

## Modelování kvartérních fluviálních procesů s využitím GIS

Veronika Říhová, Ing. <sup>1</sup>, Michaela Hořínková, Mgr. <sup>2</sup>, Jan Unucka, RNDr., Ph.D. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta, Vysoká škola báňská, 17. listopadu 15,  
708 33 Ostrava-Poruba, ČR  
veronika.rihova@vsb.cz, jan.unucka@vsb.cz

<sup>2</sup>Institut geoinformatiky, Hornicko-geologická fakulta, Vysoká škola báňská, 17. listopadu 15,  
708 33 Ostrava-Poruba, ČR  
michaela.horinkova@vsb.cz

**Abstrakt.** The role of water and rivers in landscape is remarkable. Landscape is formed and influenced of fluvial processes. Discussion about the climatic change is not about the linear increase of the temperature but mainly about the hydrometeorological changes such is meteorologic extremes occurrence and long-term changes of precipitation amount within the year. Influence of droughts and severe storms could affect the water regime of the landscape and basins. These causal changes of soils physical and chemical conditions together with the land use changes bring about the change of hydrological response during the rainfall. So, it's very important to study hydrological response of basins in climate change scenarios. However the cardinal problem is the absence of measured data in the long-term simulations, the good support is the geological, geomorphological, paleoclimatical and paleoecological evidence of climate and landscape changes. Local climatic variations and tectonic uplift have influenced the development of Quaternary fluvial landforms and deposits along rivers. In last c. 10 000 years are these processes influenced and spurred by the growth of human populations. Human impacts on river basins play a significant role. Cultivated agricultural land evokes processes such is erosion and increase of the sediment transport. Using dynamic model SWAT and hydrodynamic models HEC-RAS and MIKE 11 together with GIS makes possible to simulate and visualize effects of human activities on erosive and sedimentary processes in the landscape, especially caused by agricultural work and deforestation. Selected study area is watershed of the river Horní Morava.

**Klíčová slova:** Kvarterní fluviální proces, GIS, Horní Morava, SWAT, MIKE11, HEC-RAS

**Abstract.** Význam vody a vodních toků v krajině je nezastupitelný. Krajina jako taková je ovlivňována a formována fluviálními procesy. Současná diskuze o změně klimatu není o lineární změně globální průměrné teploty, ale zejména o výskytu hydrometeorologických změn jako je výskyt hydrometeorologických extrémů (přivalové srážky, sucha) a dlouhodobých změn srážkového režimu v průběhu roku. vliv sucha a přivalových srážek může ovlivnit vodní režim krajiny a povodí. Tyto předběžné změny půdního chemismu a fyzikálních parametrů spolu se změnami krajinného pokryvu a využití půdy způsobují změnu hydrologické odezvy povodí během srážky. Z tohoto důvodu je velmi důležité hydrologickou odezvu povodí během scénářů změn klimatu. Jakkoliv je kardinálním problémem absence měřených dat, dobrou podporu přinášejí geologická, geomorfologická, paleoklimatická a paleoekologická data. Lokální klimatické oscilace a tektonický zdvih ovlivnil vývoj kvartérních fluviálních tvarů reliéfu a depozitů sedimentů okolo vodních toků. Během posledních 10 tisíc let byly tyto procesy ovlivněny nárůstem lidské populace. Vliv člověka na povodí hraje významnou roli. Kulturní krajina a její aktuální stav pak ovlivňuje míru eroze a transportu sedimentů v povodích. Využití dynamického erozního modelu SWAT a hydrodynamických modelů HEC-RAS a MIKE 11 spolu s GIS umožňuje simulaci a vizualizaci efektu lidské aktivity na erozní a sedimentační procesy, které jsou způsobeny zejména zemědělstvím a odlesňováním. Pilotním územím bylo povodí Horní Moravy.

**Keywords:** quaternary fluvial processes, GIS, Horní Morava, SWAT, MIKE11, HEC-RAS

## Kvartérní sedimentační cyklus

Kvartérní uloženiny nacházející se na našem území jsou narozdíl od staršího geologického podkladu výhradně terestrického původu. Fluviální sedimenty jsou pak jedny z nejvýznamnějších z hlediska stratigrafie. Jsou v nich zachovány stopy po klimatických výkyvech, které jsou typické pro období kvartéru. Vznik každého cyklu představuje nástup glaciálu (chladného období) s přechodnými obdobími (stadiály a interstadiály) a následujícího teplejšího interglaciálu. Změny klimatických podmínek spolu s pohyby zemské kůry tedy působí na tvorbu říčních teras.

Do chladných období, kdy převládala bezlesá krajina a její povrch podléhal silné erozi, spadá proces akumulace terasových sedimentů. Řeky měly divočící ráz a vytvářely stále se měnící síť koryt v hrubých šterkových a šterkopískových nánosech. Teplejší období naopak představovaly denudační klid, povrch zpevnila narůstající vegetace a řeky vytvářely meandrující koryta.

V holocénu jsou tyto fluviální erozně-sedimentační procesy více vázány na antropogenní činnost. Živinami bohaté říční náplavy nivy Moravy byly lidmi využívány od dob příchodu prvních zemědělců. Původní stav krajiny se na našem území nachází pouze na výjimečných místech. Člověk jsou zemědělskou a jinou činností potlačil její přirozený vývoj a vytvořil tak specifický ráz krajiny.

Kvantitativní i kvalitativní charakteristiky plavenin a sedimentů ovlivňují erozně-sedimentační procesy v tocích, jejich množství závisí především na míře zalesnění povodí, sklonu svahů a na způsobu využívání krajiny, což dokazuje mimo jiné naše práce.

## Metodika práce

Pro modelování erozně-sedimentačních procesů v kvartéru je nutno zvolit vhodný scénář. Lze zde přitom vycházet ze 2 základních variant a případně jejich vhodné kombinace. Při kombinování scénářů je však bez citlivostní analýzy obtížné stanovit převládající faktor, který zmiňované erozně-sedimentační procesy ovlivňuje. Co se týče zmiňovaných variant scénářů, jsou následující:

1. scénář změn krajinné struktury (*land use a land cover* – LULC)
2. scénář změn klimatických podmínek (zejména teplotní a srážkový režim)

Pokud vycházíme z toho, že antropogenní urychlená eroze se odehrává v člověkem intenzivně pozměněné krajině, jeví se jako vhodný scénář první. Varianty krajinného pokryvu a prvků využití půdy, které lze opět rozdělit na dva extrémy a to komplexně zalesněné povodí (což lze v povodí Horní Moravy vyjma nejvyšších poloh a extrémních stanovišť předpokládat) a aktuální krajinný pokryv s převahou zemědělsky intenzivně využívané kulturní krajiny. Tuto metodiku aplikoval i autorský kolektiv.

Její aplikace proběhla tím způsobem, že se uvedené scénáře změn krajinného pokryvu a využití půdy aplikovaly na úrovni schematizace dynamického erozního modelu, který poté pro každý scénář simuloval odnos sedimentů z ploch povodí a jejich transport v korytech toků. V další fázi pak hodnoty transportu sedimentů v úsecích vodních toků byly použity jako okrajová podmínka v hydrodynamických modelech, které již s větší mírou detailu řešily erozní a transportní procesy v korytech.

## Použitá data

Pro schematizace dynamických erozních modelů byla použita následující GIS data:

1. digitální model terénu (interpolace z DMÚ-25)
2. mapa půdních typů a BPEJ (VÚMOP)
3. CORINE land cover 2006
4. hydrografické vrstvy – vodní toky a plochy (VÚV DIBAVOD)

Pro schematizaci hydrodynamických modelů byla použita následující data:

1. příčné profily (Povodí Moravy)

Pro dynamický erozní model bylo neschematizováno povodí Horní Moravy po vodoměrný profil Olomouc (4-10-03-115), což představuje plochu povodí 3323,9 km<sup>2</sup>.

V hydrodynamických modelech MIKE 11 a HEC-RAS byl schematizován úsek Moravy na území CHKO Litovelské Pomoraví.

## Použité programové prostředky

### SWAT

Pro modelování eroze byl využit dynamický erozní model SWAT, který již byl několikrát popsán v pracích autorů, např. Unucka 2008, Unucka et al. 2009, Adamec et Unucka 2007. Jedná se o celosvětově rozšířený model, který je mj. používán EPA pro analýzy odtokových a erozních poměrů na zemědělských a lesních povodích. Nabízí vhodné nástroje a metodiky pro modelování dlouhodobých scénářů, mezi které lze zařadit např. generátor chodu meteorologických prvků podle zeměpisných souřadnic a nadmořské výšky a modifikace metody SCS-CN, aby byla použitelná i pro dlouhodobé simulace (Adamec et Unucka 2007). Krom samotné fluvialní eroze a srážkoodtokových vztahů je tento programový prostředek schopen řešit i dynamiku biogeochemických prvků, živin, těžkých kovů a pesticidů v povodí, takže lze tento nástroj označit za komplexní model pro správu zemědělských povodí.

Programový prostředek SWAT včetně dokumentace je dostupný na odkazech:

<http://www.epa.gov/waterscience/basins/>  
<http://www.epa.gov/waterscience/basins/bsnsdocs.html>

### HEC-RAS

Jedná se bezesporu o nejrozšířenější 1D hydrodynamický model sloužící k výpočtům ustáleného a neustáleného proudění v korytech toků a inundacích. Umožňuje do schematizace zahrnout i technické stavby (mosty, odlehčovací kanály apod.) a podélné a příčné objekty v tocích (opevnění břehů, jezy, stupně apod.). Jedná v USA a Kanadě o průmyslový standard inkorporovaný do metodiky FEMA.

Popisy vlastností tohoto programového prostředku a práce s ním lze nalézt na webu výrobce nebo vybrané charakteristiky opět v pracích autorského kolektivu (Unucka et al. 2007).

Programový prostředek HEC-RAS má poměrně pokročilé možnosti modelování transportu sedimentů a vývoje koryt. Je však nutno mít na zřeteli, že se jedná o 1D model.

Pro modelování transportu sedimentů a stability koryt nabízí HEC-RAS následující metody:

1. Ackers-White
2. Engelund-Hansen
3. Laursen (Copeland)
4. MPM
5. Toffaleti
6. Yang

Každá z těchto metod se liší detaily výpočetní mechanizmu a je vhodná pro určitý průměr zrn a typ materiálu v korytě (štěrková, písčítá apod.).

Poměrně doporučovanou metodou je metoda Larsen (Copeland), mj. také pro možnost modelování transportu sedimentů v korytech s gradacním pokryvem dna (Dyhouse et al. 2007). Je rovněž poměrně nenáročná na vstupní data, uživatel musí zadat jen základní proměnné pro řešení (např. zrnitostní křivku sedimentů, rozsah Manningových drsností, aktuální koncentrace sedimentů).

Krom metod pro numerické modelování transportu sedimentů nabízí HEC-RAS i analytické možnosti pro návrh stabilního profilu přírodních i upravených koryt – *Stable Channel Design*. Stabilní profil může být definován různě a z různých hledisek, ale v pojetí eroze a transportu sedimentů je to návrh takového profilu, kdy nedochází k jeho erozi alespoň na úrovni simulovaných Q, tzn. je pro tyto analýzy vhodné použít simulaci s N-letými Q (Dyhouse et al. 2007).

Pro tyto analýzy nabízí HEC-RAS následující metody:

1. Copeland metoda (Copeland 1994)
2. Režimová metoda (*Regime Method*) (Blench 1970)
3. Metoda tahové síly (*Tractive Force Method*)

První 2 metody jsou vhodnější spíše pro dna s jemnozrnným pokryvem, zatímco metoda tahové (trakční) síly je vhodná spíše pro dna pokrytá hrubší frakcí.

Program lze spolu s vyčerpávající dokumentací nalézt na odkaze:

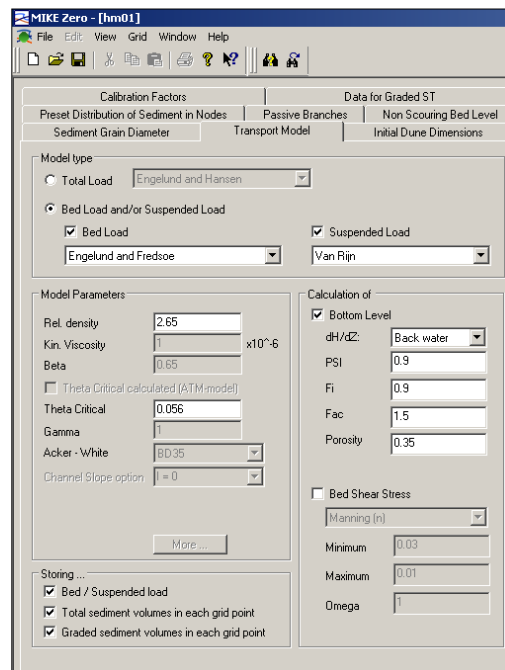
<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

### MIKE 11

Jedná se opět o 1D hydrodynamický model dánské firmy DHI. Spolu s HEC-RAS je nejrozšířenější v celosvětovém měřítku. Tento komerční programový prostředek nabízí mj. 3 metody řešení eroze a transportu sedimentů:

1. Engelund-Fredsoe
2. van Rijn
3. Ackers & White

Pro zadání a editaci dat a parametrů pro transport sedimentů slouží soubor \*.st11.



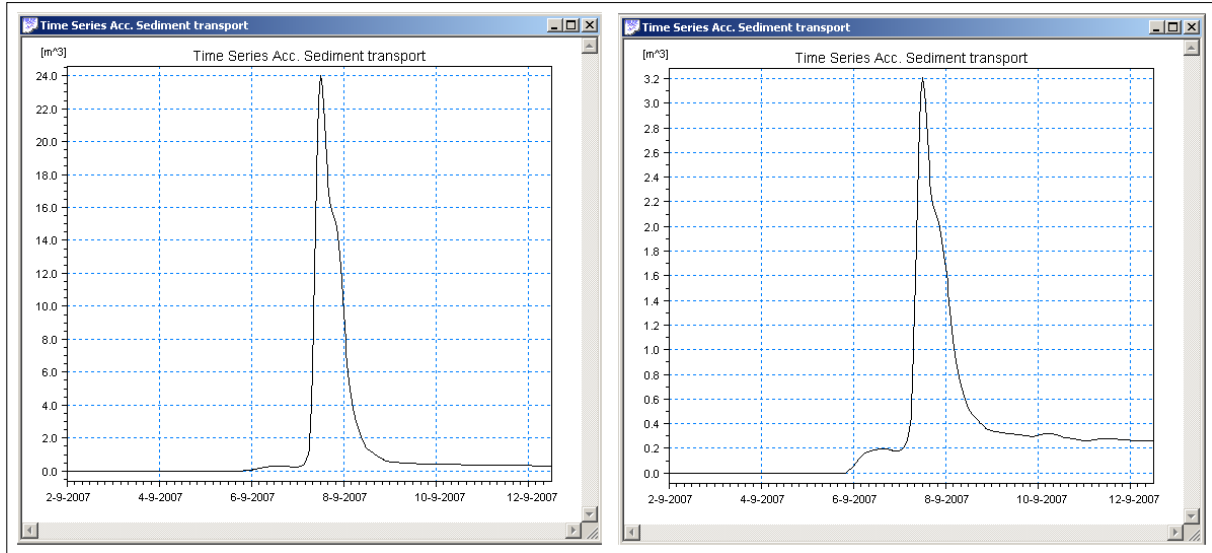
**Obr. 1:** Zadání základních parametrů pro metodu Engelund-Fredsoe v editoru souboru st11 v MIKE 11

Pro řešení transportu sedimentů lze zvolit buď sružený model pro transport sedimentů i erozi dna – nejčastěji se v takovém případě volí metoda Ackers & White – a nebo lze zvolit oddělené metody pro transport sedimentů v suspenzi a dnovou erozi. Pak se např. pro transport sedimentů volí metoda Engelund-Fredsoe a pro dnovou erozi Van Rijn (viz obr. 3). Srovnání výsledků obou přístupů znázorňuje obrázek 4.

V dialogovém okně souboru \*.st11 nastavíme parametry pro erozně-transportní procesy principiálně pro celou schematizaci MIKE 11 s tím, že lze zvolené parametry a okrajové podmínky rozdělit pro jednotlivé toky či jejich úseky (uzly). Tímto lze podchytit prostorovou heterogenitu těchto procesů např. pro malý přítok většího toku apod. Rovněž lze nastavit proměnlivost velikosti zrna sedimentů pro

jednotlivé úseky schematizace – střední průměr zrna a směrodatnou odchylku v záložce *Sediment Grain Diameter*.

Po zadání zrnitostních frakcí sedimentů lze ještě nastavit počáteční velikosti dun dna, což vypovídá o morfologii dna jako takového a úložných poměrech sedimentů. Tyto parametry lze opět nastavit jak globálně, tak lokálně. Vyžadována je průměrná výška a délka dun v m.



**Obr. 2:** Srovnání výsledků metod Ackers-White (vlevo) a kombinace Engelund-Fredsøe a Van Rijn (vpravo) – objem transportovaných sedimentů.

Po vyplnění adekvátních parametrů v souboru \*.st11 je nutno ještě nastavit transport sedimentů jako okrajovou podmínku v souboru \*.bnd11. MIKE 11 nabízí 2 možnosti a sice *Sediment Supply* (přísun sedimentů) a *Sediment Transport* (transport sedimentů). První typ okrajové podmínky nevyžaduje po uživateli zadání hodnot, druhý typ konkrétní hodnoty vyžaduje buď ve formě konstantní hodnoty nebo časové série v souboru \*.dfs0 pro období simulace.

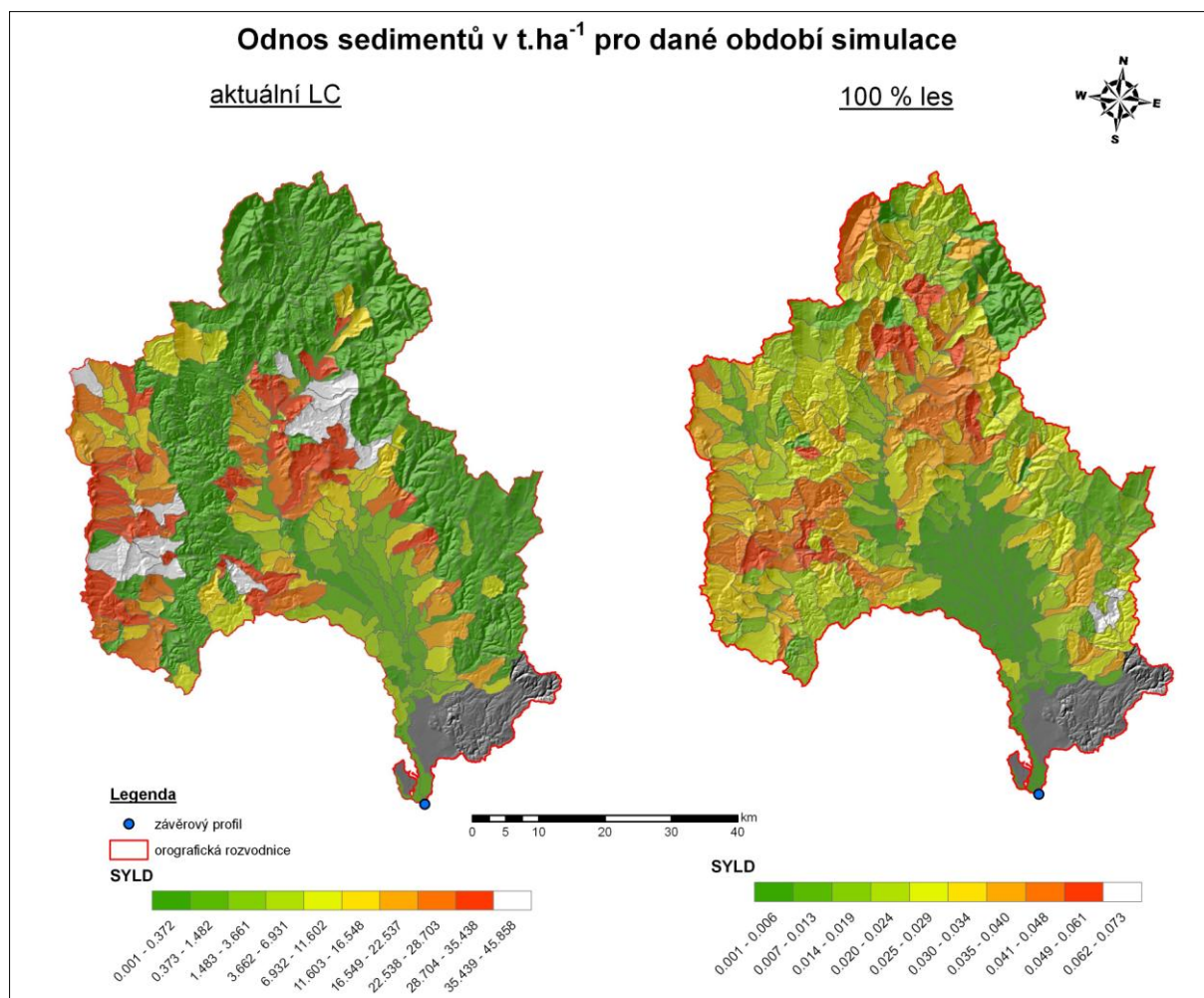
MIKE 11 včetně dokumentace lze nalézt na odkaze:

<http://www.dhigroup.com/Software/WaterResources/MIKE11.aspx>

## Výsledky

### SWAT

Pro analýzu odnosu sedimentů jsou důležité především dvě hodnoty, a to hodnota SYLD (odnos sedimentů ze subpovodí v t.ha-1.rok-1) a hodnota SED\_OUT (odnos sedimentů v závěrovém profilu subpovodí pro dané období simulace v tunách).



**Obr. 3 :** Srovnání hodnot SYLD pro oba scénáře simulace

Při srovnání obou výstupů je zjevné, že hodnoty odnosu sedimentů ze subpovodí jsou pro scénář 100 % zastoupení lesa mnohem menší než pro scénář aktuální krajinný pokryv (ALC). Procentuální vyjádření této hodnoty naznačuje o 97,5 % větší odnos z ploch subpovodí pro ALC.

Pokud bychom jen čistě hypoteticky uvažovali, že pro dané období simulace (tedy 106 let) je rozdíl v odnosu sedimentů z povodí 3425,942 t.ha<sup>-1</sup> a pak bychom dané období a rozdíl hodnot odnosu vynásobili 100, získali bychom tak přibližnou dobu trvání celého holocénu (cca 10 600 let) a rozdíl hodnot odnosu sedimentů, který by pro oba scénáře dosáhl hodnoty 342 594,2 t.ha<sup>-1</sup>.

V Tab. 1 jsou srovnány další 2 hodnoty, SED\_OUT (odnos sedimentů tokem v závěrovém profilu v tunách) a FLOW\_OUT (hodnota průměrného denního odtoku závěrovým profilem toku v m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), pro oba scénáře, čímž je opět dokázán vliv lesa jak na odnos sedimentů tak i na odtok.

**Tab. 1 :** Srovnání hodnot SED\_OUT a FLOW\_OUT pro vybraná subpovodí (1-377)

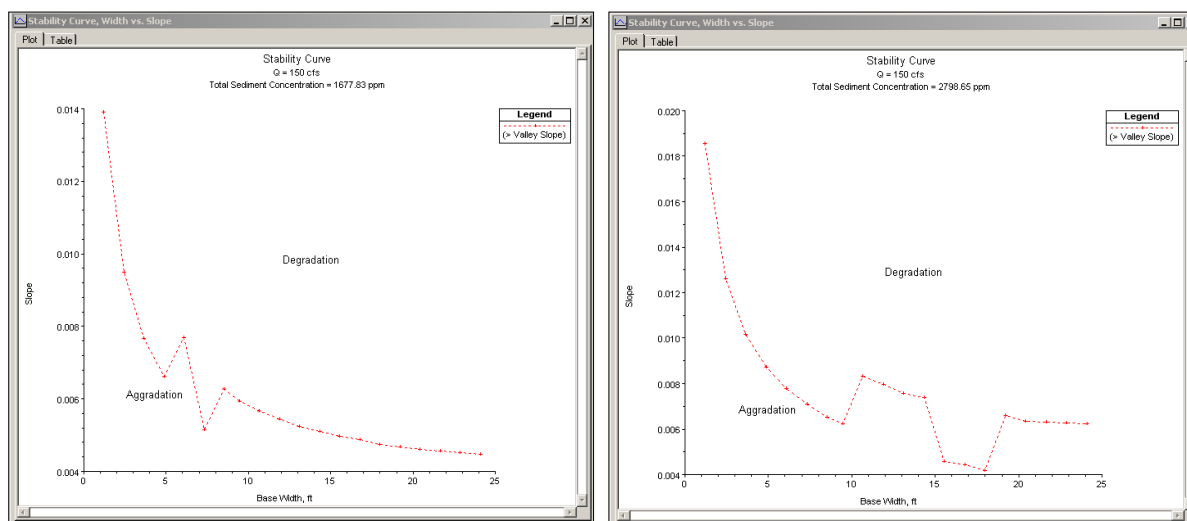
č. subpovodí	SED_OUT alc	SED_OUT 100 % les	FLOW_OUT alc	FLOW_OUT 100 % les
1	25.11	25.11	0.33	0.33
60	18380.00	62.69	2.33	2.16
100	69830.00	108.40	1.21	1.05
150	192400.00	748.60	9.41	8.47
190	6468.00	12.18	0.13	0.11
240	93.25	40.13	0.78	0.76
280	1450000.00	4326.00	45.78	41.54
320	90910.00	112.30	1.18	1.03
377	821600.00	5071.00	70.65	64.26

Pro dané období simulace byl stanoven pokles odtoku (hodnota FLOW\_OUT) pro scénář 100 % pokrytí lesa o 9 % oproti aktuálnímu krajinnému pokryvu (tedy pro 23 % zastoupení lesa dle CORINE LC 2006).

### HEC-RAS

Dynamickým modelem SWAT byl bilančně stanoven odnos sedimentů z ploch povodí a jejich transport v úsecích toku. Hydrodynamické modely HEC-RAS a MIKE 11 byly využity pro detailnější modelování transportu a akumulace sedimentů, stejně jako pro dnové a břehové eroze.

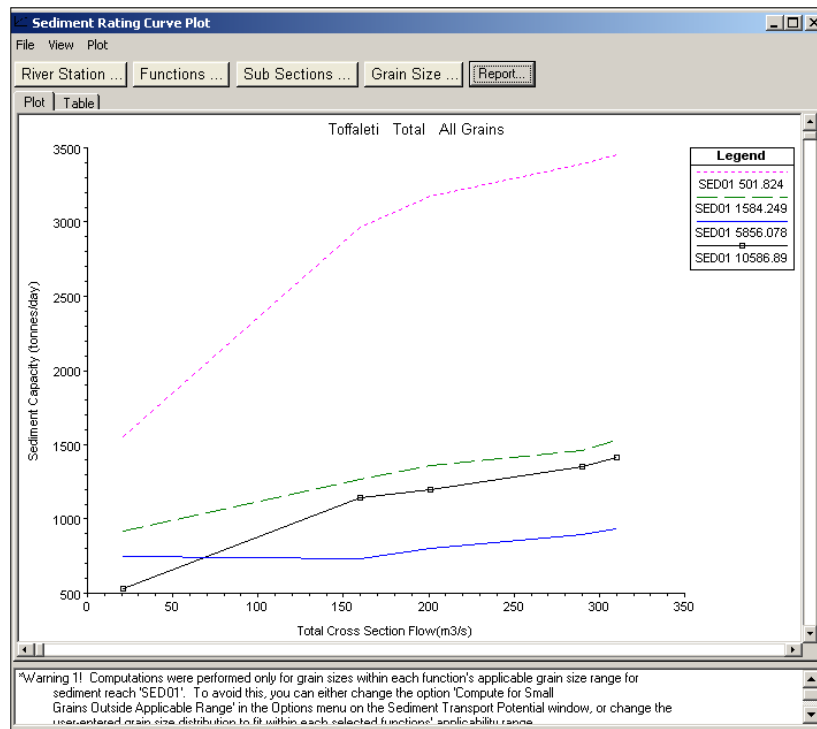
Výsledkem modelování jsou mj. křivky stability dna pro poměr mezi režimem akumulace sedimentů a režimem eroze (viz obr. 1). Obrázek 2 zase ilustruje měrnou křivku transportu sedimentů různých frakcí.

**Obr. 4:** Křivky stability dna – výsledek simulace v HEC-RAS

Režim agradace (*Agradation*) či odnosu sedimentů (*Degradation*) vyjadřují tedy stabilitní křivky (na obr. 4) pro scénář ALC (vlevo) a scénář 100 % zastoupení lesa (vpravo). V závislosti na sklonu dna, tvaru profilu, hydraulickém poloměru a Manningově drsnosti koryta, jak je z obr. 4 patrné, v úsecích toku, kde převažuje kombinace širší koryto a nižší sklon toku, řeka agraduje. Naopak větší sklon toku spolu s užším korytem vyvolává proces degradace. Všechny tyto faktory mají souvislost samozřejmě i s rychlostí toku.

Stabilitní křivky rovněž doznaly, jako ostatní výstupy z modelů, změn po aplikaci scénáře 100 % les. Jednak zde klesá absolutní hodnota průtoku a tím i unášecí schopnost toku. Jednak i depozice sedimentů do vodoteče plošnou erozí je snížena.

Proto dochází k poklesům na stabilitní křivce což naznačují „klidové režimy“ pro odnos sedimentů, což zřejmě souvisí s novou teorií dominantního průtoku (Thorne, C. R. et al. 1997).



**Obr. 5:** Měrná křivka transportu sedimentů – výsledek simulace HEC-RAS

### MIKE 11

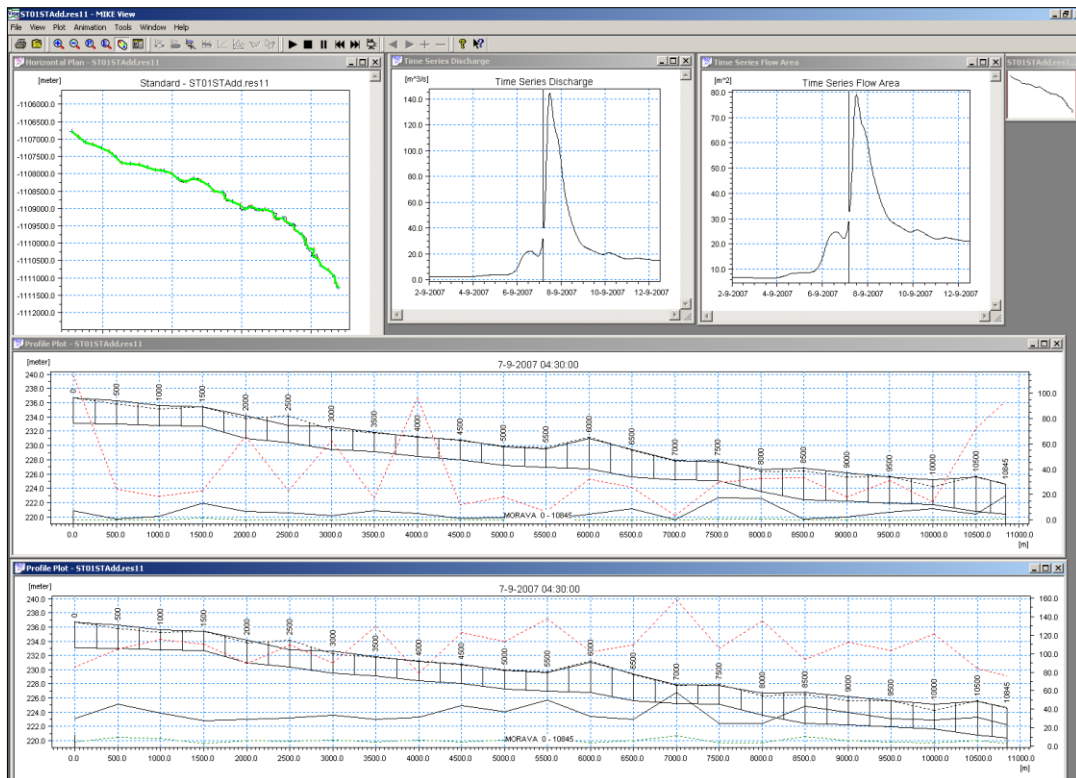
Výsledky simulací je možno graficky zobrazit formou grafů pro jednotlivé příčné profily nebo pro celý podélný profil. V MIKE View lze zobrazovat např. tyto výsledky:

1. transport sedimentů
2. změny nadmořské výšky dna
3. dnovou erozi
4. transport sedimentů pro jednotlivé zrnitostní frakce
5. průtok v inundacích
6. drsnost koryta (Manningův koeficient M)
7. drsnost inundací (Manningův koeficient M)
8. hydraulický poloměr dna a inundací

Výsledky lze poté převést do ASCII formátu pomocí příkazu:  
 res11read -allres „zdrojový res11 soubor“ „cílový ASCII soubor“

Výstupní data je pak možno přehledně zpracovat a analyzovat v tabulkovém procesoru typu MS Excel nebo OpenOffice Calc.





Obr. 6: Ukázka výsledku simulace v MIKE View

Obr. 6 znázorňuje pro vybranou srážkoodtokovou epizodu průtok a průtočnou plochu ve formě grafu pro vybraný příčný profil (nahore vpravo) a unášecí schopnost toku a změn plochy inundace pro celkový podélný profil (dole).

## Závěr

Vliv zemědělské činnosti a odlesňování velkých ploch na zvýšenou erozi půdy je v krajině nezpochybnitelný. Výsledky modelování prokázaly vliv lesa na vodu v krajině, především na odtokové poměry a množství plavenin a sedimentů, které se dostávají do vodního toku vlivem obnažení půdy a její větší náchylnosti k odnosu částic. Významná schopnost lesa je zadržovat vodu, a uchovávat ji pro období sušší. Ve srovnání se zemědělsky obdělávanou půdou z lesních porostů obecně odteče menší objem vody v období s vyššími průtoky, ale vyšší objem vody v období s nižšími průtoky.

Les tedy, kromě jiného, snižuje odtokovou výšku a odnos sedimentů z ploch v povodí. Snižování odtokové výšky má za následek snížení průtoku a nižší profilovou rychlost. S klesající profilovou rychlostí také klesá unášecí kapacita toku, což následně postihuje erozní a sedimentační procesy v tocích způsobem, jaký nastiňují hydrodynamické modely HEC-RAS a MIKE 11.

Pokud zhodnotíme procentuální hodnoty změn odtokové výšky a odnosu sedimentů, je zřejmé, že nevyváženost erozních a sedimentačních procesů v průběhu holocénu je kromě ostatních faktorů (faktory klimatické, sukcesní) způsobena i činností člověka (odlesňování, zemědělské využívání půdy) a krajině struktury.

V neposlední řadě lze z výsledků modelování konstatovat, že GIS, hydrodynamické a erozní modely představují velký potenciál v dalším výzkumu dané problematiky.

## Literatura

1. BEDIENT, P.B., HUBER, W.C. et VIEUX, B.C. (2007): Hydrology and floodplain analysis. 4th edition. Prentice Hall, London, 795 s., ISBN: 978-0131745896
2. BROWN, A.G., QUINE, T.A. eds. (1999): Fluvial processes and environmental change. London, John Wiley & Sons, 413 s., ISBN: 978-0471985488

- 
3. HAAN, C.T., BARFIELD, B.J., HAYES, J.C (1994): Design hydrology and sedimentology for small catchments. London, Academic Press, Inc., 588 s., ISBN: 978-0123123404
  4. HARMON, R.S., DOE III, W.W. eds. (2001): Landscape erosion and evolution modeling. New York, Kluwer Academic Publ., 540 s., ISBN: 978-0306467189
  5. KANTOR, J et al. (2003): Lesy a povodně. Praha, MŽP. 48 s., ISBN: 80-7212-255-X
  6. LOŽEK, V. (1973): Příroda ve čtvrtohorách. Academia, Praha, 372 s.
  7. LOŽEK, V. (2007): Zrcadlo minulosti. Česká a slovenská krajina v kvartéru. Praha, Dokořán. 200 s.
  8. ŘÍHOVÁ, V. (2009): Modelování kvartérních fluvialních procesů s využitím GIS. Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, 137 s.
  9. UNUCKA, J. (2008): Modelování vlivu lesa na srážkoodtokové vztahy a vodní erozi s pomocí GIS. Vodní hospodářství 7/2008. s. 225-231.
  10. UNUCKA, J., ŘÍHOVÁ, V. (2009): Modelování kvartérních fluvialních procesů s využitím GIS. In MĚKOTOVÁ, J., ŠTĚRBA, O. ed (2009): Říční krajina. ISBN 978-80-244-2358-6.