální hloubku či minimální nadmořskou výšku. Jedná se o limity, kam až může docházet k erozi či ukládání (Brunner, 2010b).

Okrajové podmínky:

Určují množství přítoku sedimentů do systému. Horní okrajová podmínka je nejdůležitější a program staničení nastaví automaticky. Další okrajové podmínky mohou být stanoveny přidáním profilů pomocí tlačítka *Add boundary location* (Brunner, 2010b).

Stanovení okrajových podmínek může být určeno následovně:

Equilibrium load – program počítá pro každý časový krok kapacitu transportu sedimentů, jako přítok splavenin. V daném profilu nedochází k vymílání či usazování. Tato podmínka může být stanovena pouze na horní okrajové podmínce.

Rating curve – určení přítoku splavenin na základě přítoku tekutiny.

Sediment load series – zahrnuje v sobě Rating curve a časovou sérii přítoku sedimentů (Brunner, 2010b).

- soubor k výpočtu (plan file, *.p0x) - v tomto souboru se stanovují různé podmínky a tolerance, jak bude probíhat výpočet a jak by měly vypadat výstupy.

5.2. Příprava dat a vizualizace výsledků

Příprava dat či vizualizace výsledků nemusí probíhat pouze v rámci programu HEC-RAS. Do programu lze importovat data z programů GIS či CAD. Jedná se většinou o 3D schematizaci. HEC-RAS používá k výpočtům pouze 2D data, informace nesoucí třetí rozměr jsou použité až k zobrazení výsledků. Výsledky výpočtů lze exportovat zpět do GIS či CAD a dále zobrazit např. záplavové oblasti, rozdělení rychlostí a tečné napětí.

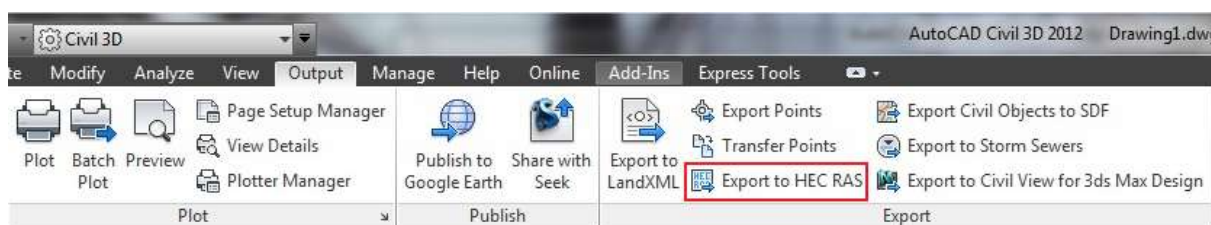
Jedná se o extenze do programů, které si lze stáhnout a po instalaci je používat. Existuje řada volně dostupných programů podporujících GIS/CAD (např. GIS GRASS...). Vyvinuté extenze jsou, ale podporovány komerčními programy. Jedná se ArcGIS od firmy ESRI a programy od firmy Autodesk.

5.2.1. CAD

Produkty firmy Autodesk podporující import a export dat z/do HEC-RAS jsou AutoCAD Civil 3D a AutoCAD Map 3D. Tyto programy v sobě zahrnují import/export nebo si uživatel může stáhnout extenzi, ve které může provádět další úpravy, analýzy a vizualizace dat.

K práci v AutoCAD Civil 3D/ AutoCAD Map 3D lze použít tyto nástroje:

Import a export HEC-RAS – součástí programů od verze Civil 3D 2011 (obr.16)

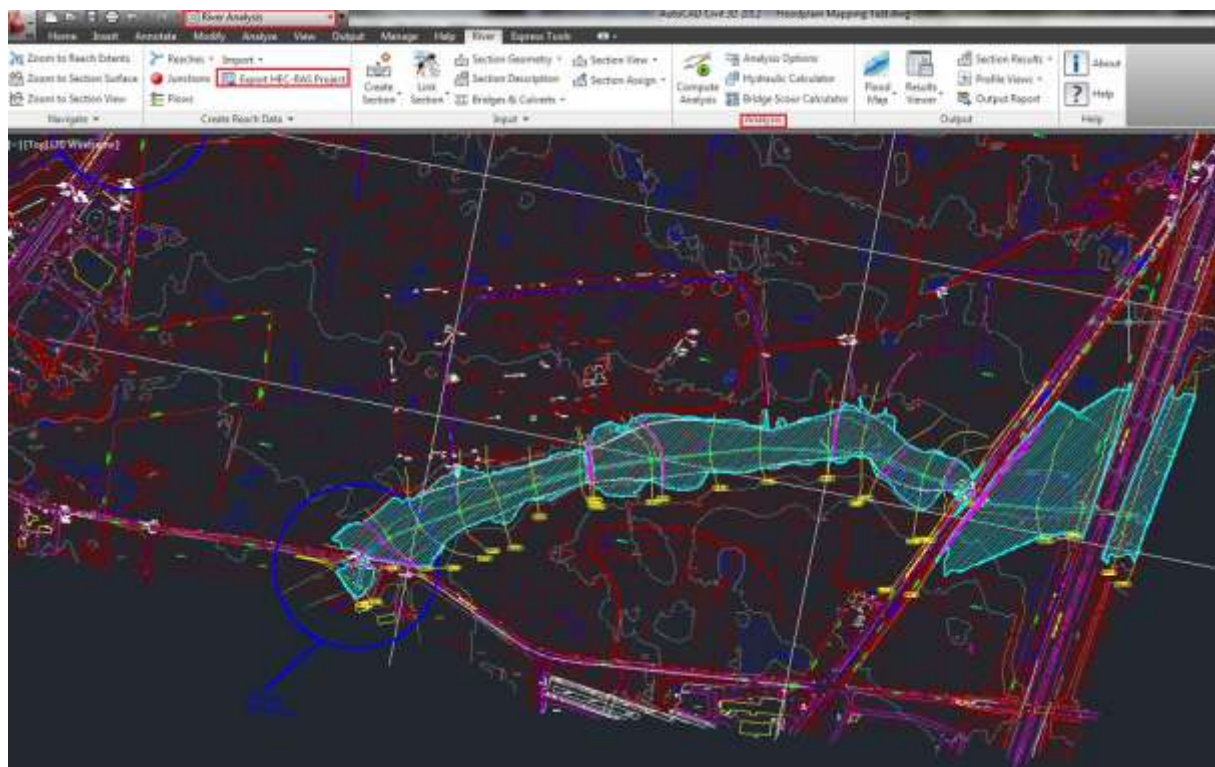


Obrázek 16 - export vytvořeného souboru z AutoCADu Civil 3D do HEC - RAS

Návod jak lze pracovat v AutoCADu Civil 3D 2011, popsal Andy Carter (2011) z Texaského institutu Halff Associates z oddělení Texas Water Resources Department. Pracuje v programu AutoCAD Civil 3D 2011 a jako terénní podklad používá soubor LiDAR (jedná se o snímání terénu, které je zobrazeno mračnem bodů; soubor má koncovku *.las).

Manuál i s podrobnými video ukázkami a zkušebními daty jsou dostupné na: http://au.autodesk.com/?nd=event_class&jid=1727888&session_id=9109. Popisuje, jak lze vytvořit koryto, příčné profily, exportovat do HEC – RAS, práci v RAS Mapperu (GIS nástroj v programu HEC – RAS) a zobrazení záplavové oblasti opět v AutoCADu Civil 3D 2011.

River Analysis – tato extenze není automaticky součástí a pokud by ji chtěl uživatel použít, musí si ji stáhnout (http://labs.autodesk.com/utilities/civil3d_river). Dříve tato extenze nesla jméno RiverCAD a byla vyvíjena firmou BOSS INT. K přejmenování došlo po odkoupení práv. Jedná se o pokročilou podporu pro říční modelování v HEC –RAS (obr.17).



Obrázek 17 - River Analysis a ukázka dat z AutoCAD Civil 3D 2012

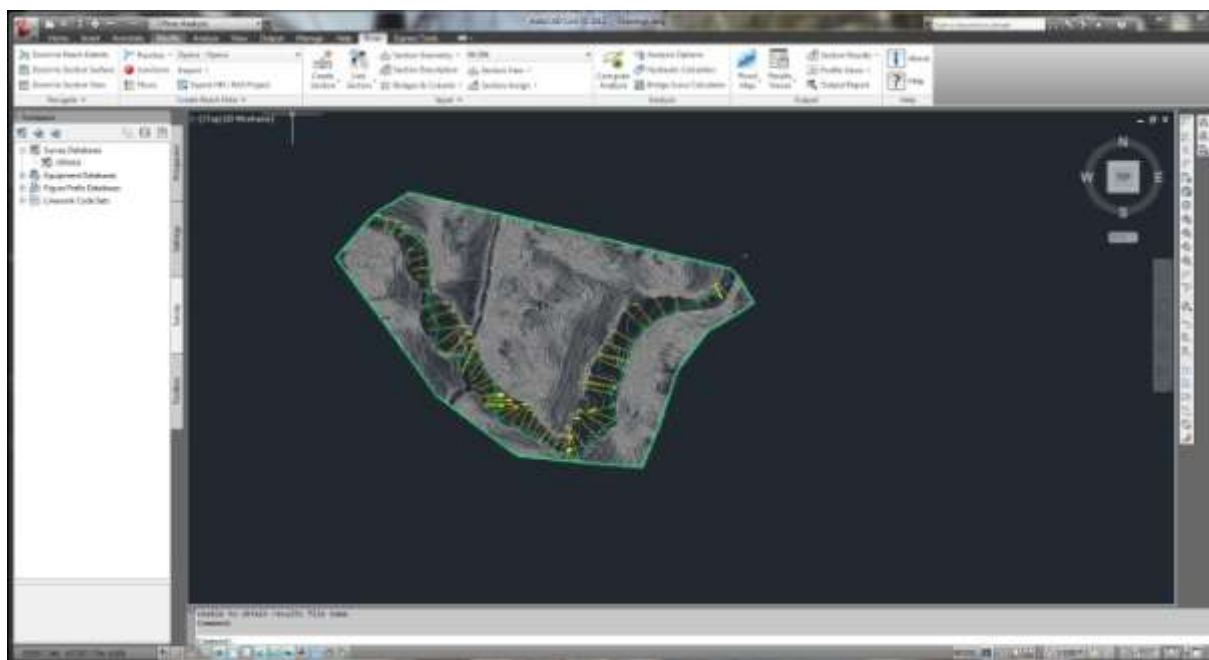
Autoři této extenze uvádí následující funkce:

- tvorba příčných profilů, provádění analýzy, zobrazování záplavové oblasti atd.
- HEC–RAS může počítat některé výpočty v bezproblémově v rámci výkresu AC3D/AM3D
- podpora různých formátů modelů terénu (3D digitální vrstevnice, TIN, DTM, DEM, LiDAR, data z terénu, ...) pro získání příčných profilů apod.
- import dat z HEC–RAS
- vytvoření staničení břehů, zahrne různá místa (ineffective areas, obstructions, levees,...),
- z topografických map lze získat Manningův součinitel drsnosti
- lze provádět analýzu mostů a propustků

- vytváří povodňové mapy (v Americe je lze exportovat do předpovědní služby povodní FEMA)
- podporuje US i metrické (SI) jednotky
- prostředí by mělo být uživatelsky přívětivé a jednoduché k naučení bez předchozích zkušeností s programy AutoCAD. (AutoDesk 2011)

Extenze je stále ve vývoji a do verzí programů 2012 si lze stáhnout pouze do června 2013. Předpokládá se, že bude nadále vyvíjena tak, aby byla stálou součástí programu od verze 2014.

V rámci diplomové práce jsem River Analysis vyzkoušela v prostředí AutoCad Civil 3D 2012. Nahrála jsem vrstevnice (*Insert->Survey data->Make Survey from GIS data*) a terénní data (*River->Import->HEC-RAS data*) z programu HEC –RAS (viz Obrázek 18). Zobrazování výsledků a analýzy v programu nebyly prováděny.



Obrázek 18 - ukázka nahrání některých poskytnutých dat přes River Analysis do AutoCAD Civil 3D

5.2.2. GIS

Pro prostředí programu ArcGIS for Desktop 10.1 je samotným U.S. Army už déle vytvářena extenze HEC–geoRAS. Tato extenze je dostupná ke stažení na stránkách U.S. Army Extenzi lze stáhnout i pro nejnovější ArcGIS 10.1.

V rámci přípravy dat v ArcMapu s HEC-GeoRAS můžeme získat geometrii koryta (podélný profil, příčné profily, břehy, proudnici atd.) a parametry modelu (drsnostní

součinitele). Výsledky z modelu mohou být zpět importovány, kde lze provádět další analýzy (záplavová území, rozložení rychlostí).

V rámci diplomové práce jsou poskytnutá data zpracována v ArcMapu za podpory HEC-GeoRAS. Jak se extenzí pracuje je popsáno v následujících kapitolách (viz. kap. 6.2.2 a 7.2) a přílohách 3 a 6.

6. Metodika

Tato část diplomové práce je zaměřena na sestavení modelu a možnosti extenze HEC- geoRAS při vytváření modelu a následné vizualizaci výsledků (pre- a post- procesing). Popisu vlastního sestavení modelu předchází popis zájmového území řeky Opavy a potřebných dat pro sestavení modelu v úseku ř. km 93,461 - ř. km 84,506.

6.1. Popis zájmového území

6.1.1. Informace o toku

Řeka Opava vzniká soutokem tří toků (Černá, Střední a Bílá Opava) pramenících na svazích Hrubého Jeseníku. Stékajících se u Vrbna pod Pradědem. Řeka ústí do řeky Odry u Ostravy (obr. 19). Délka toku je 109,3 km s plochou povodí 2088,8 km² a průměrným ročním průtokem 15,01 m³·s⁻¹ (Povodí Odry, 2012b). Řeka spadá do povodí Odry.

Horní část toku po Vrbno pod Pradědem protéká zalesněným územím. Dále řeka prochází malými a většími sídly. V extravilánu je krajina kolem řeky většinou zemědělsky využívaná. Nejvýznamnější sídla na toku jsou Krnov, Opava a okrajově Ostrava (Povodí Odry, 2012b).

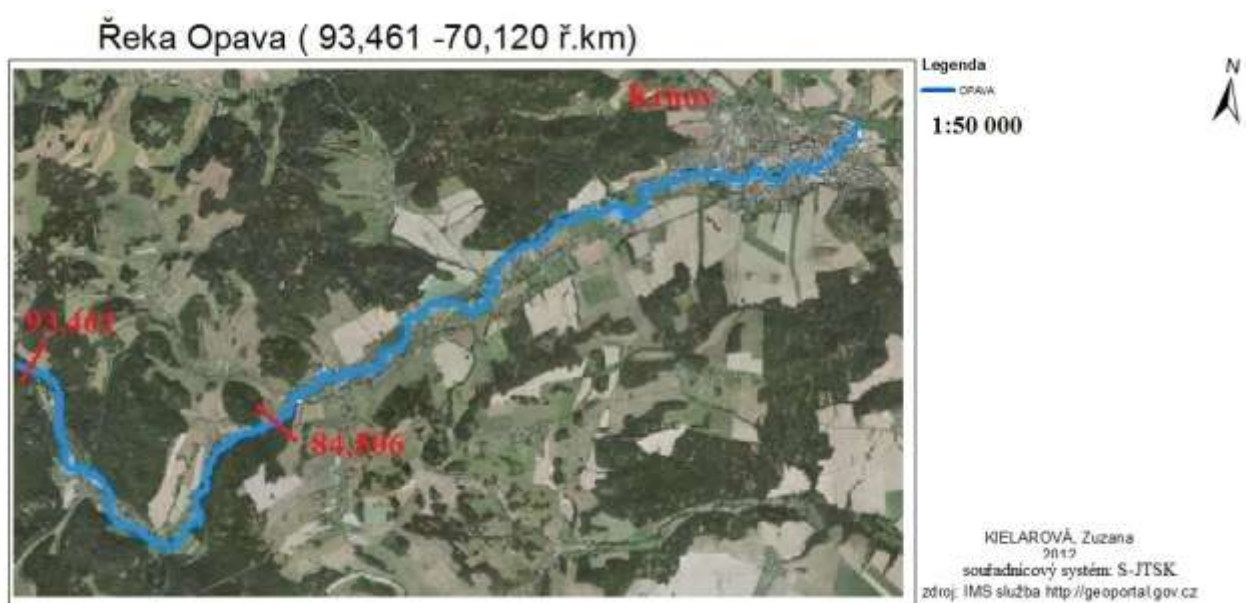
Průtoky na řece nejsou významně ovlivňovány užíváním vody (odběry či vypouštěním odpadních vod). Mezi hlavní přítoky Opavy patří Opavice, Čížina a Moravice. (Povodí Odry, 2012b).

Celá řeka Opava patří do správy Povodí Odry s.p., kromě horní části Černé Opavy, kterou spravují Lesy České republiky s.p.



Obrázek 19 - řeka Opava – v celém rozsahu (Kubačka J., Kubačka M., 2009)

Vybraný úsek toku pro model se nachází v horní části řeky Opavy 93,461 - 84,506 ř. km (obr. 15). Povodí Opavy je rozděleno do 6 -ti vodních útvarů. Podle průvodního listu od Povodí Odry (Povodí Odry, 2007a) spadá do části: Opava po soutok s tokem Opavice.
Soutok Opavy



a Opavice je v Krnově.

Obrázek 20 - zájmová část území v širším vztahu okolí (zdroj:autor na podkladech Geoportalu, 2010)

Základní charakteristiky toku podle průvodního listu Povodí Odry (Povodí Odry, 2007a):

Pracovní číslo VÚ: 25/CZ

Číslo hydrologického povodí: 2-02-01-038

Nadmořská výška: 200 – 500 m.n.m

Plocha dílčího povodí: 370,82 km²

Staničení toku: 69,0 – 95,0 ř.km

6.1.2. Klimatické poměry

Dle Quitta (1971) leží zájmová oblast na rozhraní dvou klimatických oblastí MT2 (mírně teplá oblast) a CH7 (chladná oblast).

Pro obě oblasti je typické krátké, mírně chladné a mírně vlhké léto. Zima je delší s menší sněhovou pokrývkou. Přechodná období v oblasti CH7 jsou dlouhá a chladná a v MT2 s mírným jarem i podzimem (Quitt, 1971). Další charakteristiky daných oblastí jsou popsány v Tabulka 7a mapa oblasti je uvedena v příloze 1.

PARAMETRY	MT 2	CH 7
Počet letních dnů	20 - 30	10 - 30
Počet dnů s průměrnou teplotou 10°C a více	140 - 160	120 - 140
Počet mrazových dnů	110 - 130	140 - 160
Počet ledových dnů	40 - 50	50 - 60
Průměrná teplota v lednu	-3°C - -4°C	-3°C - -4°C
Průměrná teplota v dubnu	6°C - 7°C	4°C - 6°C
Průměrná teplota v červenci	16°C - 17°C	15°C - 16°C
Průměrná teplota v říjnu	6°C - 7°C	6°C - 7°C
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více	120 - 130	120 - 130
Srážkový úhrn ve vegetačním období	450 - 500 mm	500 - 600 mm
Srážkový úhrn v zimním období	250 - 300 mm	350 - 400 mm
Počet dnů se sněhovou pokrývkou	80 - 100	100 - 120
Počet dnů zamračených	150 - 160	150 - 160
Počet dnů jasných	40 - 50	40 - 50

Tabulka 7 - charakteristika klimatických oblastí (Quitt, 1971)

6.1.3. Geomorfologie, Geologie, Hydrogeologie a půdní poměry

a) Geomorfologie

Systém: Hercynský

Provincie: Česká vysočina

Subprovincie: Krkonošsko – jesenická soustava

Oblast: Jesenická

Celek: Nízký Jeseník

Podcelek: Brantická vrchovina; Bruntálská vrchovina

Okres: Krasovská vrchovina; Rázovská vrchovina a Světlohorská vrchovina
(Geoportal, 2010)

b) Geologie a hydrogeologie

Z pohledu geologie se území nachází v Českém masívu v Moravskoslezské oblasti a v jednotce Moravsko-slezský spodní karbon (kulm). Nacházejí se zde paleozoické horniny zvrásněné metamorfované (břidlice, droby, kvarcity, vápence) a kvartér (hlíny, sprašové hlíny, písky a štěrky) (Geoportal, 2010). V oblasti by měly hlavně převažovat černé jílové břidlice (Landa, 2007). Mapa geologického území je uvedena v příloze č. 1.

Hydrogeologicky je oblast deficitní. Propustnost je průlinově - puklinová. Hladina podzemní vody je často hlubší než 30 m (Landa, 2007).

Z hlediska hydrogeologických rajónů spadá do rajónu Kulm Nízkého Jeseníku (6611). Oblast kolem Krnova spadá do rajónu Kvartér Opavy (1520) (HEIS VÚV, 2002).

c) Půdní poměry

V oblasti jsou zastoupeny z půdních druhů hlíny písčitohlinité a hlinité. Z půdních typů to jsou kambizemě, fluvizemě, organozemě a gleje (Geoportal, 2010). Mapa je uvedena v příloze č.1.

6.1.4. Hydrologické poměry

Na Krnovsku dosahuje průměrný úhrn srážek 550-700 mm, sklon dna řeky Opavy je v daném úseku 5 ‰ a průměrný specifický průtok se pohybuje mezi 5 - 10 l·s⁻¹·km⁻² (Povodí Odry s. p., 2007b).

N-leté průtoky a M-denní průtoky jsou uvedeny v následující Tabulka 8:

Tabulka 8 – M –denní a N-leté průtoky (povodí Odry s.p. 2007a)

Hydrologické charakteristiky uzávěrného profilu	N-leté průtoky	Q ₁	Q ₂	Q ₅	Q ₁₀	Q ₂₀	Q ₅₀	Q ₁₀₀
	m ³ /s	24.9	41.1	69.8	97.0	129	180	225
	ovlivněné N-leté							
Q _s m ³ /s	M-denní průtoky	Q _{30d}	Q _{90d}	Q _{180d}	Q _{270d}	Q _{330d}	Q _{355d}	Q _{364d}
	m ³ /s	9.69	5.35	3.08	1.83	1.12	0.738	0.467

6.2. Sestavení modelu

6.2.1. DATA

Data potřebná pro sestavení modelu v HEC – RAS byla poskytnuta státním podnikem Povodí Odry:

- příčné profily koryta řeky od staničení 93,461 -70,120 ř.km
- zaměřené body koryta
- součinitel drsnosti (u příčných řezů)
- průtoky umělé roční povodňové vlny
- zrnitostní složení dna řeky Opavy (5 vzorků, použity 3)

Pro pre- a post- procesing v programu ArcGIS s extenzí HEC-GeoRAS a hlavně k vytvoření vhodného digitálního modelu terénu (DTM, formát TIN) byla získána data vrstevnic a grid 10x10 m od ČÚZK. Jedná se kladky listů 15-31-03 a 15-31-04.

Další pomocná data byla stažena z dostupných webových stránek. Pro model byly použity *.shp vrstvy vytvořené v rámci projektu DIBAVOD (<http://www.dibavod.cz/>).

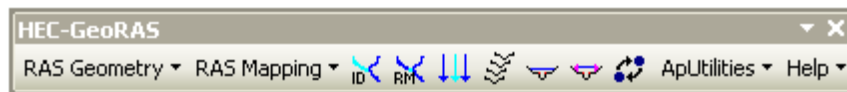
6.2.2. Práce v programu ArcGIS

Před samotným vytvářením vstupních dat do programu HEC–RAS v extenzi HEC-GeoRAS je zapotřebí vytvořit digitální model terénu (DTM ve formátu TIN). Ten je nutný proto, aby mohly být odečteny nadmořské výšky např. při vytváření příčných profilů. Je tedy potřebné, aby byl model terénu v okolí řeky byl co nejpřesnější v okolí řeky.

Digitální model terénu (DTM ve formátu TIN) zájmového území byl vytvořen z vrstev vrstevnic, gridu 10x10 a zaměřených bodů koryta. Mapka vytvořeného modelu terénu je v příloze 2. HEC-GeoRAS podporuje dva formáty digitálního modelu terénu GRID nebo TIN.

Po vytvoření TINu lze přistoupit k vytvoření dat pomocí HEC-GeoRAS, které se budou exportovat z ArcGIS do HEC–RAS. Pro potřeby HEC-RAS musí být minimálně vytvořena vrstva středové linie toku a příčné řezy. Pro další analýzy je vhodné přidat i další vrstvy (např. břehové linie).

Lišta HEC–GeoRAS (obr.16) obsahuje nástroje pro přípravu dat (*RAS Geometry*), nástroje pro analýzu dat (*RAS Mapping*) a pro úpravu formátu dat (*ApUtilities*).



Obrázek 21 - lišta HEC - GeoRAS v ArcGIS (zdroj: autor)

V záložce *RAS Geometry* -> *Create RAS Layers* byly vytvořeny vrstvy: středové linie toku (*Stream Centerline*), břehy toku (*Bank Lines*), proudnice (*Flow Path Centerlines*) a příčné profily (*XS Cut Lines*). Jedná se o nejdůležitější vrstvy, které by měly být vytvořeny. V příloze č. 3 je detailnější popis, jak se tyto vrstvy vytvářejí.

Vše se ukládá do databáze (OPAVA.mdb), která má stejné jméno jako mapový dokument (Opava.mxd). Vrstvy databáze lze vytvořit najednou a postupně je vyplňovat potřebnými daty anebo postupně přidávat. V rámci přípravy dat nebyly vloženy všechny vrstvy.. Počet vrstev závisí na dostupných podkladech. Pokud by byla dostupná vrstva Landuse, tak lze pomocí ní lze vygenerovat Manningův součinitel drsnosti (n). Díky leteckému snímku či ortofotomapy lze stanovit různá území: např. *ineffective areas* - program počítá, že je v těchto místech proudění nulové dokud se tam nedostane voda (následně už je tato část profilu zahrnuta do výpočtu), *obstructions* - území, které voda obtéká či hráze (*leeves*) a další.

Jakmile jsou vytvořena potřebná data (linie řeky, břehy, flowpaths a příčné profily) lze je vyexportovat do souboru *OPAVA.RASimport.sdf*. Tento připravený soubor je již možné importovat do HEC-RASu.

6.2.3. MODEL

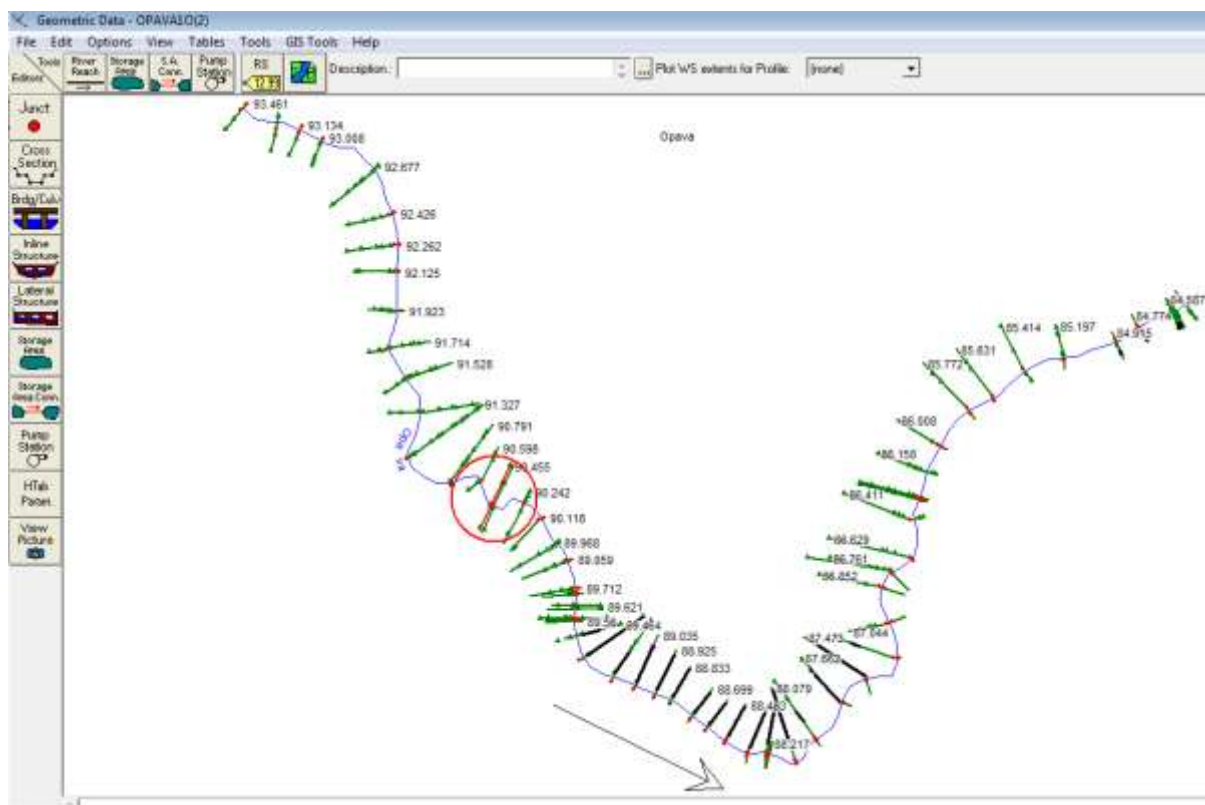
Do programu HEC-RAS se postupně vkládají potřebné soubory pro danou analýzu. Soubory nutné pro analýzu transportu sedimentů jsou popsány v kapitole 5.1.1. Všechny části jsou součástí projektu (*OPAVA10.prj*).

Jelikož se jedná o americký program jako výchozí nastavení jednotkového systému je US Customary. Změnu jednotkového systému lze provést v záložce *Options*-> *Unit systems* na SI jednotkový systém. Dalším upozorněním pro práci s programem HEC-RAS je, že desetinná místa oddělují tečkou a ne čárkou. Změna tohoto parametru se může provést v místním nastavení počítače.

Vkládání dat

K vytvoření analýzy sedimentů musí být nejdříve vyplněny všechny potřebné soubory, ze kterých pak program používá data.

Geometrický soubor je nejdůležitější soubor pro jakýkoliv model. Geometrická data se mohou vkládat ručně či importovat z formátů GIS či CAD. Při vytváření projektu byla k importu použita data vytvořená pomocí extenze HEC-GeoRAS. Před importem dat je nutno nový *Geometry file* uložit (OPAVA10.g01). Import dat se provede následovně: *File -> import Geometry data -> GIS format*. Po té je potřeba nalézt importovaný soubor (OPAVA.RASimport.sdf) a nastavit požadované parametry v nabízených podkonech. Výsledek vkládání konkrétních dat je patrný z Obrázek 22. Importované příčné profily byly dále ještě ručně doopraveny podle poskytnutých příčných řezů a zároveň byl zadán součinitel drsnosti.



Obrázek 22 - Geometrie řeky (zdroj:autor)

Dalším krokem po ukončení editací v geometrickém souboru je na řadě vložení dat do souboru *QUASI – UNSTEADY FILE*. Je nutné stanovit horní i dolní okrajovou podmínku proudění. Horní okrajová podmínka je popsána časovou řadou průtoků (*flow series*). Byla vložena uměle vytvořená roční povodňová vlna s přibližným kulminačním průtokem Q_{50} (Obrázek 23) po dobu 15-ti let. Na obrázku je zobrazeno délka trvání daného průtoku. Dolní okrajová podmínka je popsána pomocí sklonu dna (*Normal Depth*) s hodnotou $i=0,00463$.

Flow	Computation	
Duration	Increment	Flow
(hours)	(hours)	(m3/s)
24	24	3.16
660	660	0.815
720	720	1.61
720	720	2.68
720	720	4.98
180	180	11.042
18	18	26.66
1.8	1.8	63.641
0.36	0.36	153.368
0.48	0.48	117.691
0.96	0.96	82.933
4.8	4.8	48.836
9.6	9.6	34.414
48	48	20.122
96	96	14.093
240	240	8.427
480	480	7.05
720	720	3.91
720	720	3.2
720	720	2.26
720	720	1.91
720	720	1.34
720	720	1.08
408	408	0.537
132	132	0.335

Obrázek 23-Umělá povodňová vlna (zdroj:povodí Odry s.p.)

Jelikož dochází k ovlivňování průtoků Opavy i přítoky malých toků, byly vloženy podobné povodňové vlny (*Lateral flow series*) ke čtyřem příčným profilům.

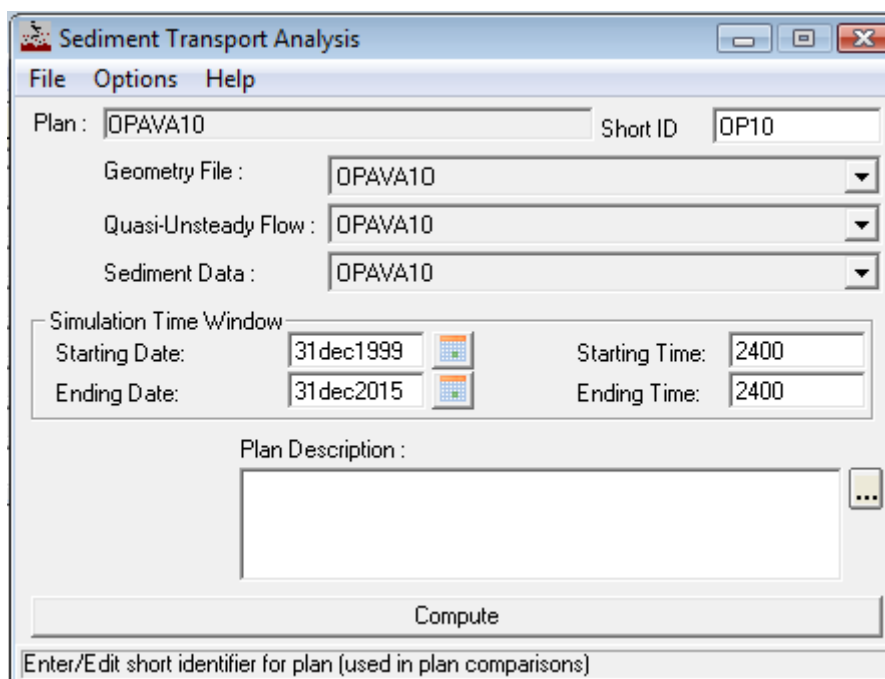
Poslední a důležitý soubor je *Sedimet file*. Ke každému příčnému profilu je nutné přiřadit zrnitostní složení. Tato zrnitostní charakterizace toku se provede tak, že se použijí údaje o zrnitostním složení několika vzorků dnových sedimentů a zbytek se interpoluje. Na vybrané části řeky byly použity údaje 3. vzorků, které dostatečně vystihovaly charakter zkoumané části toku. Na řece Opavě převládají štěrky s příměsí písku. V malém množství se vyskytuje jíl a prach. A jejich složení se rychle nemění.

Při vkládání zrnitostního složení vzorků do souboru bylo vytvořeno vlastní zrnitostní rozdělení s procentickým zastoupením jednotlivých složek (viz. příloha 4). Dále následuje přiřazení vytvořených zrnitostních vzorků k příčným profilům. U zbývajících vzorků byly data získány interpolací, jak je zmíněno v kapitole 5.1. Tento krok se provede tlačítkem *Interpolate gradation*.

Důležitý je výběr výpočetní funkce pro transport sedimentů. Jedná se o nejtěžší a nejdůležitější věc při vytváření takového modelu.

Nejvíce se svými okrajovými podmínkami (viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) na daném území blíží výpočetní funkce Mayer – Peter Müller, která patří mezi nejčastěji používané. Zbylé funkce (Englund –Hansen, Toffaletti, Ackers –White, Yang) byly vyřazeny, jelikož počítají s malým zrnitostním složením. Funkce (Laursen) byla vyřazena pro nízký sklon dna a funkce (Wilcock) pro nedostatek informací o podmínkách.

Po vyplnění všech potřebných parametrů pro výpočet modelu je nutné spustit analýzu pomocí - *Sediment transport analysis (plan file* (obr. 24).



Obrázek 24 - Plan file (zdroj:autor)

Před samotným spuštěním výpočtu je nutné nastavit časové rozmezí výpočtu. Zadává se ve formátu DEN:MĚSÍC:ROK a čas ve 24 hodinovém formátu (Obrázek 24). V záložce *Options* lze změnit výchozí koeficienty.

Ve výše uvedeném příkladu byl modelován vývoj koryta během 15-ti let se stále stejnou povodňovou vlnou. Pro zjištění, zda se stav koryta mění se jedná o dostatečně dlouhý časový úsek. Delší časový úsek byl zvolen proto, aby šlo posoudit vývoj koryta.

7. Výsledky

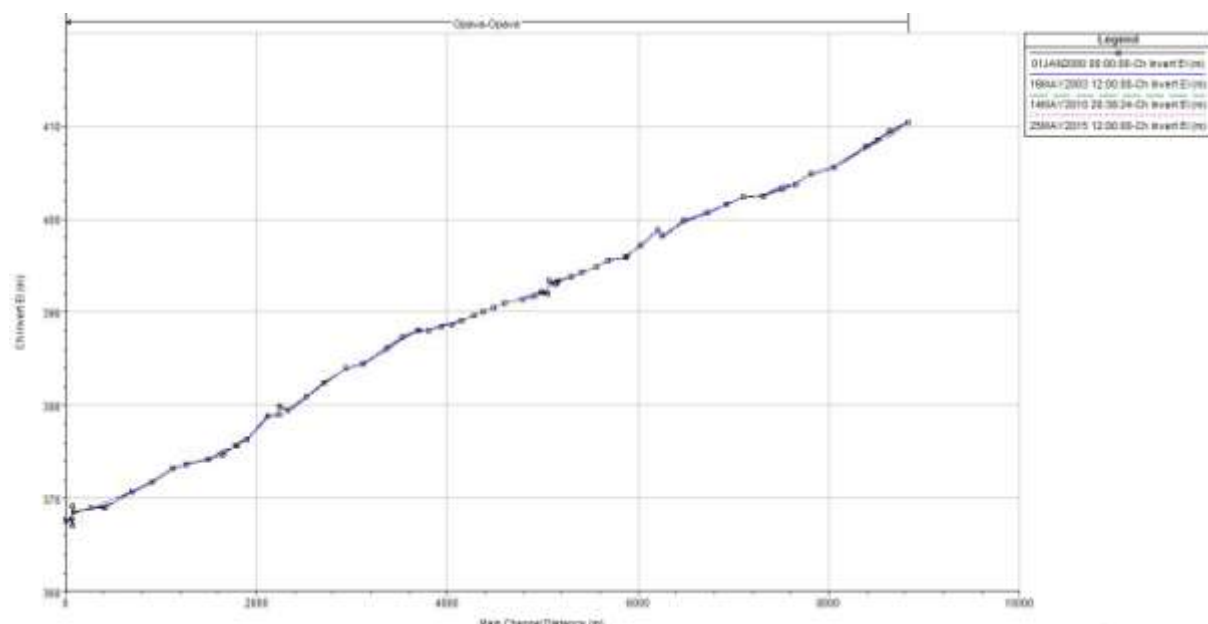
Jakmile je výpočet proveden lze vypočítané parametry modelu zobrazit v různých grafech a tabulkách, které na výsledky pohlížení z různých úhlů např. jak se koryto mění jako podélný profil či jako samostatné příčné profily. Dále lze také zobrazit stejné výsledky jako u ustáleného proudění (*Steady flow*) např. rozliv vody, konzumpční křivku atd. Do programu ArcGIS je také možné exportovat záplavová území.

7.1. HEC – RAS

Nejdůležitějším výsledkem je změna koryta během doby modelování a k jakým změnám dochází (vymílání či usazování sedimentů). Dochází k ovlivňování toku neustále či jen při větších průtocích?

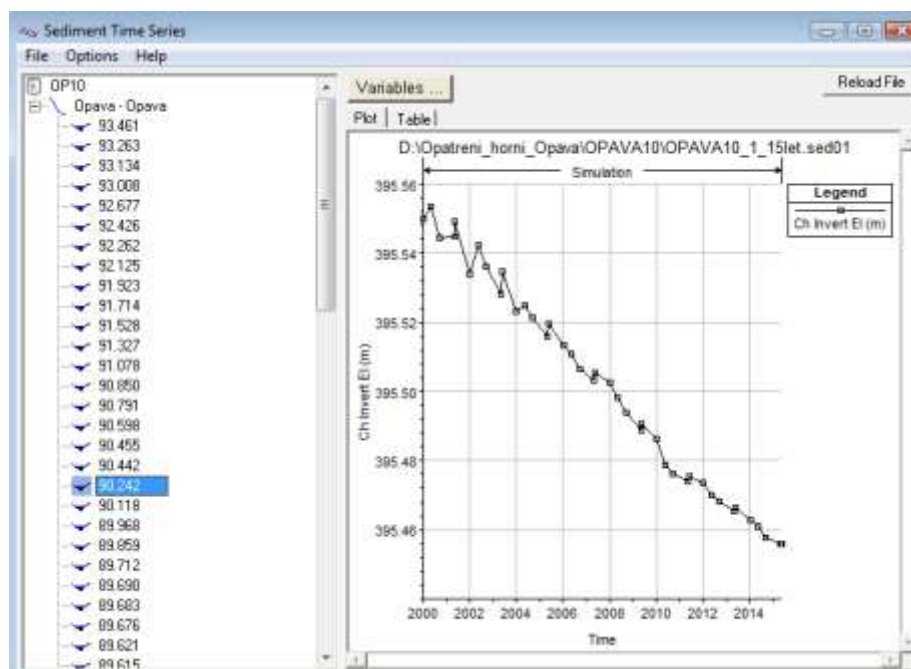
Výsledky k transportu sedimentů se mohou zobrazit třemi způsoby:

- *View -> Sediment spatial plot*. Jedná se o podélný profil. Jako základní profil je nastaven počáteční (původní) profil. K porovnání se musí v záložce *Profiles* zaškrtnout další podélné profily k porovnání. U sestaveného modelu bylo zvoleno porovnání po 5, 10 a 15 letech (Obrázek 25). Výsledky lze zobrazit v grafické formě jako podélný profil (*profile plot*) či barevně odlišený obrázek hloubek (*schematic plot*) či v tabulkové formě (*Table*).



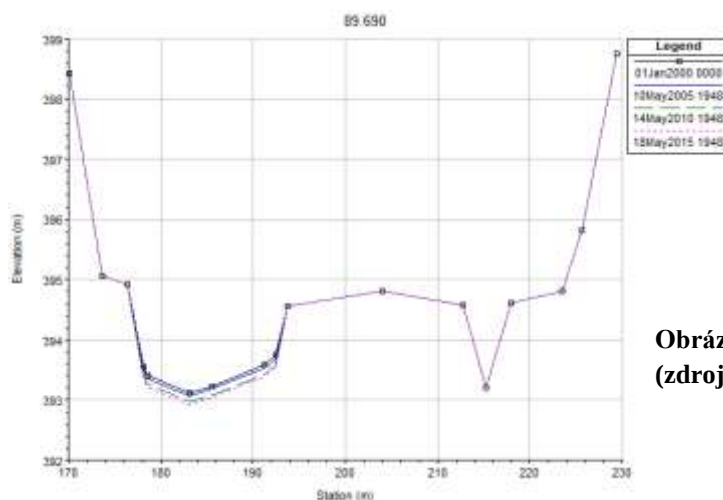
Obrázek 25 - podélný profil (zdroj: autor)

- View -> *Sediment time series plot*. Zde lze zobrazit v grafické či tabulkové formě změnu nadmořské výšky dna v průběhu celého mode modelovacího času (15 let) každého příčného profilu (Obrázek 26).



Obrázek 26 - změna dna v čase (zdroj: autor)

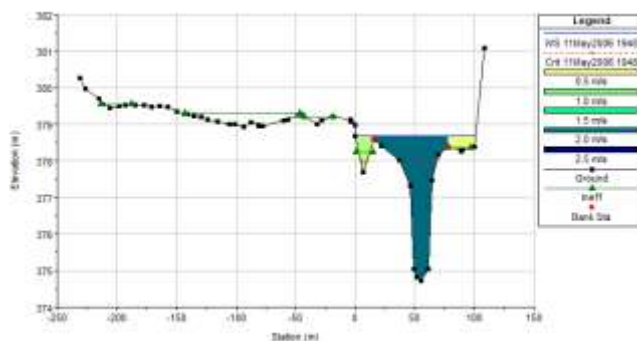
- View -> *Sediment – XS Bed Change Plot*. Jedná se o vykreslení celých příčných řezů a stejně jako u *Sediment spatial plot* je možné zvolit několik příčných profilů v čase k porovnání (Obrázek 27). Vypsát lze i tabulkové porovnání.



Obrázek 27 - změna příčného profilu (zdroj: autor)

Ze všech tří zobrazení (obr. 25-27) je zcela patrné, že dno je stabilní a mění se velmi pomalu. Největším změnám dochází během vyšších průtoků (Q_{20} a výše). I když přenosu sedimentů dochází, neovlivňuje to nijak rozliv vody mimo koryto.

Právě další výsledky mohou ukázat, jestli je ovlivněno záplavové území během transportu sedimentů. Jedná se o zobrazení stejných výstupů, jako např. u modelu ustáleného proudění. Jedná se o vyobrazení rozlivu vody mimo koryto v celé jeho délce či opět jen v příčných profilech. Také je zde možné zjistit například rychlostní složení v profilu (Obrázek 28) a další zajímavé doplňující informace. Právě tyto výsledky lze zobrazit např. v RAS Mapperu, GIS či CADu a porovnat.



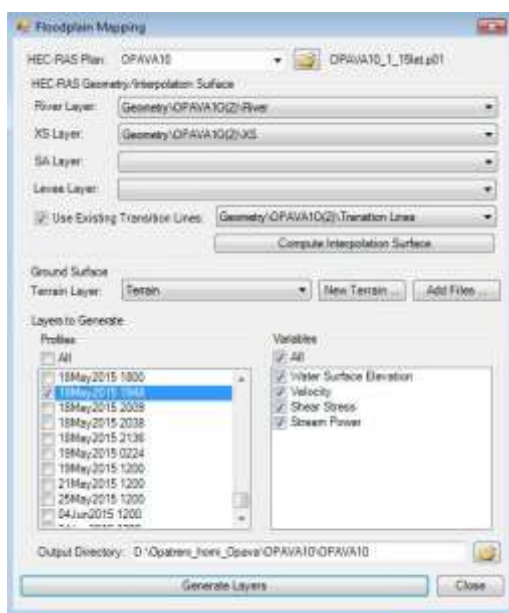
Obrázek 28 - rychlostní rozložení (zdroj: autor)

Zobrazení záplavových území v RASMapperu vyžaduje digitální model terénu ve formátu *.flt*. Dříve vytvořený TIN lze na tento formát lehce převést pomocí dvou nástrojů v *ArcToolBox*. Prvním krokem je vytvoření rastru (*3D Analyst->From TIN-> TIN to Raster*) a druhým je převedení na *float to raster*, což je požadovaný *.flt* formát (*Conversion tools-> To Raster -> Float To Raster*).

Zobrazení záplavových míst a dalších proměnných se v RASMapperu (*GIS Tools ->RAS Mapper*, v základní nabídce) provede zvolením *Tool->Floodplain mapping* (Obrázek 29). V zobrazovaném okně, je nutné nahrát model terénu ve formátu **.flt*. Následně je potřeba vybrat zobrazení profilů a proměnných veličin.

Záplavové území je jako jediné uloženo ve formátu **.shp*. Zbytek výsledků je uložen ve formátu **.flt*.

Výsledky záplavového území a rozložení rychlostí jsou uvedeny v příloze č. 5.



Obrázek 29 - Floodplain Mapping (zdroj:autor)

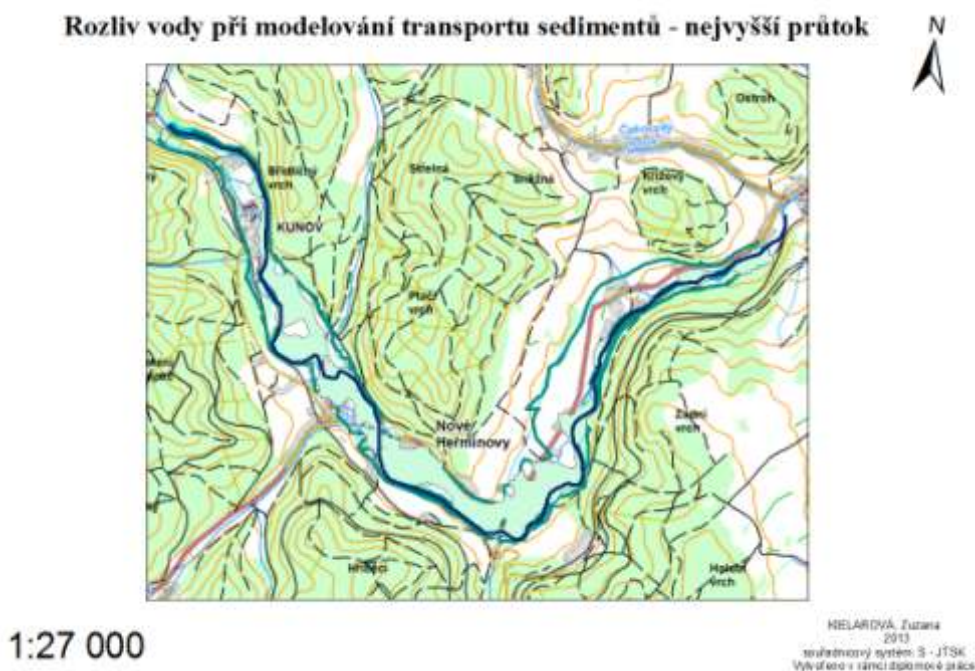
7.2. Vizualizace výsledků v programu ArcGIS

Další možností, jak lze zobrazit záplavové území a jiné proměnné je export výsledků do programu ArcGIS. Prvním krokem je export výsledků z programu HEC-RAS (*File -> Export GIS*) s koncovkou *RASexport.sdf*. Stejně jako v RASMapperu je vyžadováno vybrání profilů, které budou exportovány. Dále je možné zaškrtnout mnoho doplňujících hodnot k exportu.

Ve spuštěném a uloženém programu ArcMap je nejdůležitější převedení exportovaného souboru na *.xlm formát. Z tohoto formátu už lze načíst vyexportované hodnoty z HEC-RASu.

Následně už lze vytvářet záplavová území (*RAS Mapping->Inundation Mapping*), zobrazit rozložení rychlostí a další. Podkladem nemusí být jenom digitální model terénu, jak je tomu RASMapperu, ale lze použít například ortofotomapy či jiné mapové podklady.

Rozliv vody při modelování transportu sedimentů - nejvyšší průtok



Obrázek 30 - zobrazení rozlivu při nejvyšším průtoku během modelování transportu sedimentů (zdroj:autor)

8. DISKUZE

Práce měla teoretický cíl a dva cíle praktické. Teoretickým cílem bylo seznámení se s problematikou pohybu sedimentů v tocích, která je značně rozsáhlá. Praktické cíle byly použití prostředku GIS (ArcGIS) a vyzkoušení schopnosti podpory programu HEC-RAS a sestavení obecného modelu transport sedimentů v HEC-RAS na řece Opavě.

Pro lepší znalost a příjemnější uživatelské prostředí ke komunikaci s prostředkem HEC-RAS byl vybrán program ArcGIS s extenzí HEC-GeoRAS. Volba programu může záviset pouze na subjektivním pocitu. Příprava dat v ArcGIS proběhla velmi dobře. Přesnost vytvořených příčných profilů závisí na datech. I přesto je dobré mít nějaké příčné profily k porovnání a případnému upravení v HEC –RAS. Pro vytvoření přesného digitálního modelu terénu jsou důležité zaměřené body v korytě a v okolí.

Do programu HEC-RAS byly následně vloženy informace o proudění vody a zrnitostní složení dna ke každému profilu. Jelikož proudění vody vyžaduje časovou řadu průtoků, je vhodné vložit povodňovou vlnu, která bude mít v sobě zahrnut vyšší kulminační průtok (např. Q_{100}). Po vyplnění všech potřebných dat byl vypočítán model na období 15-ti let k posouzení změny koryta.

Doba 15-ti let byla vybrána jako dostatečně dlouhá doba, kdy by už mohlo dojít aspoň k malým změnám koryta. Při delších časových intervalech se samozřejmě prodlužuje i časový výpočet modelu. Model 15-ti let byl modelován okolo jedné hodiny. Na Obrázek 25 zásadní změny vidět nejsou, ale po zvětšení grafu či zobrazení specifického příčného profilu už změny lze pozorovat. Ani po patnácti letech nejsou změny zásadního charakteru, což svědčí o stabilním dně. Je to hlavně díky velkému zastoupení hrubších (štěrkových) částic.

Předpokládám, že u toků při větším zastoupení písčitých až prachovitých částic by dno a břehy byly vymílány více. Tím by se mohlo změnit např. záplavové území. V místech vymílání by se zmenšilo a v místech usazování zvětšilo. Změnami záplavového území (při jemnějším zrnitostním složení dna) a jeho zobrazování v GIS programech se ve svých pracích zabývali Mervade et al. (2008) a Sinnakaudan et al. (2003).

Právě změny v záplavových územích a hlavně samotná území se nejlépe zobrazují v nějakém jiném prostředku (např. GIS či CAD). Samotný HEC – RAS má v sobě implementovaný svůj nástroj GIS tzv. RASMapper. Lze v něm zobrazovat stejné výsledky,

jako při exportu do ArcGISu. V ArcGISu lze s vytvořenými vrstvami provádět další analýzy. Výsledky nemusí být zobrazeny jen na digitálním modelu terénu, jak je tomu u RASMapperu, ale i na dalších podkladech (např. ortofotomapy ...).

9. ZÁVĚR

Práce měla za úkol ověřit a vyzkoušet, jaké jsou možnosti přípravy a následně vizualizace dat v GIS či CAD prostředcích při matematickém modelování v programu HEC- RAS. Dalším úkolem bylo vytvořit obecnou metodiku pro modelování transportu sedimentů v otevřených korytech.

Podpora programových GIS či CAD má velký význam. Jak je v práci ukázáno. V rámci programu ArcGIS lze vytvářet geometrická data a další vstupní data do modelu. Důležitým faktorem je i zobrazování výsledků záplavových území na jiných podkladech, než je digitální model terénu. Toto zobrazení je pak bližší i pro neodbornou veřejnost.

Na modelu transportu sedimentů na řece Opavě nebyly zjištěny významné změny ve stavu koryta toku. Neměl by tento problém být opomínán a je vhodné tuto problematiku řešit. U řek, které mohou být více postižené erozí a vymíláním, by měla být tato problematika do sledování vodního toku zahrnuta.

Transport sedimentů je velmi významný a jeho sledování by nemělo být opomínáno zejména při stavbě různých vodních nádrží či vodních děl na tocích. Snižováním průtoku u těchto toků vlivem transportu sedimentů, by mohlo docházet k zanášení těchto nákladných vodních děl a k následné potřebě odstraňování transportovaných sedimentů.

10. Seznam symbolů, označení a zkratek

A	[-]	kritický parametr mobility sedimentů (Acker-White)
A, B	[-]	experimentální součinitelé (A=0,047; B=0,25) (Engelund-Hansen)
A _L	[-]	součinitel délky kroku částice
c	[kg·m ⁻¹]	součinitel obrusu – <i>coefficient of abrasion</i>
C	[kg·m ⁻³]	koncentrace splavenin v hloubce y
C _D	[-]	odporový součinitel
C _{exp}	[-]	koeficient stanovený na základě experimentů (Acker-White)
cf	[-]	koeficient tření
C _L	[-]	vztlakový součinitel
C _m	[kg·m ⁻³]	průtok koncentrace sedimentů
C _{se}	[kg·m ⁻³]	koncentrace sedimentů
d	[mm]	průměr zrna
D	[-]	součinitel difuzivity
de	[mm]	efektivní průměr zrna
D _h	[-]	efektivní hloubka
d _s	[m]	změna dráhy
F _B , F _L	[N]	vztlaková síla
F _D	[N]	odporová síla
F _G ; G	[N]	gravitační síla
F _{gr}	[-]	parametr mobility sedimentů
F _L	[N]	Vztlaková síla
Fr	[-]	Froudovo číslo
G	[g]	hmotnost zrna na konci vykonané dráhy
g	[m·s ⁻²]	gravitační zrychlení (=9.81)
G ₀	[g]	hmotnost zrna na začátku dráhy
g _p	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok plavenin
G _s	[N]	tíha tělesa
g _s '	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok splavenin na jednotku šířky koryta
g _{se}	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok plavenin a splavenin (sedimentů)

h	[m]	tloušťka, hloubka
i	[-]	sklon dna (<i>normal depth</i>)
K	[mm ³]	konstantní objem
k_1, k_2, k_3	[-]	tvarové součinitele
k_r	[-]	drsnost dna (makrodrnrost)
k_r'	[-]	povrchová drsnost vyvolaná zrnem (mikrodrsnost)
k_s	[-]	konstanta plochy částice
k_t	[-]	konstanta časového měřítka částice
k_v	[-]	konstanta objemu částice
M	[-]	parametr koncentrace sedimentů
n	[-]	počet vrstev
n_v	[-]	exponent teploty
P	[-]	pravděpodobnost, že dojde k vymletí částice
p_0	[kg]	hmotnostní procento frakce materiálu dna
p_d	[kg]	hmotnostní procento frakce dnových splavenin
q_s	[kg·s ⁻¹]	průtok splavenin na dně
R	[m]	hydraulický poloměr
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Re_*	[-]	splaveninové Re číslo
S	[-]	sklon
$S.F.$	[-]	tvarový součinitel
u	[m·s ⁻¹]	rychlost vody u dna
U	[m·s ⁻¹]	průměrná rychlost proudu
u_*	[m·s ⁻¹]	třecí rychlost
u_{kr}	[m·s ⁻¹]	kritická rychlost
v	[m·s ⁻¹]	průřezová rychlost čisté vody
Δv	[m·s ⁻¹]	přírůstek rychlosti mezi spodní přilehlou vrstvou a horní vrstvou
V	[m ³]	objem vody a splavenin
$V1$	[m ³]	objem splavenin
v_s	[m·s ⁻¹]	průřezová rychlost vody a splavenin
w_s	[m·s ⁻¹]	sedimentační rychlost
γ	[N·m ⁻³]	měrná tíha vody
γ_s	[N·m ⁻³]	měrná tíh částice

δ	[m]	tloušťky vizkózní podvrstvy
θ	[-]	Shieldův parametr
λ	[m]	vlnová délka
ν	[m ² ·s ⁻¹]	kinematická viskozita ($\nu=\mu/\rho$; dynamická viskozita/hustota vody)
ρ	[kg·m ⁻³]	měrná hmotnost vody
ρ_s	[kg·m ⁻³]	měrná hmotnost částice, hustota částice
τ_0	[Pa]	tečné napětí
τ_c, τ_{0kr}	[Pa]	kritické tečné napětí na dně
ϕ	[-]	intenzita pohybu dnových splavenin
χ	[-]	kvantitativní charakteristika splavenin (DuBoys)
χ''	[-]	koefficient popisující charakteristiku splavenin (Schoklist)

ZKRATKY:

1D,2D,3D	Jedno-, dvou-, třírozměrný
CAD	Computer Aided Design –počítačem podporované navrhování
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
DIBAVOD	Digitální báze vodohospodářských dat
DTM	Digitální model terénu
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GIS	Geografický informační systém
HEC –RAS	Hydrologic Engineering center – River Analysis Systém
LiDAR	Light Detection And Ranging
s.p.	státní podnik
TIN	Triangulated irregular network
ZABAGED	základní báze geografických dat České Republiky

11. Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 - rozdíl mezi splaveninami a plaveninami (přednášky říčního inženýrství ČVUT)	12
Obrázek 2-trojosý elipsoid (zdroj: http://images.yourdictionary.com/elipsoid)	14
Obrázek 3 - síly působící na klesající částici v tekutině ((přednášky říčního inženýrství ČVUT).....	21
Obrázek 4 - sedimentační rychlost závislá na průměru částic (Kovář, 1988)	21
Obrázek 5 - Síly působící na částice na dně (Graf, 1971)	24
Obrázek 6- eroze -transport- sedimentace částic podle Hjulströma (Graf, 1971).....	26
Obrázek 7 - Shieldsův diagram (Graf, 1971).....	27
Obrázek 8- tvary na dně (přednášky říčního inženýrství ČVUT,)	31
Obrázek 9 - proudění splavenin na dně dle DuBoyse (Graf, 1971)	32
Obrázek 10 - křivka rozdělení koncentrace plavenin (Kovář, 1988).....	36
Obrázek 11- vertikální distribuce plavenin, rychlosti a průtoku plavenin (Kovář, 1988)	36
Obrázek 12 - potřebné soubory k analýze transportu sedimentů v HEC-RAS.....	41
Obrázek 13 - výpočetní schéma quasi-neustálého proudění (Brunner, 2010a)	42
Obrázek 14 - parametry popisující transport sedimentů	42
Obrázek 15 - model třídění zrn EXNER 5 a model AKTIVNÍ VRSTVY (Brunner, 2010a).....	43
Obrázek 16 - export vytvořeného souboru z AutoCADu Civil 3D do HEC - RAS	46
Obrázek 17 - River Analysis a ukázka dat z AutoCAD Civil 3D 2012.....	47
Obrázek 18 - ukázka nahrání některých dat přes River Analysis do AutoCAD Civil 3D.....	48
Obrázek 19 - řeka Opava – v celém rozsahu (Kubačka J. a Kubačka M., 2009)	50
Obrázek 20 - zájmová část území v širším vztahu okolí (zdroj:autor).....	51
Obrázek 21 - lišta HEC - geoRAS v ArcGIS	55
Obrázek 22 - Geometrie řeky.....	56
Obrázek 23- umělá povodňová vlna	57
Obrázek 24 - Plan file	58
Obrázek 25 - podélný profil (zdroj: Autor)	60
Obrázek 26 - změna dna v čase (zdroj: autor)	60
Obrázek 27 - změna příčného profilu	61
Obrázek 28 - rychlostní rozložení.....	61
Obrázek 29 - Floodplain Mapping	62
Obrázek 30 - zobrazí rozlivu při nejvyšším průtoku během modelování transportu sedimentů	63
Tabulka 1 - rozdělení splavenin podle velikosti částic (Tlapák , Henryek, 2001)	15
Tabulka 2 - zrnitostní složení (Macura, 1981).....	16
Tabulka 3 - klasifikace tvaru zrn podle jejich rozměrů trojosého elipsoidu (Výbora, 1978).....	17
Tabulka 4- hodnoty součinitele obruš c (Výbora et al.,1989).....	19
Tabulka 5 - hodnoty měrné hmotnosti a měrné tíhy různých druhů sedimentů (Macura, Szolgay, 1990)..	20
Tabulka 6 - okrajové podmínky funkcí (Brunner, 2010b)	43
Tabulka 7 - charakteristika klimatických oblastí (Quitt, 1971).....	52
Tabulka 8 – M – denní a N-leté průtoky (povodí Odry s.p. 2007a)	53

12. Použitá literatura

- AUTODESK 2011: Autodesk Projekt River Analysis 2012 Extension for AutoCAD Civil 3D and Map 3D, User Guide, Autodesk San Rafael, on-line: http://labs.autodesk.com/utilities/civil3d_river/, cit. 1.2.2013.
- BOGÁRDI, J. 1974: Sediment transport in alluvial streams, Akadémiai Kiadó Budapest.
- BRUNNER, G.W. 2010a: HEC-RAS 4.1. Hydraulics References manual. U. S. Army of Corps Engineers Davis on –line: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>, 13.3.2012.
- BRUNNER, G.W. 2010b: HEC-RAS 4.1. User's manual. U. S. Army of Corps Engineers Davis on –line: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> cit.: 13.3.2012.
- CARTER A. 2011: Floating Away: Connecting AutoCAD Civil 3D with Hec –RAS for floodplain mapping, Halff Associated, on-line: http://au.autodesk.com/?nd=event_class&jid=1727888&session_id=9109, cit. 1.2.2013
- EINSTEIN H.A. 1942: Formulas for the Transportation of Bed Load, Transactions ASCE
- GEOPORTAL 2010: Národní geoportal INSPIRE, on-line: <http://geoportal.gov.cz/web/guest/map>, cit. 30.1.2013.
- GARDE, R. J., RAJU K.G.R. 1977: Mechanism of sediment transportation and alluvial stream problems. Vinod Kumar New Delhi
- GRAF, W. H. 1971: Hydraulics of sediment transport. McGraw-Hill New York.
- HEIS VÚV, 2002: Vodní hospodářství a ochrana vod (2), on-line: <http://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=souhrn&>, cit 30.1.2013
- HJULSTORM F. 1935: The Morphological Activity of Rivers as Illustrated by River Fyris, Bulletin of the Geological Institute, Uppsala
- KOLÁŘ, V. 1978: Pohyb splavenin, skripty ČVUT v Praze.
- KOVÁŘ, P. 1988: Úpravy toků, Vysoká škola zemědělská v Praze.
- KRAMER J. R. 1965:
- KUBAČKA J., KUBAČKA M. 2009: Voda v krajině Opavska, Statutární město Opava, str. 19
- LANDA, I. 2007: Regionální geologie České Republiky, str 46.
- LIU, Z. 2001: Sediment transport, Aalborg Universitet Aalborg.
- MACURA, L 1981. : Úpravy tokov, Stavebná fakulta, Slovenská vysoká škola technická v Bratislave

MACURA, V., SZOLGAY, J., 1990: Úpravy tokov, Stavebná fakulta, Slovenská vysoká škola technická v Bratislave.

MAREŠ, K. 1985: Úpravy toků (navrhování koryt), ČVUT v Praze fakulta stavební Praha.

MERWADE V., COOK A., COONROD J. 2008: GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping, Journal Environmental Modelling and Software

POVODÍ ODRY s.p., 2007a: Průvodní list útvaru povrchových vod Plánu oblasti povodí Odry, on-line http://www.pod.cz/plan-oblasti-povodi-Odry/inf_listy/prilohy/025_RL_VU.pdf, cit. 15.6.2012.

POVODÍ ODRY s.p., 2007b: Plán oblasti Odry, on-line: <http://www.pod.cz/plan-oblasti-povodi-Odry/a-popis/a-popis.html>, cit. 15.6.2012.

POVODÍ ODRY s.p., 2012: Atlas hlavních vodních toků povodí Odry, on-line: http://www.pod.cz/atlas_toku/pdf/opava.pdf, cit. 30.1.2013.

QUITT, E. 1971: Klimatické oblasti Československa. Academia, Studia Geographica 16, GÚ ČSAV v Brně, 73 s.

RUBEY, W.W. 1933: Setting Velocities of Gravel, Sand and Silt Partickles, American Journal of science.

SCHOKLITSCH A. 1934: Der Geschriebetrieb und die Geschriebefracht, Wasserkraft und Wasserwirtschaft

SINNAKAUDAN S. K., GHANI A.A., AHMAD M.S.S, ZAKARIA N.A. 2003: Flood risk mapping for Pari River incorporating sediment transport, Journal Environmental Modelling and Software

STENBERG H. 1875: Untersuchungen über längen – und querprofil geschriebeführender Flüsse, Zeit –Schrift für Bauwesen,

STURM, T.W. 2010: Open channel hydraulics, McGraw-Hill New York.

TLAPÁK, V., HENRYEK, J., 2001: Úpravy vodních toků a hrazení bystřin, MZLU v Brně

TOFFALETI, F.B. 1968: Technical Report No.5, A Procedure for computation of Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface, Committee on Channel Stabilization, U.S.Army Corps of Engineers.

VAN RIJN, L.E. 1993: Principles of Sediment Transport in Rivers, Eustuaries, Coastal Seas and Oceans, International Institute for Infrastructural, Delft.

VÝBORA, P., 1978: Úpravy toků, VUT v Brně.

VÝBORA, P., RAPLÍK M., MAREŠ K. 1989: Úpravy tokov. Alfa Bratislava .

YANG, C.T., 2002: Sediment transport modeling – combination of theoretical concepts and practical approach. In: Summer W. & Walling D.E (eds.): Modelling erosion sediment transport and Šeld, UNESCO Paris.

YANG, C.T. 2006: Erosion and sedimentation manual, U.S.Department of Interior Denver .

ZACHOVAL Z.2009: Opatření na horní Opavě, Vysoké učení technické v Brně .

On-line zdroje obrázků:

On – line: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/RIN/ke_stazeni/prednasky/8/RIN_8-1.pdf, cit. 13.3.2012

On – line : <http://images.yourdictionary.com/ellipsoid>, cit. 13.3.2012

13. Přílohy

SEZNAM PŘÍLOH

- 1. Vytvořené mapy k popisu území**
- 2. Postup práce v ArcMap s extenzí HEC-geoRAS (pre - procesing)**
- 3. Výstupy z vytváření vstupních dat do HEC – RAS v ArcMapu (pre – procesing)**
- 4. Zrnitostní složení vzorků jak byly vkládány do souboru o sedimentech**
- 5. Zobrazení výsledků z programu HEC – RAS (zvětšení)**
- 6. Mapy vytvořené v RASMapper – GIS nástroj v rámci HEC - RAS**
- 7. Postup exportu výsledků do ArcGIS**