

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie**

**Charles University in Prague
Faculty of Science
Department of Physical Geography and Geoecology**

Doktorský studijní program: Fyzická Geografie a Geoekologie
Ph.D. study program: Physical Geography and Geoecology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Ph.D Thesis



RNDr. Jana Bernsteinová

**MODELOVÁNÍ PŘÍČINNÝCH PODMÍNEK LÁTKOVÉHO
TRANSPORTU
MODELING OF MASS TRANSPORT CAUSAL CONDITIONS**

Vedoucí závěrečné práce/Školitel: Doc. RNDr. Jakub Langhammer,
Ph.D.

Praha 2015

Abstract

The evidence of a flood wave passing through a catchment remains visible even for a long time after it occurs. The morphological update in the channel and floodplains, together with the processes related to the mass transport within the aquatic environment, can be regarded as flood event evidence. The advancement in hydroinformatics brought the development of numerical modeling as a tool for the solution of broad hydrological tasks. Thanks to the scenario modeling, flood events with interconnected processes can be explored in detail. This thesis is broadly focused on the mass transport initialization issue both in the polluted and clear middle-European water environments. The aim of the thesis is the evaluation of the principal issues connected with the mass transport initialization based on complex and integrated numerical modeling.

The thesis brings original datasets resulting from several case studies. The aim of the thesis is also to bring a comparative study of methodological approaches evaluating the possibilities and limits regarding the accuracy of inputs vs. outputs and computational time requirements. This thesis also brings several useful comparisons and innovative solutions design.

The mass transport initialization issue is solved in both balance and event-scale processed-based models. The partial outputs are the general water quality improvement measures designed to fulfill the European legislative requirements. The particular site-specific threshold values of the flow parameters necessary for the mass transport initialization are evaluated. Those values vary from 0.12 – 7.8 N•m⁻² in the case of the middle and the lower river reaches to 16.3 ± 8.2 N•m⁻² regarding the coarser gravels of the upper river reach.

In order to relate the causal hydrological conditions, the results were relativized by the statistical evaluation of the event return period (QN, Qm). Even though the causal conditions for the mass transport initialization are site-specific, the thesis aims to find regularities and link the different geographical sites regarding the mass transport initialization tendency.

The return period is used as the results' interconnecting parameter rather than a prognostic tool. Nevertheless, regarding hydrological non-stationarity, the influence of the trend behavior of the hydrological system due to the abiotic and biotic factors must be considered. The trend behavior can be representatively studied in the catchments without structural changes or where those changes are well-known. In the case of this thesis, the influence of the climate change and natural disturbances' effects on the hydrological process was studied. Even though the study did not prove any significant influence of the drivers on the high-flow events' magnitude, the increment of flooding frequency is obvious. From this statement, there is a clear underestimation of the remobilization frequency if the results will be used in a prognostic sense.

Key words:

Modeling · hydrology · mass transport · particle remobilization · pollution · balance · flood event

Abstrakt

Průběh povodňové vlny zůstává patrný v povodí ještě dlouho po události. Přímým důkazem jsou morfologické změny v korytě či inundaci a procesy spojené s transportem látek uvnitř ekosystému vodního toku. Rozvoj výpočetní techniky přinesl vývoj disciplíny matematického modelování pro řešení hydrologických otázek. Díky scénářovému modelování je v současné době možné detailně zkoumat průběh teoretických povodňových událostí a hodnotit následky s nimi spojené. Disertační práce se zabývá širokou problematikou inicializace látkového odnosu jak ve znečištěném, tak v čistém prostředí středoevropských vodních toků. Hlavním cílem studie je hodnocení zásadních témat spojených s inicializací látkového odnosu na základě komplexního využití a kombinování nástrojů matematického modelování. Práce nejen hodnotí samotné problémy definované v případových studiích a tím přináší originální datové výstupy, klade si však za cíl i srovnávat různé metodické přístupy a hodnotit limity a možnosti jejich využití co se týče podrobnosti vstupních dat, požadovaného měřítka výstupů či výpočetního času nutného pro numerickou simulaci. Díky tomu práce přináší řadu srovnávacích studií či inovativních řešení.

Problematika inicializace látkového transportu je řešena jak bilančně, tak epizodicky. Jsou navrhována opatření pro dosažení cílového stavu požadovaného evropskou vodní legislativou. Dále jsou řešeny konkrétní hraniční parametry proudění nutné pro remobilizaci pevných látek ať už inertních či zatížených toxickým znečištěním. Výsledkem studií je soubor místně specifických prahových hodnot smykového napětí v rozmezí $0.12\text{--}7.8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ v případě jemnozrnných sedimentů zatížených specifickým znečištěním, či $16.3\pm 8.2 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ v případě hrubozrnného materiálu na horním úseku toku.

Pro možnost srovnávání příčinných hydrologických podmínek byly výsledky relativizovány pomocí statistického vyhodnocení pravděpodobnosti opakování dané situace (Q_N , Q_m). Takto vyjádřená pravděpodobnost opakování referuje o současném stavu na základě zkušeností minulých let. I když jsou příčinné podmínky remobilizace látek závislé na místně specifických podmínkách proudění, práce si klade za cíl nalézt zákonitosti a propojení jednotlivých lokalit a srovnání potenciálu k uvolnění látek napříč různými geografickými regiony.

Hodnoty Q_N , Q_m byly v tomto případě využity pro srovnání výsledků aktuálního stavu, nikoliv pro prognózu potenciálního budoucího zatížení. Nicméně, pohybujeme-li se v nestacionárním hydrologickém prostředí, je nutné zahrnout či vyloučit existenci trendového chování hydrologického procesu způsobeného jak abiotickými, tak biotickými faktory. Trendové chování je možné sledovat pouze v prostředí bez zásadních strukturálních změn, či tam, kde jsou tyto změny známy. V tomto případě byl studován vliv klimatické změny a disturbancí přírodního prostředí na odtokové poměry se zaměřením na povodňové epizody. I když vliv na kulminační průtoky povodňových událostí nebyl prokázán, byl vyhodnocen nárůst frekvence povodňových událostí menšího rozsahu. Z tohoto závěru vyplývá podhodnocení rizika spojeného s vyhodnocením doby opakování remobilizace látek, v případě, že by se ukazatel uvažoval prognosticky.

Klíčová slova:

Modelování · hydrologie · látkový odnos · remobilizace látek · znečištění · bilance · povodňová událost

1. Úvod

Důkaz průchodu povodňové události zůstává v povodí ve formě fluviálně-morfologických změn. Podle Haddadchi et al. (2013a) 70-85% sedimentu transportovaného v suspendovaném stavu pochází z povrchové eroze, zatímco zdrojem hrubozrnějšího materiálu je především břehová eroze. Většina materiálu je transportována během povodňových událostí. Sediment je uvolněn a akumulován podle místně specifických podmínek poté, co jsou překročeny mezní hodnoty hydrodynamických parametrů, např. kritické smykové napětí pro erozi τ_c a pro depozici τ_d . Podle Buzek (2000) bylo během moravské povodně 1997 odpovídající Q100 transportováno 51% objemu suspendovaného materiálu celkově naměřeného ve sledovaném období 23 let. K podobným závěrům dospěly studie na středním Labi (Büttner et al. 2006; Schwartz 2006; Lair et al. (2009) potvrzuje tato zjištění dlouhodobým vyhodnocením bilance sedimentu hlavních evropských řek. Uvádí příklad 222 t jemnozrného erodovaného a odneseného materiálu z 32 km dlouhého úseku středního Dunaje při povodni 2002 odpovídající Q100. Na druhé straně je erodovaný materiál akumulován podél středních či dolních úseků v klidných vodách jezovích zdrží, v břehových partiích, či v lagunách v příbřežní zóně. Tyto klidné zóny slouží jako nádrže pro akumulaci sedimentu, který, je-li zatížen navázaným znečištěním, představuje výraznou ekologickou hrozbu. Dokumentace podobných akumulací je součástí studií ze středního Labe (Büttner et al. 2006; Krüger et al. 2006; Schwartz 2006) a horního Rýna (Jacoub & Westrich 2006). Znalost spouštěcích podmínek látkového odnosu je zásadní pro pochopení hydrologického procesu a jeho důsledků. Celá řada inženýrských studií měla za cíl změřit počáteční hydrodynamické podmínky pro vnos sedimentu v umělých fyzikálních žlabech (e.g. El Kadi Abderrezzak et al. 2014; Wilcock & Crowe. 2003). Výsledkem těchto studií je rekonstrukce přírodního procesu za podmínek do značné míry ideálních a často uvažujících pouze ustálené proudění.

Tyto podmínky se v přírodě většinou nevyskytují a mohou vést k přílišnému zjednodušení procesu a následně k jeho konceptualizaci do soustavy po většinou empirických vztahů. Vývoj v oboru hydroinformatiky umožnil implementaci teoretických znalostí do plně integrovaného systému nástrojů matematického modelování, který, je-li správně navržen a verifikován, může nadále sloužit pro řešení mnohých úkolů v rámci scénářového modelování.

Scénářové modelování je často založeno na konceptu stacionarity (absence trendu) hydrologického systému (Matalas 1998). Tento předpoklad vychází ze statistického vyhodnocení doby opakování/překročení z historických dlouhodobých časových řad, které se hojně využívá pro relativizaci hydrologických podmínek. Takže informace obdržené z minulých zkušeností slouží jako nástroj pro předpovědi stavu budoucího (Li & Duffy 2011). Na druhé straně, problém nestacionarity hydrologického systému je diskutován v řadě studií zabývajících se dlouhodobými změnami hydrologických podmínek (Dettinger and Cayan 1994; Hannaford and Marsh 2006; Wilby et al. 1997; Zampieri et al. 2014) a vlivem disturbancí krajiny a klimatických trendů na tyto změny (Alila et al. 2009; Kuraš et al. 2012; Zeng et al. 2014). Je tedy nezbytné, abychom pochopili povahu výsledků scénářového modelování v rámci nestacionárního hydrologického režimu (Van De Wiel et al. 2011) a abychom používali statistickou veličinu doby opakování /překročení spíše pro srovnání různých výsledků současného stavu než pro předpověď stavu budoucího.

2. Cíle práce

Hlavním cílem této práce bylo přispět ke znalosti modelování příčinných podmínek odnosu látek v říčním systému a diskutovat možné důsledky tohoto procesu vzhledem k environmentálnímu vlivu na prostředí vodních ekosystémů a na lidskou společnost. Dále byla definována řada dílčích cílů nezbytných pro získání potřebné znalosti a zkušenosti. Tyto dílčí cíle jsou:

- (1) určit a analyzovat rizikové procesy spojené s transportem látek v různých geografických podmínkách České republiky,
- (2) využít a kriticky zhodnotit dostupné softwarové vybavení a vhodnost kombinace jednotlivých nástrojů k sestavení vysoce komplexního modelovacího systému schopného popsat cyklus fluviaálně-morfologických změn. Tento systém by měl zahrnout jak příčiny, tak následky hydrodynamického procesu. Dále bylo cílem diskutovat možnosti těchto systémů a limitující faktory z hlediska schematizace a konceptualizace procesu na základě podrobnosti a přesnosti výsledků a citlivosti parametrizace modelovacího systému,
- (3) zpracovat regionální případové studie založené na problematice látkového odnosu a vytvořit tak cenná data pro zahraniční literaturu.

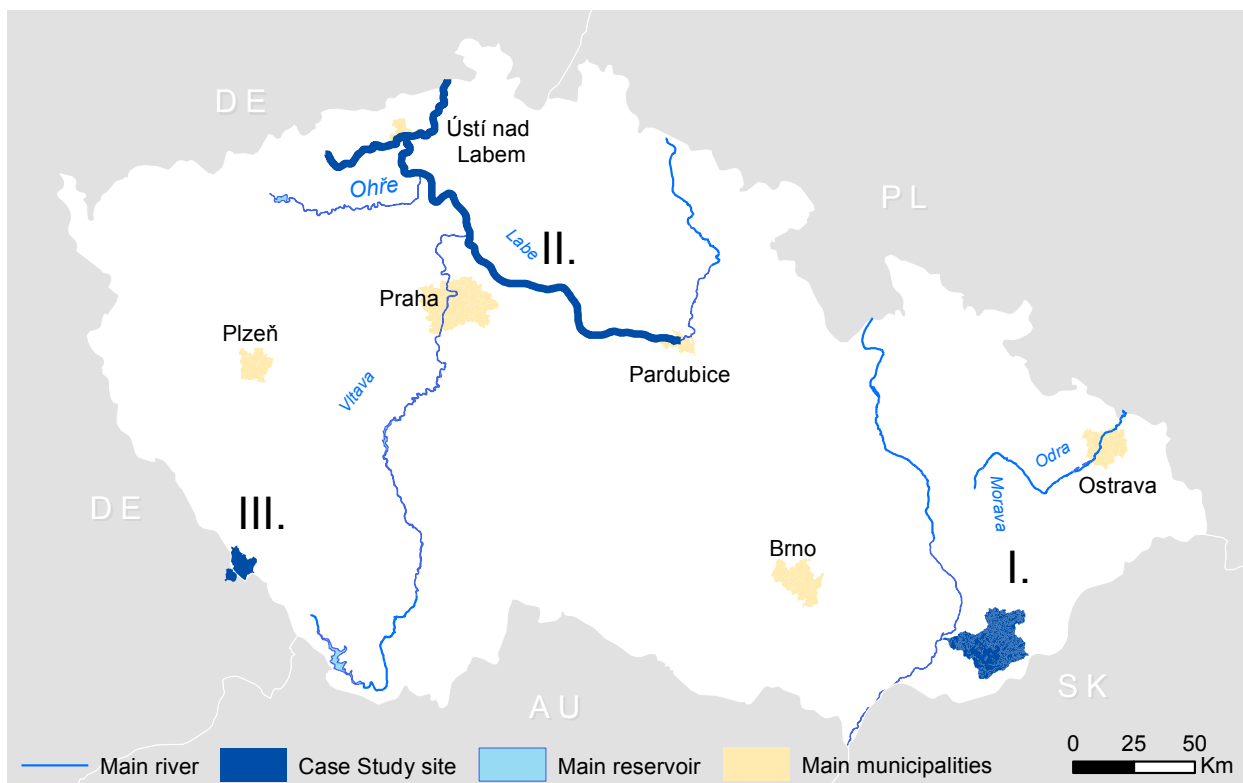
3. Materiál a metody

Aby byly naplněny cíle výše vytyčené, byly navrženy a zpracovány tři případové studie. Navržená metodika a zvolené postupy byly založeny především na výběru nástrojů matematického modelování v celé šíři od jednoduchých konceptuálních bilančních modelů kvality vody v měřítku celého povodí přes 1D modely popisu proudění až po vysoce komplexní fyzikálně založené modely transportu sedimentu v rámci 2D, nebo quasi 3D popisu nerovnoměrného proudění, nebo 3D modelu popisujícího celý hydrologický cyklus ať už v bilanční či v událostní podobě. Nicméně specifické úkoly, jako statistické vyhodnocení průtokových podmínek v nestacionárním hydrologickém systému, byly řešeny jinými metodami.

Případové studie byly zaměřeny na říční úseky rozdílných měřítek (micro-mezzo-macro) situované v různých fyzicko- a socio-geografických prostorech a s různými následky transportu látek na přírodní a socio-ekonomické prostředí. (Obr 1).

Případová studie I

Znečištění z nebodových zdrojů pochází nejčastěji ze splachů z orných půd. Částice, na které jsou navázány nutrienty, jsou transportovány do nižších částí povodí. Povodí řeky Olšavy patří k typickým zemědělským periferním oblastem České republiky. Ačkoliv došlo k výraznému zlepšení kvality vody v průběhu minulých dvaceti let, celkově nevyhovující stav stále naznačuje značné znečištění jak z bodových, tak z nebodových zdrojů. Model celého povodí byl sestaven, parametrizován a využit pro analýzu tohoto výrazného látkového odnosu založenou na scénářovém modelování (1) změn „land use“ a (2) zintenzivnění čištění komunálních odpadních vod. Důsledky navržených změn byly diskutovány především z hlediska dosažení celkového dobrého ekologického stavu definovaného evropskou legislativou, konkrétně rámcovou směrnicí o vodách WDF (2000/60/EC).



Obr 1: Lokalizace případových studií zahrnujících různé oblasti České republiky.

Případová studie II

Průmyslové a vysoce urbanizované areály jsou často umístěny v bezprostřední blízkosti vodních toků. Tyto zóny představují významný zdroj nebodového znečištění, často toxického charakteru. Transport rozpuštěných látek v povodí řeky Labe, která byla v období od 50. do 90. let minulého století považována za jednu z nejvíce znečištěných řek střední Evropy, podle van der Veen (2006) výrazně poklesl. Nicméně, jemnozrnné sedimenty průběžně ukládané v oblastech s nízkou rychlostí proudění (Schwartz 2006) vykazují extrémní hodnoty koncentrací těžkých kovů a látek specifického organického znečištění. Remobilizace tohoto sedimentu a následné uvolnění

navázaných látek do vodního ekosystému představuje závažnou environmentální hrozbu (Förstner et al. 2004; van der Veen 2006). Abychom mohli zhodnotit pravděpodobnost vznosu těchto uloženin, byly sestaveny 4 hydrodynamické modely, do kterých byly integrovány matematické vztahy popisující sediment transportu (úsek Labe od Pardubic po Hřensko, Bílina představující nejvíce znečištěný přítok). Modely řádně parametrizovány a verifikovány posloužily k simulaci sady syntetických okrajových podmínek. Výsledky byly nadále zpracovány a porovnány ve formě pravděpodobnosti opakování/překročení daného stavu.

Případová studie III

Výsledky předešlých studií jsou zatíženy současným/historickým stavem hydrologických podmínek v rámci předpokladu stacionárního hydrologického systému. V současné době není však pochyb o nestacionárním chování hydrologického systému způsobeném kombinací několika faktorů. Především se jedná o vliv klimatické změny a změny využití území. Pro analýzu těchto faktorů byla vybrána čistě přírodní povodí Vydry (CZ) a Große Ohe (GE), jež disponují unikátními dlouhodobými záznamy zachycujícími reálný vliv klimatické změny a změny vegetačního krytu. Javoří potok, situovaný v povodí Vydry v jádrové zóně Šumavy se svým vcelku mírným sklonem a s čistě přírodním charakterem koryta posloužil jako mikro-měřítková případová studie rozsáhlých fluvialně-morfologických změn, následků povodňových událostí s dobou opakování i 1 rok. Ačkoliv fluvialně-morfologické změny nepředstavují v tomto prostředí přímou hrozbu lidské společnosti, zůstávají viditelné jako stopa historické povodňové události. Hydrodynamický model byl sestaven s cílem zhodnotit pravděpodobnost spuštění látkového odnosu. Tento model byl integrován s modelem břehové eroze a transportu nekohezivního sedimentu a byl dále propojen s hydrologickým modelem širší lokality národního parku Šumava. Příčinné podmínky fluvialně-morfologických změn byly zkoumány a následně analyzovány z hlediska nestacionarity hydrologického systému, kvůli hodnocení možného vlivu již zažitých změn hydrologického procesu, či změn v budoucnu očekávaných. Urychlení procesu transportu látek by mohlo znamenat vážný problém jak pro osídlení nižších říčních úseků, tak pro dynamiku povodňových událostí. Řeka Volyňka v podhůří Šumavy se vyznačuje jak vysoce dynamickým říčním prostředím, tak vcelku hustým osídlením v bezprostřední blízkosti toku (Vimperk a přilehlé obce). Břehová eroze již způsobila poničení několika stavení a infrastruktury. Experimentální výsledky získané v třetí případové studii tedy nabývají i socio-ekonomického významu.

Nejdůležitějším úkolem bylo rozhodnutí, které procesy zahrnout do modelu (Van De Wiel et al. 2011). Modelář musí vždy rozumně bilancovat mezi prvky procesu numerického modelování, kterými jsou: (1) požadovaná přesnost a podrobnost výsledků, (2) náročnost řešení na vstupní data, (3) výpočetní čas (Obr 2). Nedostatek dat pro správný popis přírodního procesu a pro parametrizaci, kalibraci a verifikaci modelu je vždy jedním z nejvíce limitujících faktorů. Požadavky na vstupní data dramaticky rostou s nárůstem komplexity zahrnuté v modelu. (Aksoy & Kavvas 2005).

Problematika definovaná v případových studiích byla řešena nástroji pokročilého numerického modelování dostupnými ze skupiny aplikací MIKE by DHI. Tyto nástroje umožňují sestavení plně kompatibilního modelovacího systému pro popis příčin a následků hydrologické odezvy v měřítku jednotlivých lokalit či celých povodí. Na obrázku 3 je nastíněn vývojový diagram modelovacího systému sestaveného pro účely této disertační práce.

Approach	1D HD description with threshold shear stress evaluation	1D/1D+ HD description with ST simulation	2D HD description with ST simulation
Requirments	<ul style="list-style-type: none"> • Charasteristic cross-sections • Treshold flow conditions for sediment entrainment 	<ul style="list-style-type: none"> • Charasteristic cross-sections • Cross-sectional characteristic sediment 	<ul style="list-style-type: none"> • Detailed Bathymetry • Grid of sediment properties
Outputs	Mean stream velocity and probable conditions of sediment entrainment	Mean stream velocity and mean cross-sectional conditions for sediment entrainment	Description of the axial and radial flow component. And full sediment transport based on stream power and/or concentration profile

Obr 2: Příklad procesu volby metodologického přístupu (podrobněji popsáno v Kaiglová et al., 2015a). Metody hodnocení remobilizace sedimentu podle požadavků na vstupní data, výpočetního času a přesnosti obdržených výsledků.

Uprostřed systému je hydrodynamická simulace parametrů proudění v případě plně dynamického událostního modelování, která může být nahrazena zjednodušeným výpočtem proudění v rámci roční bilance látkového odnosu. Simulace je založena na výsledcích studie hydrologického modelování (Aksoy & Kavvas 2005), vstupujících do hydrodynamického modelu formou počátečních a okrajových podmínek. Konkrétně se jedná o hydrologickou situaci, která vede ke smykovému napětí proudění v toku a představuje ve schématu příčinu zahájení transportu látek. Následek procesu je simulován ve fluviálně-morfologické části schématu, konkrétně v rámci modelů kvality vody, transportu sedimentu a břehové eroze. Konfigurace modelovacích nástrojů tedy umožňuje dynamické zpracování výsledků simulace proudění (ať už hydrodynamického či bilančního charakteru) pomocí diferenciálních rovnic popisujících transport látek do každého výpočetního bodu.

Ačkoliv jsou některé části modelovacího systému propojeny jen jednosměrným tokem informací, potřeba simultálních běhů je zdůrazněna při modelování fluviálně-morfologických změn koryta, protože zde se v systému objevuje smyčka zpětné vazby. Fluviálně-morfologické změny jako výsledek jednoho časového kroku jsou totiž přímo vloženy do bathymetrie, která je hlavní doménou hydrodynamického modelu (e.g. Kiat et al. 2008, Simpson & Castelltort 2006, Yang et al. 2004).

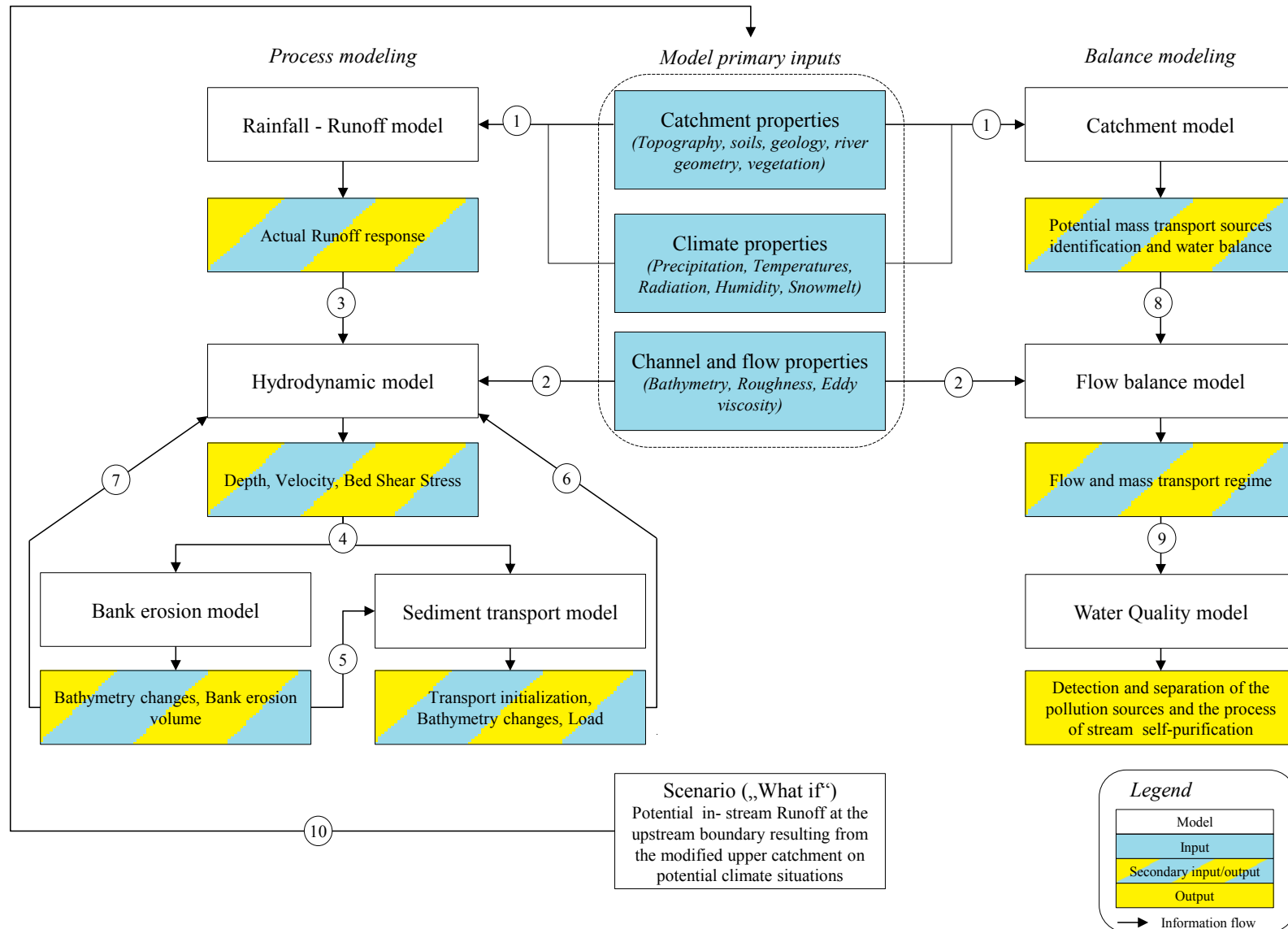
Z inženýrských studií na základě hydraulických žlabů víme, že pohyb sedimentu dané zrnitosti je započat právě tehdy, když smykové napětí překročí kritickou hodnotu. Nicméně, jak úspěšný je přenos těchto informací do reálné případové studie? A i když nalezneme dané příčné hydrologické podmínky, jak bychom měli hodnotit důležitost tohoto následku? Právě parametr pravděpodobnosti výskytu vyjádřený dobou opakování/překročení může sloužit pro zodpovězení druhé otázky. Při znalosti daných pravděpodobností bychom mohli být schopni srovnávat koryta v různých fyzicko-geografických podmínkách.

Diskutování nevhodnosti konceptu hydrologické stacionarity (Matalas 1998) mělo za cíl kvantifikovat a kvalitativně hodnotit vliv změn hydrologického režimu z důvodu klimatických

změn na problematiku látkového odnosu. Přírodní prostředí povodí Horní Vydry (profil Modrava), bylo zkoumáno spolu s Große Ohe (profil Schönberg) a Horní Große Ohe (profil Taferlruok) a testováno pro přítomnost změn odtokového režimu pozorovatelných z dlouhodobých časových řad. Hlavní otázka zněla: „Jak se mění distribuce odtoku během roku a co tyto změny znamenají pro frekvenci a kulminační hodnoty povodňových událostí?“ Neparametrický Mann-Kendal test (Hirsch et al. 1982) byl aplikován na všechna meteorologická hydrologická data. Výsledkem testu bylo potvrzení či vyvrácení existence monotematického trendu. Sen's (Gilbert 1987) neparametrická metoda byla využita pro stanovení sklonu případného lineárního trendu.

Detailní popis jednotlivých toků informací, znázorněných na obrázku 3 (6-11):

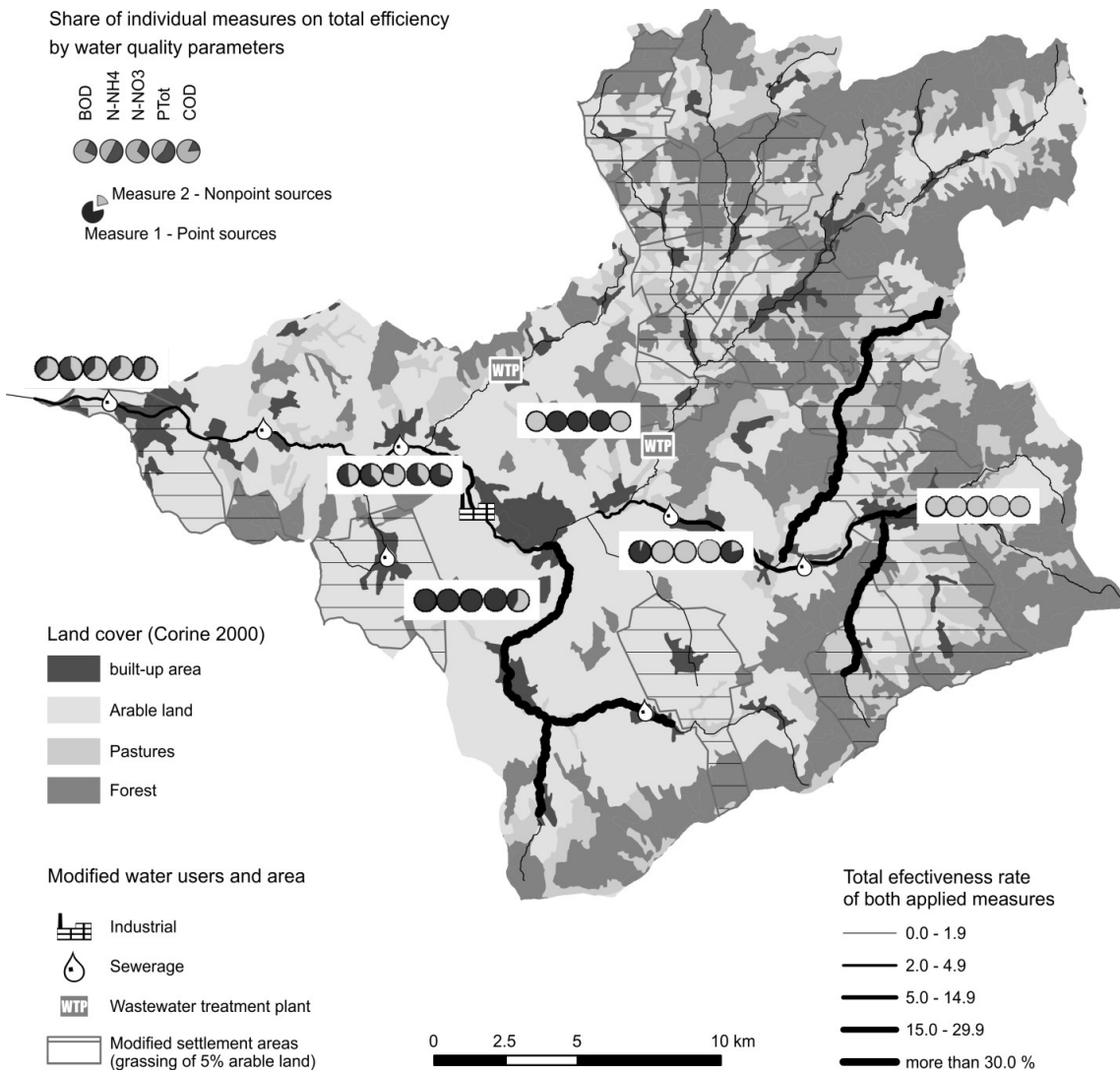
- (1) Primární vstupní data pořízena terénním šetřením či monitoringem. Neměnné vlastnosti povodí jsou v modelu interpretovány jako stavební bloky, zatímco časově proměnlivé vlastnosti systému vstupují jako časové řady formou okrajových podmínek.
- (2) Dalšími primárními vstupy jsou hydraulické vlastnosti vstupující do hydrodynamické simulace nebo do bilančního výpočtu odtoku formou parametrů, jejichž definice je do značné míry ovlivněna schematizací modelu. Tyto vlastnosti se mohou měnit s intenzitou povodňové události (Jiřinec P. 2014; osobní komunikace)
- (3) Odtoková odezva jako výsledek hydrologické simulace vstupuje ve formě časových řad do hydrodynamického modelu jako horní okrajová podmínka.
- (4) Parametry proudění jako výsledek hydrodynamické simulace vstupují do modelů břehové eroze a parametry sedimentu transportu jako proměnné transportních rovnic.
- (5) Objem materiálu uvolněného břehovou erozí vstupuje do modelu transportu sedimentu jako zdroj nezpevněného sedimentu.
- (6), (7) Morfologické změny vypočtené v modelech transportu sedimentu a břehové eroze jsou v každém časovém kroku využity pro odpovídající změnu bathymetrie, základní domény hydrodynamické simulace.
- (8) Potenciální zdroje znečištění a jejich objem vyhodnocený bilančním modelem povodí jsou propojeny s modelem bilance odtoku.
- (9) Látky jsou transportovány podle průměrných odtokových podmínek vyhodnocených bilančním modelem a jsou degradovány podle konceptu rozpadu prvního řádu. Po řádné verifikaci je model schopen poskytnout informace o charakteristických koncentracích, režimu odtoku, celkovém odnosu látek a o podílu bodových vs. nebodových zdrojů znečištění a struktury každé ze skupin.
- (10) Po verifikaci celého schematu může být navržen scénář změny primárních vstupů do modelu. Výsledky scénářového modelování mohou být porovnány s výsledky, které poskytuje model současného stavu. Takto dostaneme odhad účinnosti navržených změn.



Obř 3: Návrh komplexního systému modelovacích nástrojů pro řešení látkového odnosu. Poznámka: toky informací (očíslovány 1-10) jsou vysvětleny v textu

4. Výsledky a diskuze

Na kvalitativní aspekt látkového odnosu lze pohlížet z dvou různých úhlů pohledu: (i) Lair et al (2009) řeší transport látek pocházejících z nebodových zdrojů, které jsou mobilizovány při povodňové aktivitě, zatímco (ii) Nilsson & Malm-Renöfält (2008) spíše vyzdvihuje problémy způsobené menší intenzitou ředění a samočištění během malých průtoků. Bilanční model kvality je schopen při zahrnutí hydrologického režimu celého roku řešit oba aspekty zároveň a byl proto využit pro zpracování Případové studie I. Ve venkovském povodí řeky Olšavy bylo navrženo několik scénářů pro zlepšení kvality vody podle požadavků evropské legislativy. Tyto scénáře byly srovnávány s modelem současného stavu. Model testoval účinnost opatření zahrnujících znečištění jak z bodových, tak z nebodových zdrojů, nebo jejich kombinaci. Scénáře na zmírnění znečištění vod byly založeny (i) na zavedení čištění odpadních vod (ČOV) z drobných komunálních zdrojů a aplikaci terciárního stupně ČOV z velkých komunálních zdrojů; (ii) na zatravnění orné půdy s velkým rizikem eroze (Obr 4).



Obr. 4. Celková účinnost dvou opatření aplikovaných na model současného stavu kvality vody v povodí Olšavy v rámci parametrů BOD₅, N-NH₄⁺, N-NO₃, P_{total} a COD. (Případová studie I)

Druhotným výstupem modelu kvality vody byla kvantifikace nebodových zdrojů znečištění na bázi ročních úhrnů odnosu látek z povodí a jeho sezónního chodu. Případová studie I představuje tedy *bilanční* model nebodového znečištění. Nicméně studie Aksoy & Kavvas (2005), Buzek (2000), Schwarz (2006) tvrdí, že nebodové znečištění pochází především ze splachu plochy povodí během *občasných povodňových událostí*. Transport látek během povodňových událostí byl zahrnut jako hlavní záměr Případové studie II.

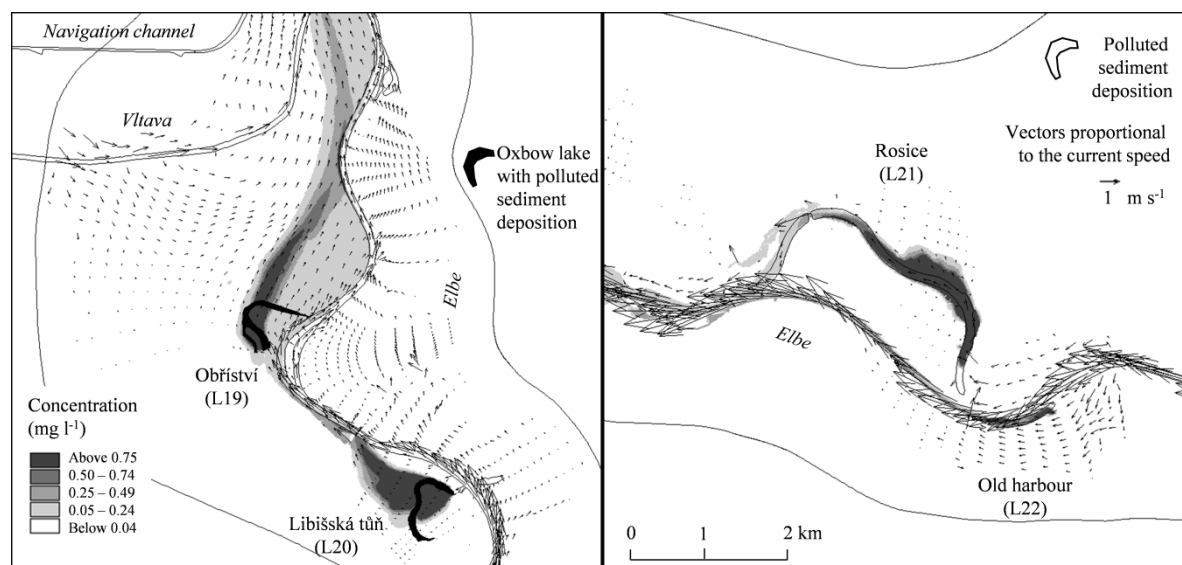
Primárním účelem Případové studie II bylo identifikovat hraniční podmínky pro potenciální remobilizaci znečištěného sedimentu v rozdílných prostředích s jednotným problémem. Podle Lair et al. (2009) má znečištění inundací závažný vliv na integritu sladkovodních ekosystémů. Je to způsobeno nepředvídatelností nebodového znečištění jak z hlediska časování, tak z hlediska rozsahu. Aby byli vodohospodáři schopni zvážit všechny hrozby spojené s transportem látek z povodí, musí mít detailní informace o klíčových zdrojích látek. Může to být jak přímé znečištění, které dosáhne vodního toku během povodně, či nepřímé („sekundární“) znečištění způsobené uvolněním polutantů uložených v komplexech částice-polutant uložených ve starých fluviálních sedimentech. Takové uložení mohou být remobilizovány zpravidla při povodňové aktivitě hlavního toku, proto řešení tohoto problému vyžaduje hydrodynamický přístup. Příklad řešení je uveden právě v případové studii II zabývající se transportem látek ze silně antropogenně upravených úseků v povodí Labe.

Ačkoliv řešení podobných problémů nalezneme v literatuře (Büttner et al. (2006); Jacoub & Westrich (2006); Lair et al. 2009), tato studie byla první studií numerického modelování silně znečištěných jemnozrnných sedimentů v ČR takového rozsahu. Dílčím cílem studie bylo tedy sestavit a verifikovat metodologický přístup k řešení jednotlivých případů. Hlavními předpoklady studie byly (i) limitovaná dostupná data a (ii) potřeba návrhu řádné jednotné metodiky pro hodnocení a srovnání vzdálených lokalit s rozdílným hydrologickým a hydraulickým režimem. Remobilizace jemnozrnného sedimentu byla vyhodnocena v modelech s různou schematizací horizontálního plánu (1D, 1D CS distribuovaný, 1D+ a 2D). Všechny modely byly založeny na výpočtu rovnic „shallow water“, využívajících modelovací přístupy s průměrnou vertikální komponentou. Porovnání výsledků obdržných jednotlivými metodami je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1 Srovnání výsledků obdržných z vyhodnocení 1D CS Distribuovaných map smykového napětí a vypočtených při zahrnutí transportu sedimentu v rámci schematizace 1D+ a 2D. (Případová studie II)

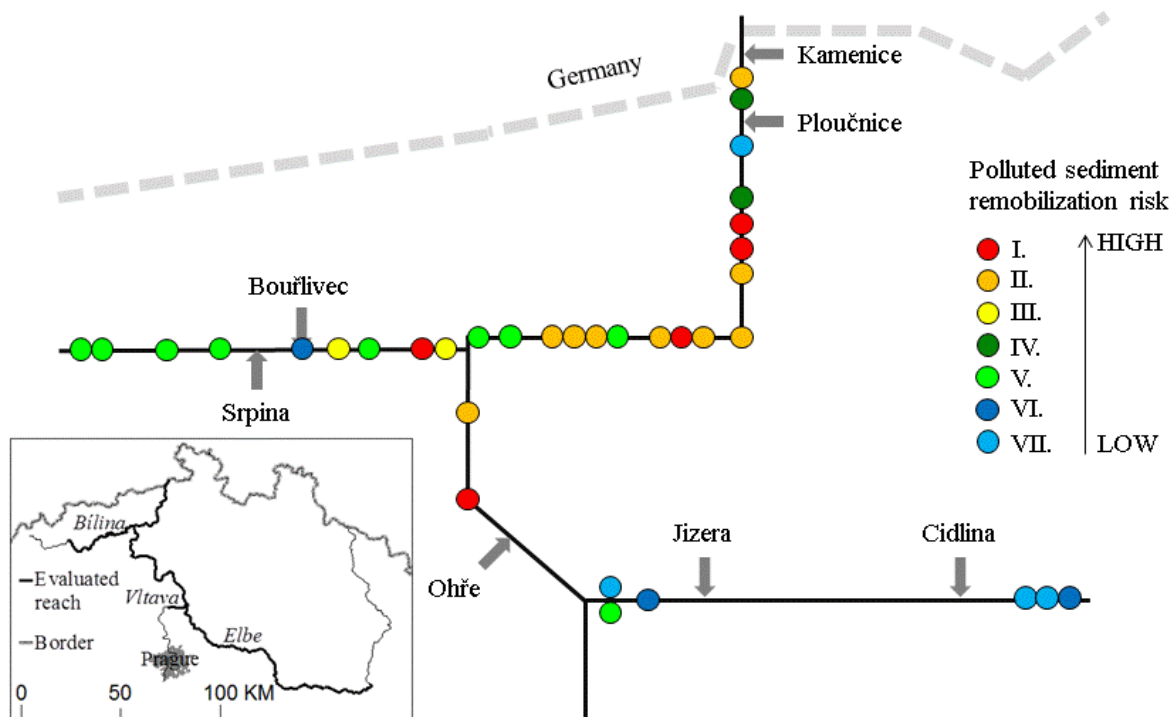
ID lokality	Popis lokality	τ [N m ⁻²]			Q [m ³ s ⁻¹]		
		1D CS distribuovaný	1D+	2D	1D CS distribuovaný	1D+	2D
B9-1	Pod jezem	0.8	1.3	1.0	5.0	7.4	5.8
B9-2	Nad propadlým mostem	0.8	1.5	0.8	3.6	4.0	3.8
B9-3	Pod propadlým mostem	1.0	1.3	1.1	4.5	7.9	7.9
B8-1	Břehové oblasti	1.0	1.1	1.0	7.0	8.1	8.0

Hlavním přínosem Případové studie II je soubor výsledků tendence k remobilizaci jemnozrnných sedimentů v 31 znečištěných oblastech.



Obr. 5. Remobilizace jemnozrnných sedimentů ze dvou vybraných lokalit. Vlevo je zobrazena lokalita L19 a L20 mezi chemičkou Spolana a soutokem Labe s Vltavou. Sedimenty jsou již progresivně erodovány 1.5 dne v lokalitě L19 (Obříství) a 10 hod v lokalitě L20 (Libišská tůň). Záplava pochází z labské syntetické povodně odpovídající Q50 (průtok Labe je $1480 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, zatímco na Vltavě dosahuje $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Napravo je vyobrazena situace na lokalitách L21 a L22 po proudu od rafinerií Paramo. Sedimenty jsou erodovány po zaplavení z horní inundace (průtok Labe je $912 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). (Případová studie II)

Soubor výsledků modelovacích studií (Obr 5) nabývá na mezinárodním významu, protože se jedná o první klasifikaci hrozby sekundárního znečištění způsobeného starými ekologickými zátěžemi na severu České republiky. Podle našeho vyhodnocení dochází k remobilizaci jemnozrnného sedimentu během protékání lokality s tranzitním prouděním. N-letost příčinných hydrologických podmínek byla vyhodnocena v širokém intervalu od < 1 rok v nejméně stabilních oblastech až po >100 let v oblastech, kde k remobilizaci došlo až po přetečení vysokého tělesa, oddělujícího lokalitu od transitního proudění. Statistické vyhodnocení vymezuje oblasti zvláštního zájmu, z nichž většina je lokalizována do 35 km od hranice s Německem. Příčinných průtoků je dosaženo i během 150 dní v průběhu průměrného roku. Parametry proudění při remobilizaci byly pozorovány v rozmezí $0.12\text{--}0.89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v případě vertikálně průměrných rychlostí a $0.12\text{--}7.8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ v případě smykového napětí. Jak je patrné z kvalitativních rozborů, sediment je na všech sledovaných lokalitách zatížen četnými toxickými látkami, vyskytujícími se v alarmujících koncentracích. Environmentální aspekty obdržených výsledků jsou tedy diskutovány s ohledem na hrozbu sekundárního znečištění níže položených vodních ekosystémů.

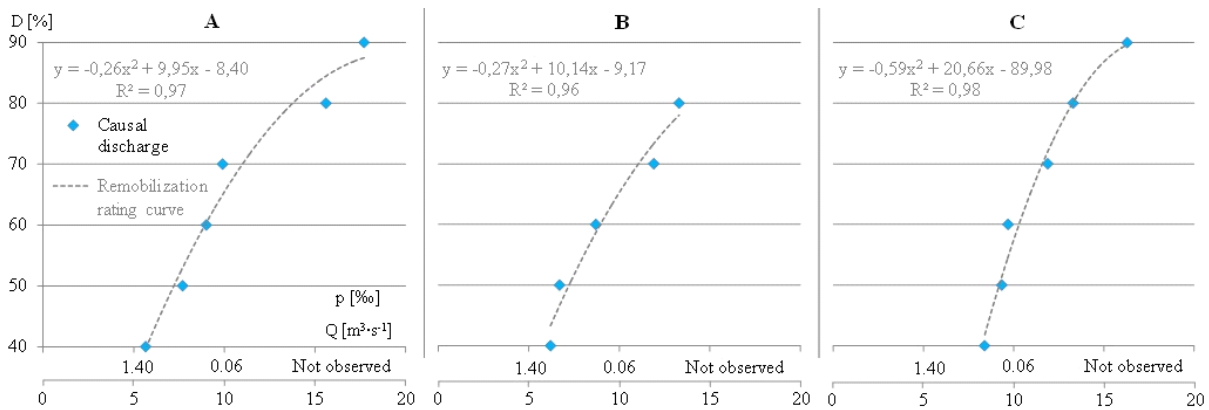


Obr. 5. Schéma říční sítě se zahrnutím všech hodnocených lokalit klasifikovaných na základě příčinných podmínek remobilizace jemnozrnných sedimentů. Zájmové lokality jsou zobrazeny a očíslovány od hraničního profilu ve vzestupném pořadí (Případová studie II).

Metody z Případové studie II byly v mírně pozměněné podobě použity při zaměření na transport pevných inertních částic (sedimentu) v rámci Případové studie III. Studie hodnotí tendenci vysoce přírodního toku Javoří potok k remobilizaci štěrkového materiálu a následně má za cíl detekovat příčinné podmínky fluvialně-morfologických změn. Remobilizace štěrkového dnového materiálu byla způsobena lokálními vertikálně průměrnými rychlostmi $1.8 \pm 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vedoucími ke zbytkovému smykovému napětí ($\tau_e = \tau - \tau_c$) $16.3 \pm 8.2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. N-letost daných průtoků nelze z krátké časové řady pozorování v místě instalovaného hladinoměru jednoduše vyhodnotit. Nicméně, povodňová událost zaznamenaná v červnu 2013, která byla využita jako reálná okrajová podmínka, rovnoměrně zasáhla povodí většího řádu (Horní Vydra, profil Modrava), kde je dlouhodobé měření s oficiálním vyhodnocením N-letých průtoků k dispozici. Příčinné lokální průtokové podmínky byly tedy vztaženy k datům oficiálního monitoringu a výsledná N-letost dané situace byla vyhodnocena v intervalu $Q_1 - Q_3$.

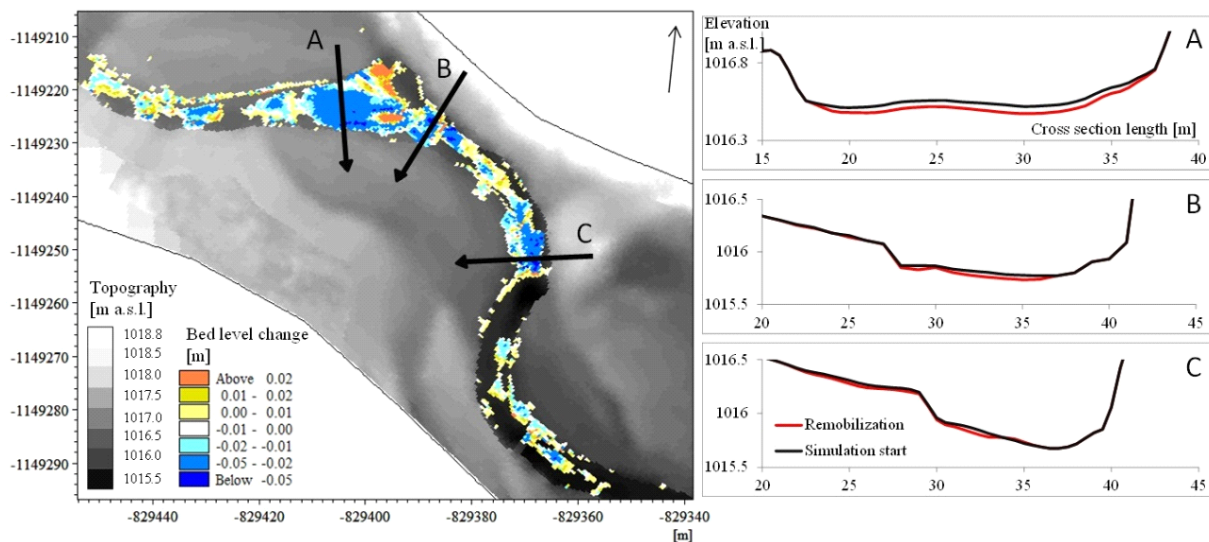
Podle Jacob & Westrich (2006) by měla být modelem hodnocena zvláště každá frakce sedimentu i když tento přístup podhodnocuje vzájemné interakce jednotlivých frakcí a může vést ke zkreslení výsledků. Parametry zrnitosti vstupující do modelu byly tedy měněny za účelem popisu remobilizace jednotlivých frakcí. Remobilizační kritérium bylo vyhodnoceno pro každou frakci ($D_{40} - D_{90}$). Metoda vztažení uvolnění místně specifických zrnitostí k příčinným hydrologickým podmínkám byla navržena a nazvána „Přepočtení křivky remobilizace“. Tato metoda shrnuje jednotlivé výsledky lokality do obecné charakteristiky úseku (Obr 7) Proto by

metoda mohla sloužit k posuzování tendence k výskytu fluvialně-morfologických změn v různých úsecích a k jejich vzájemnému porovnání.



Obr. 7: Přepočtení křivky remobilizace sestavené na profilových lokalitách (A, B, C) na základě frekvence výskytu příčných podmínek remobilizace dané frakce (Případová studie III).

Porovnáním morfologie koryta před a po povodňové události může být vyhodnocen objem erodovaného materiálu (e.g. Eaton & Lapointe 2001). Tento objem může být nadále porovnán s výsledky numerické simulace (Obr 8). Nicméně, výskyt povodňových událostí je vysoce nepředvídatelný. Proto je většinou přesná geometrie koryta před a po povodni neznáma. Technologie dálkového průzkumu mohou vyřešit tuto absenci detailních topografických dat, protože mohou mapováním pokrýt mnohem větší oblasti než tradiční geodetický průzkum. Případová studie III profituje z disponování vysoce detailními daty korytové morfologie, pořízenými UAV fotogrametrií (Mírejovický 2012-2014, nepublikované výsledky) před a po povodňové události.



Obr. 8: Vyhodnocení remobilizace při uvažování parametru D_{50} jako charakteristické zrnitosti. Vlevo je horizontální plán se zobrazenou změnou bathymetrie při splnění remobilizačního kritéria. Vpravo jsou odpovídající příčné řezy zobrazující stav před a při remobilizaci.

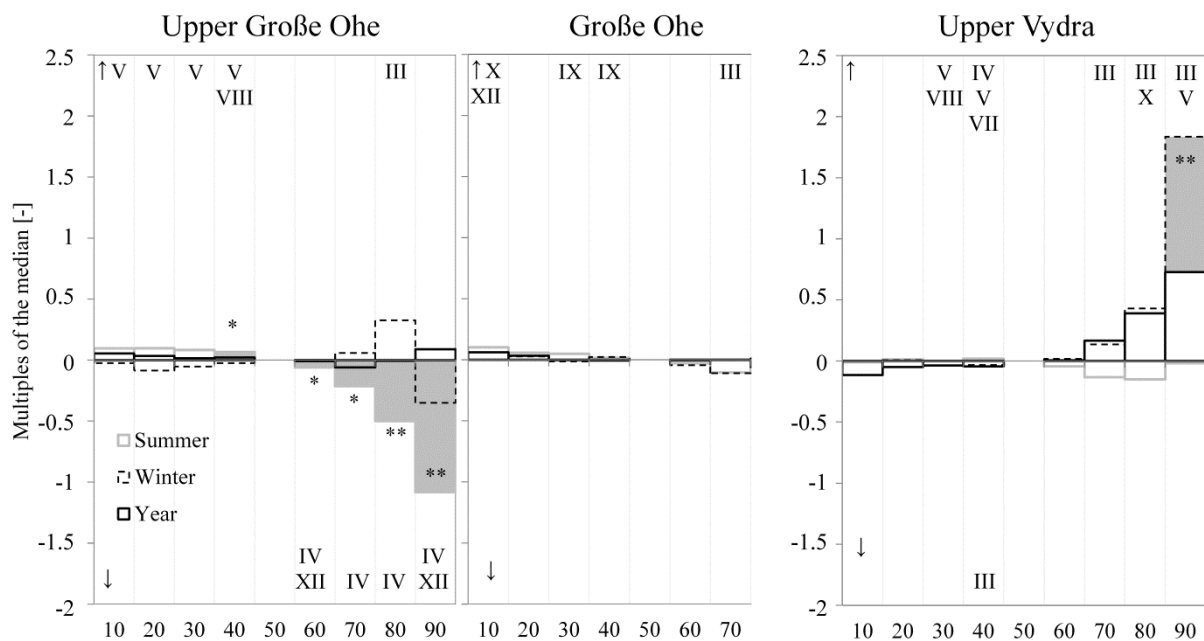
Díky statistickému vyhodnocení mohou být porovnávány i výsledky vzdálených oblastí z různých geografických prostředí. Tak získáme přehled o stabilitě jednotlivých úseků a prvotní průzkum problematiky látkového transportu. Případová studie I přinesla informace o průměrných transportních podmínkách nepřímo vyvozených z koncentrací jednotlivých látek v toku. Případové studie II a III se detailněji zabývají specifickými podmínkami proudění, které způsobují inicializaci transportu látek.

I když se nebudeme řídit tvrzením Papalexioi et al. (2013), že doba opakování extrémních hodnot průtoku, vyhodnocena za použití Gamma rozdělení, je podhodnocená, takže vyjímečné vysoké průtoky nejsou tak ojedinělé, jak vychází ze statistického vyhodnocení, nalezneme ještě jeden problém při používání doby opakování jako predikční veličiny. Všechny výsledky této studie (srovnané na základě doby opakování výskytu daných situací) jsou zřejmě založeny na předpokladu hydrologické stacionarity, které je v hydrologii podle Matalas (1998) nemožné dosáhnout. Hydrologii nazývá „*Manifestací klimatu*“. Proto vyvstala potřeba diskutovat význam a problematiku interpretace našich výsledků na základě hodnocení stacionarity našeho systému. V každé zkoumané oblasti jsou samozřejmě jiné faktory, způsobující trendové chování hydrologického systému. Tyto faktory/příčiny je možné členit na přírodní (klimatická změna, přírodní disturbance krajiny) a antropogenně podmíněné (úprava koryta, změna využití krajiny...). Bylo nutné tuto studii zaměřit na „*přírodní*“ faktory, které jsou přítomné v celé Střední Evropě. Takové faktory je možné celkem jednoduše popsat v rámci numerických modelů a lze jim nejpříměji rozumět při interpretaci výsledků analýzy dlouhodobých časových řad. Podle Lu et al. (2013), který studoval odezvu odnosu látek na klimatickou změnu, 1% změna srážek způsobuje 2% změnu v intenzitě odnosu látek. Proto byly časové řady srážek hodnoceny spolu s řadami teplot, průtoků a změn využití území. Účelem studie bylo rozpoznat dynamický vývoj každé ze složek odtokové odezvy.

Problematika byla studována v přírodě velmi blízkých povodích (Případová studie III), ležících v jádrových oblastech NP Šumava a NP Bavorský les, kde jsou v současné době velmi diskutována témata vlivu klimatické změny (regionální faktor) a disturbance lesa, způsobené větrnými polomy a kůrovcem (lokální faktor), na přírodní prostředí. Ačkoliv se řada studií zabývala vlivem působení kůrovcové kalamity na biodiverzitu (Jonášová & Prach 2004; Müller et al. 2010), kvalitu vody (Beudert et al. 2015) nebo odrazivost povrchu (Hais 2003; Hais et al. 2009), efekt vlivu kůrovce na odtok stále není zřejmý.

Prvním předpokladem by mohl být zřejmý vliv kůrovcové kalamity na celý hydrologický režim horského pásma, který by měl významný vliv na fluviální procesy pozorované v zájmové lokalitě Javořího potoka. Nicméně, hydrologická analýza tří povodí Šumavy a Bavorského lesa (Horní Vydra, Große Ohe a Horní Große Ohe) prokázala na všech třech povodích pouze drobné změny v celkových ročních odtokových výškách. Toto tvrzení je v souladu s nevýznamnými změnami srážkových úhrnů a přivedlo nás k bližší analýze trendového chování v rámci variability uvnitř roku a v rámci ročních čar překročení průtoků. Tato detailní analýza měla za úkol zjistit změny kulminačních průtoků a frekvence výskytu povodňových událostí následně ovlivňujících fluviální procesy v experimentálním úseku Javořího potoka. Hlavním zjištěním Případové studie III je nárůst nízkých průtoků v pozdním létě/brzkém podzimu, zatímco celkové roční úhrny odtoku se nezměnily. Toto tvrzení podtrhuje významný pokles evapotranspirace na vážně poškozených stanovištích. Tento pokles souvisí s nárůstem infiltrace a perkolace do hlubších vrstev během letní sezóny a je pravděpodobně spojen s výskytem kůrovcové kalamity. Důkazem je nárůst odtokového koeficientu o 9%. Na druhé straně byl zaznamenán výrazný

nárůst únorových (+1.8°C) a dubnových (+4°C) teplot, který byl způsoben urychlením jarního tání a statisticky významným nárůstem odtoku a vysokých průtoků v měsíci březnu. Tento nárůst byl pozorován napříč měřítky, nadmořskými výškami, krajinným pokryvem a jeho změnou. Úhrny a intenzita srážek zůstaly beze změny. Trend nárůstu dubnových teplot byl reportován z pozorování dlouhodobých časových řad už v článku Bässler (2008), který umístil prvopočátek existence tohoto trendu do roku 1961. Nejvýraznější trend byl pozorován v období od roku 1980, což mohlo podle Bässlera podpořit aktivitu kůrovce. K podobným výsledkům vzorce teplotních změn dospěl Kliment et al. (2011) i v jiných pramenných oblastech České republiky.



Obř. 9: Trendy relativních percentilů odtoku (P10 – P90) v období od 1978 – 2011: šedě jsou vyplněny percentily statisticky významné, kdy p je minimálně ≤ 0.05 ; $p \leq 0.05$: *, $p \leq 0.01$: **. Jednotlivé měsíce (římské číslice), kdy byl vyhodnocen trend ($p \leq 0.05$), jsou zobrazeny v horní (nárůst) a dolní (pokles) části obrázků.

Frekvence povodňových událostí vykazuje v Případové studii III mírný nárůst. Nicméně kulminační průtoky zůstávají beze změny. To by mohlo znamenat celkové podhodnocení rizikového procesu spojeného s transportem látek z povodí. Na druhé straně chytrým hospodařením s vodními toky spojeným se zmírňováním povodňových rizik by nemělo dojít k nárůstu objemu látek v průměru transportovaných jednou událostí z přírodního důvodu. Z Případové studie I je patrné, že objem nežádoucích transportovaných látek pocházejících ze splachu plochy povodí by mohl být redukován při implementaci strategií vyžadovaných evropskou legislativou. Nicméně, bude třeba aplikovat četná opatření pro zmírnění hrozby sekundárního znečištění ze starých ekologických zátěží. Výsledky případové studie II mohou sloužit jako základ pro vymezení problematických oblastí a prioritizaci návrhů opatření.

5. Závěry

Práce se zabývá problematikou inicializace látkového odnosu. Téma bylo řešeno metodami numerického modelování za pomoci nástrojů vybraných z celé řady dostupných software. Komplexní modelovací systém byl navržen a využit v různých prostorových i časových měřících (Případová studie I, II, III). Jednotlivé přístupy k modelování byly srovnávány a diskutovány z hlediska požadavků na vstupní data, výpočetní čas a přesnost výsledků v rámci tří Případových studií. Případové studie byly navrženy tak, aby se zabývaly různorodými rizikovými procesy spojenými s inicializací transportu látek, které lze očekávat v podmínkách Střední Evropy. *Model bilance látek* (Případová studie I) byl sestaven v typickém periferním rurálním povodí řeky Olšava, zatímco epizodické modely simulující nestacionární povodňové události byly sestaveny nejprve ve *znečištěném* prostředí řek Labe a Bíliny (Případová studie II) a dále v *přírodním* prostředí jádra Šumavy (Případová studie III)

Výsledkem Případové studie I je diferenciací zdrojů znečištění, kvantifikace skupiny nebodových zdrojů a sestavení souboru opatření, pro zlepšení kvality vody v toku. Případová studie II a III přináší informace o místně-specifických příčinných podmínkách proudění nezbytných pro uvolnění pevných částic. Hodnoty příčinného smykového napětí byly pozorovány v širokém intervalu $0.12\text{--}7.8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ v případě jemnozrnných sedimentů na středním a dolním toku (Případová studie II) a $16.3\pm 8.2 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ v případě hrubozrnného štěrku horního úseku (Případová studie III). Tyto částice byly silně znečištěné v Případové studii II a inertní v Případové studii III.

Kromě toho byla diskutována nestacionarita přírodního srážko-odtokového procesu (Případová studie III), konkrétně vliv klimatické změny a disturbance lesa (kůrovcová kalamita a polomy). Nebyla pozorována významná změna kulminačních průtoků, ale byl prokázán nárůst frekvence výskytu povodňových událostí v důsledku těchto přírodních změn.

1. Introduction

The evidence of the high flow event remains within the catchment in the form of qualitative changes of the fluvial morphology. Haddadchi et al. (2013a) states that 70–85 % of sediment transported as a suspended load originates from surface erosion while coarse sediment originates mostly from bank erosion processes. The majority of the material is transported during high-flow river activity. Sediments are mobilized and accumulated accordingly to the local flow conditions, once they exceed the threshold values, e.g. critical shear stress for erosion τ_c and deposition τ_{cd} . According to Buzek (2000), the Moravian high-flow event observed in 1997, which had a return period of 100 years (further used as RP), transported 51 % of the total suspended material within the recorded period of 23 years. Similar findings result from the studies on the Middle Elbe (Büttner et al. 2006; Schwartz 2006). Lair et al. (2009) prove the findings by long-term evaluation of the sediment balance of the main European rivers giving an example of 222 t of fine-grained material eroded and transported from the 32 km-long river reach of Danube River in the year 2002, with a flood event with an RP of 100 years. As the opposite aspect of the process and as a consequence, there are many calm water zones along the middle and lower reaches that serve as a reservoir for the particle-mass bound complexes representing various ecological threads. Documentation of such deposits can be found in studies of the Middle Elbe (Büttner et al. 2006; Krüger et al. 2006; Schwartz 2006) and Upper Rhine (Jacoub & Westrich 2006).

The knowledge of the triggering conditions for the mass transport occurrence is crucial for the understanding of hydrological process and adequate consequences. Many engineering studies have been performed in order to measure the initial hydrodynamic conditions for sediment movement (e.g. El Kadi Abderrezzak et al. 2014; Wilcock & Crowe. 2003) or the influence of soil properties on erosion (Bryan 2000) in fully- or semi-artificial channels. Those studies bring knowledge about the reconstruction process under ideal conditions and often steady-state hydrodynamic conditions. Those conditions are hardly experienced in nature, and can lead to process generalization and conceptualization into mostly empirical mass transport formulae. The innovation process in hydroinformatics enabled the incorporation of the theoretical knowledge base into fully-integrated modeling systems, once they were well-designed and properly verified as suitable for numerous solutions within scenario-based modeling.

Scenario modeling often uses the concept of hydrological stationarity (Matalas 1998). An example of the utilization of the hydrological stationarity concept is the return period assessment. This broadly-used relativization of hydrological conditions is based on the statistical evaluation of the long-termed historical time series. Thus, the information obtained by the last epoch evaluation tends to serve as the prediction tool (Li & Duffy 2011). However, the non-stationary hydrologic behavior is discussed within the topics of long-term observation of runoff changes (Dettinger & Cayan 1995; Hannaford & Marsh 2006; Wilby et al. 1997; Zampieri et al. 2015) and the role of landscape disturbances and climatic trends in the hydrological cycle (Alila et al. 2009; Kuraś et al. 2012; Zeng et al. 2013). It is therefore necessary to understand the nature of the results obtained by scenario modeling within the non-stationary hydrological regime (Van De Wiel et al. 2011) and to use the return period assessment as a tool for actual state results comparison more than a prediction tool.

2. Aims of the study

The main aim and motivation for the study was to contribute to the understanding of the causal conditions of the mass transport initialization and to discuss the possible consequences of this process regarding the environmental impact on the aquatic ecosystems and human society. Several partial goals were fulfilled in order to gain the necessary knowledge base. Those partial goals were namely:

- (1) to detect and analyze risk processes connected with mass transport in various geographical conditions of the Czech Republic;
- (2) to use and critically discuss the available software packages and their combination in order to design highly complex modeling systems with the ability of the mass transport description regarding the causes and consequences. To discuss the possibilities of these systems and limiting factors of the process generalization, conceptualization and schematization;
- (3) to process the regional case studies based on the mass transport phenomena and create valuable data for international literature.

3. Material and methods

In order to fulfill these goals, three case studies were designed and processed. The methodological design was mostly based on the modeling tools. The methods cover the simple conceptual WQ balance model at the catchment scale, 1D models of the flow description up to highly complex models of the sediment transport induced by the 2D or quasi-3D unsteady flow or the 3D model of the entire hydrological cycle. Specific issues were resolved through other methods, such as statistical evaluation of the runoff conditions in the non-stationary hydrological regime.

Case studies were focused on the 4 river reaches of various scales (micro-mezzo-macro) located within different physical and socio-geographical regions with different consequences of mass transport on the natural and socio-economic environment (Fig 1).

Case study I

Non-point pollution mostly derives from arable land wash. The particles, bound with nutrients, are transported downstream the catchment. The catchment of the Olšava River belongs to a typical rural peripheral area of the Czech Republic. The WQ, although improved significantly in last two decades, still expresses high levels of pollution by both point and non-point sources. In order to analyze the causes of extended mass transport, the basin scale model was set up, parameterized, and further used for the scenario modeling under land use variation and waste water treatment intensification. The consequences of such possible changes were discussed regarding the impact on the riparian settlement and overall good ecological status defined by the European legislative, chiefly the WDF (2000/60/EC).

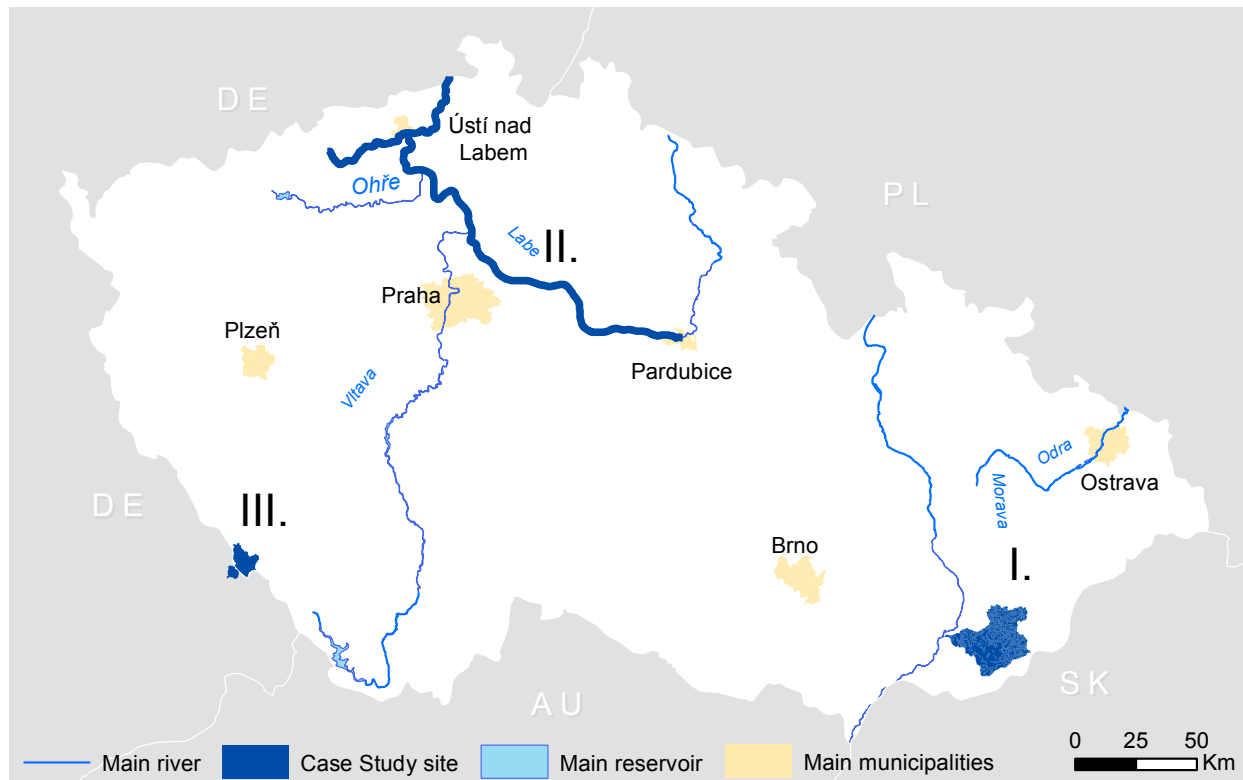


Fig 1: Localization of the case study sites, covering various regions of the Czech Republic

Case study II

The industrial and highly-urbanized areas that are often placed near or within the river floodplain represent a significant source of non-point pollution of a toxic character. The dissolved mass transport in the catchment of the Elbe River from the 1950s – 90s was regarded as one of the most polluted in Europe (van der Veen 2006) and has decreased substantially. Nevertheless, the fine-grained sediments that have accumulated in areas of low flow velocity (Schwartz 2006) show an extreme concentration of heavy metals and specific organic matters. The remobilization of those sediments and consequent release in aquatic environments could represent a significant environmental threat (Förstner et al. 2004; van der Veen 2006). In order to qualify the probability of the remobilization, 4 hydrodynamic models integrated with sediment mass conservation equations were constructed (in Upper Elbe and the most polluted tributary Bílina). The models were parameterized and simulated by using a set of synthetic boundaries. Finally, the results were evaluated by the return period assessment.

Case study III

The results of the previous studies are predetermined by the actual and historical flow conditions within a stationary hydrological system. Currently, there is no doubt on the non-stationarity of the hydrological processes that are caused by a combination of several factors. Among others, climate and land use changes play the key roles. For analysis of those factors, the mountainous, fully natural catchments of the Vydra (CZ) and Große Ohe (DE) served as a unique record for the real influence of climate and vegetation cover change understanding. Javoří Brook, located in the Bohemian Forest plateau, with a moderate slope and fully-natural channel served as a micro-scale case study of the extended morphological changes as the consequences of floods with a one-year return period. The morphological changes, although not representing the direct threat for human environments, remain as a footprint of historical flood events. In order to qualify the probability of mass-transport triggering, the hydrodynamic model was integrated with the bank erosion and non-cohesive sediment transport module and coupled with the detailed hydrological model of the wider locality of National Park Šumava. The causes of morphological changes were explored and further analyzed within the non-stationary hydrological system in order to evaluate the possible impact of the ongoing changes of the hydrological processes that were experienced and expected. The acceleration of mass load could involve the downstream settlement significantly, as well as the increment in the dynamic of flood events. The catchment of Volyňka River represents an intersection with highly-dynamic mountainous processes and dense settlement near the river reach (Vimperk). Bank erosion processes caused the destruction of several holdings and infrastructure, thus the experimental nature of the results obtained in the 3rd case study give a socio-economical aspect and greater importance.

The most important task is to decide which process to include in the model (Van De Wiel et al. 2011). The modeler has always to hold a reasonable balance within the objectives of the modeling process: (1) requirement of accuracy in the results; (2) level of ambitiousness in the data of the solution and (3) computational time (Fig 2). The lack of data for real process description and parameterization or model calibration and verification is always one of the most limiting factors for complex modeling studies. The data requirements of any model dramatically increases with complexity (Aksoy & Kavvas 2005).

The solution of the tasks as defined by the cases studies was processed by using available advanced tools of the numerical modelling from the software group MIKE by DHI. The group of software enables the construction of fully compatible complex modelling system for the description of causes and consequences of the hydrological response at the catchment or local scale. The flow chart of the modeling scheme used for the purpose of this thesis is presented in Fig 3.

In the center of the system, there is a hydrodynamic simulation of the flow parameters for the fully-dynamic, process-based event modeling that can be substituted by simple flow balance modeling in the case of yearly mass transport balance studies. The simulation is based on the results of the hydrologic modeling study (Aksoy & Kavvas 2005) entering the hydrodynamic model in the form of initial and boundary conditions. The hydrologic situation, resulting in stream shear stress, represents the cause of the mass transport initialization in the model. The consequence of the process is simulated in the morphological part of the scheme, within the WQ, sediment transport, and bank erosion model. Thus, the tools configuration dynamically processes

the results of the flow modeling (hydrodynamic or flow balance) by introducing the mass transport differential equations at every computational point.

Approach	1D HD description with treshold shear stress evaluation	1D/1D+ HD decription with ST simulation	2D HD description with ST simulation
Requirments	<ul style="list-style-type: none"> • Charasteristic cross-sections • Treshold flow conditions for sediment entrainment 	<ul style="list-style-type: none"> • Charasteristic cross-sections • Cross-sectional characteristic sediment 	<ul style="list-style-type: none"> • Detailed Bathymetry • Grid of sediment properties
Outputs	Mean stream velocity and probable conditions of sediment entrainment	Mean stream velocity and mean cross-sectional conditions for sediment entrainment	Description of the axial and radial flow component. And full sediment transport based on stream power and/or concentration profile

Fig. 2: An example of methodological approach selection process. Further described in Kaiglová et al., 2015). Methods of evaluation of sediment remobilization according the data requirements, computational time and accuracy of results obtained.

Although several processes are connected only with a one-way flow of information, the importance of simultaneous runs is accentuated in the modeling of morphological consequences, since there is a feedback loop (morphological cycle loop). The bed level change directly influences the bathymetry that is the main domain of the hydrodynamic model (e.g. Kiat et al. 2008; Simpson & Castellort 2006; Yang et al. 2004).

From engineering studies, the movement of sediment with a specific grain size within the artificial channel is known to start when the bed shear stress exceeds a critical point. But can this information be transferred to a real case study? Once the proper hydrodynamic parameters and flow conditions of triggering runoff events are found, how should the importance of such consequences be evaluated? The probability of these occurrences (return period) of such flood consequences can be a key factor necessary for answering such questions. Knowing such probabilities, channels under different physical-geographical conditions are able to be compared.

Discussing the invalidity of the concept of hydrological stationarity (Matalas 1998), the aim was to quantify and qualify the impact of climate change-induced hydrological variations on the mass transport problem. The natural catchment of the Upper Vydra was tested together with Grosse Ohe (Schönberg gauge) and the Upper nested catchment (Taferlruck gauge) in order to detect any changes regarding the runoff conditions visible from long-term observations. The main question was, “How do the distributions of runoff conditions change during the year and what implication do these changes have on the frequency and magnitude of high-flow events?” The non-parametric Mann Kendall test (Hirsch et al. 1982) was applied to all meteorological and hydrological data sets to detect monotonic trends. SEN’s nonparametric method (Gilbert 1987) was used to calculate the slope of linear trends.

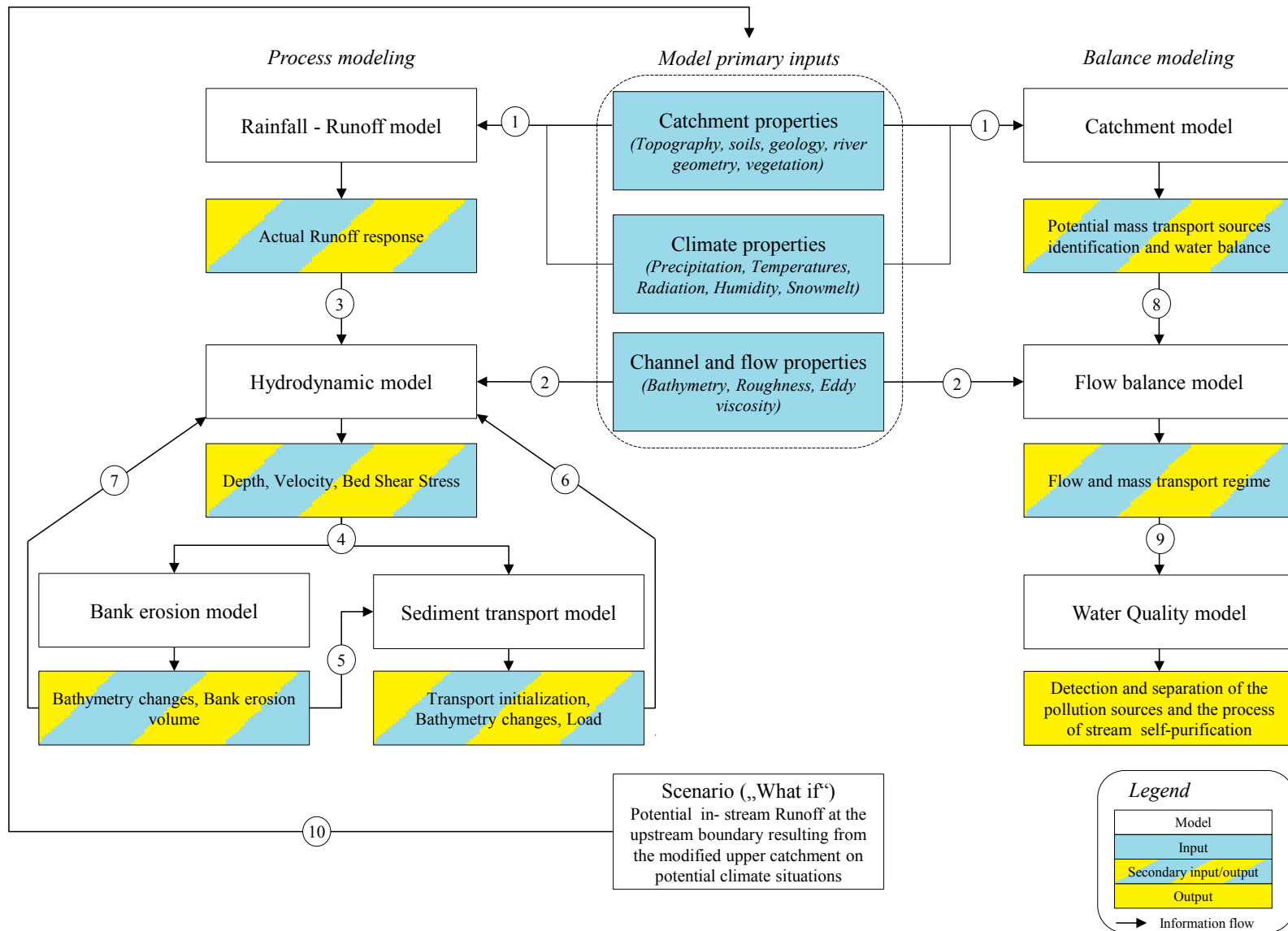


Fig 3: Design of the complex modeling system of mass transport causal conditions. Note that some information flows (numbered 1-10) are explained in the text.

Detailed description of individual information flows displayed in the Figure 6 (1-10):

- (1) Primary model input data are derived from field observations or monitoring. Constant catchment properties are transferred within the model building blocks. Meanwhile, time variable properties enter the model as boundary conditions in the form of a time series.
- (2) Other primary model input data are the hydraulic variables entering the hydrodynamic or flow balance model in the form of model parameters according to the schematization. Those properties can vary with the flow magnitude (Jiřinec, P., 2014; personal communication).
- (3) Runoff response resulting from the hydrological simulation in the form of a time series enters the hydrodynamic model at the upstream boundary condition.
- (4) Flow parameters resulting from the hydrodynamic simulation enter to the bank erosion and sediment transport model as parameters of the sediment conservation equations.
- (5) The volume of bank material released by bank failure as calculated within the bank erosion model enters the sediment transport model as a non-consolidated sediment source.
- (6), (7) Bed level change resulting from the morphological changes calculated by the bank erosion and sediment transport model in each time step is transferred to the hydrodynamic model in the form of updated bathymetry – the main building block of the model.
- (8) Potential sources of pollution and their volume, estimated by the catchment balance model, are integrated with the flow balance model.
- (9) Substances are routed according the average flow parameters estimated by the flow balance model and decayed by first-order degradation, specified within the water quality model. The individual river reaches provide information about characteristic concentrations, flow regime, total mass transport, point vs non-point sources, and structure of individual groups.
- (10) After verification of the model results, the scenario can be proposed as variation of the primary model inputs after running the entire modeling scheme and the results can be compared with the model of the current state to obtain the efficiency estimate.

4. Results and discussion

The qualitative aspect of the mass transport problem can be regarded from two general perspectives: (1) Wash load caused by non-point source pollution and remobilized by high-flow activity, as regarded in the work of Lair et al (2009), or the approach described by (2) Nilsson & Malm-Renöfält (2008), stressing the problems caused by less dilution and self-purification during low-flow activity. The catchment-scale water-mass transport model is capable of solving both of the aspects by including the whole year's hydrological regime, and therefore was selected for the Case Study I processing. Several scenarios for WQ improvement were designed in the rural basin of Olšava river according the EU legislative requirements and tested by comparison with the model of the current state. The model tested the efficiency of these measures considering water pollution from both point and non-point pollution sources and the combination of the two. The scenarios of the pollution reduction measures were based on the implementation of wastewater treatment at small, untreated municipal sources, application of tertiary treatment at large, communal point sources, and grassing of arable land that was at high risk of soil erosion. (Fig 4).

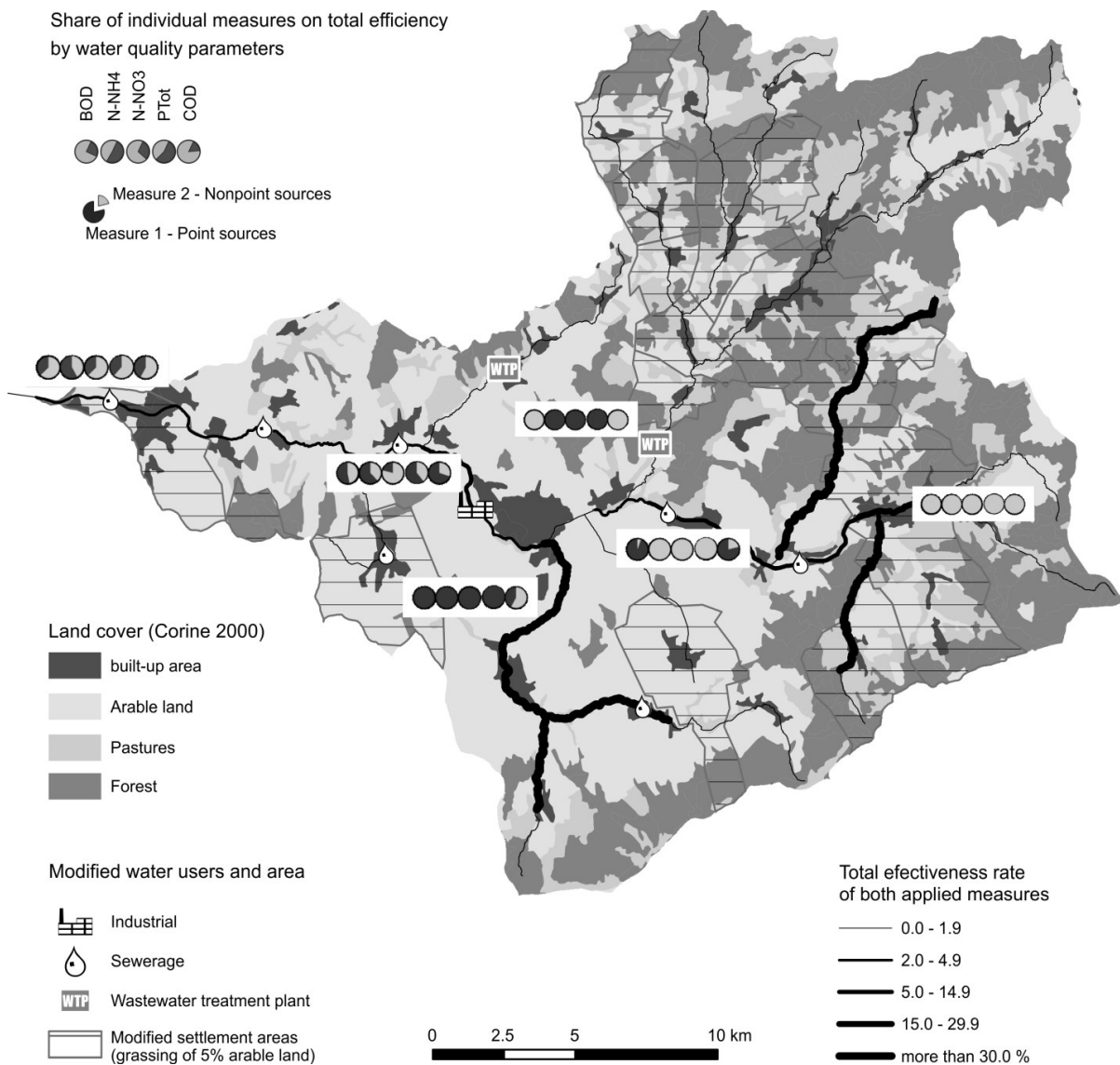


Fig. 4. Total effectiveness of two measures applied in the model of the current state of water quality in the Olšava River Basin (Case study I) in parameters BOD₅, N-NH₄⁺, N-NO₃, P_{total} and COD.

The secondary output from the WQ model is the quantification of non-point sources in the form of annual total yields and the seasonal regime. The Case Study I thus represents a *balance* model of non-point pollution. Nevertheless, the studies of Aksoy & Kavvas (2005), Buzek (2000), and Schwarz (2006) state that non-point pollution originates from the catchment drainage during the occasional *high-flow events*. Thus, the mass transport during high-flow events was considered as the main focus of Case Study II.

The primary aim of Case Study II was to identify threshold values for potential remobilization of polluted riparian sediment in different environments associated with a similar problem. According to Lair et al. (2009), floodplain pollution represents a severe impact on the integrity of freshwater ecosystems. It is due to the unpredictability of the form of non-point pollution, timing, and magnitude. Water managers have to consider all the threats regarding mass transport by being aware of all the key sources of mass in the

catchment. It can be direct pollution leaked in the river network by high-flow activity or indirect (“secondary”) pollution, caused by desorption of pollutants stored in the particle-pollutant complexes in old fluvial deposits. Such deposits tend to be remobilized mostly by main recipient high-flow activity, and thus, the problem requires a hydrodynamic solution approach. The problem of mass transport derived from the industrial, highly-anthropogenically-modified river courses and riparian zones in the Elbe Basin is an example (Case Study II).

Even though similar goals, as Case Study II presents, can be partially found in Büttner et al. (2006); Jacoub & Westrich (2006); Lair et al. (2009), being the first numerical modeling study on the fine-grained sediment remobilization issue in the Czech Republic, having such a spatial extent, and due to the scarce or non-existing similar solutions in foreign literature, there was an additional partial aim of the methodological approach design and verification. The main prerequisites were the limited data availability and the need of an appropriate method design for the objective evaluation and comparison of the remote sites with different hydrological and hydrodynamic flow conditions. The remobilization of fine-grained sediments was estimated by using various types of horizontal flow discretization (1D, 1D CS-distributed, 1D+ and 2D) based on shallow water equations using depth-averaged modeling approaches. The applicability of each method tested is discussed in the Table 1.

Table 1 Comparison of results for the 1D CS distributed flow shear stress maps, 1D+ with sediment transport calculation and 2D sediment transport calculation

Site ID	Site description	τ [N m^{-2}]			Q [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]		
		1D CS distributed	1D+	2D	1D CS distributed	1D+	2D
B9-1	Downstream the weir	0.8	1.3	1.0	5.0	7.4	5.8
B9-2	Upstream the collapsed bridge	0.8	1.5	0.8	3.6	4.0	3.8
B9-3	Downstream the collapsed bridge	1.0	1.3	1.1	4.5	7.9	7.9
B8-1	Middle reach banks	1.0	1.1	1.0	7.0	8.1	8.0

The main contribution of Case Study II is the resulting data of the tendencies of fine-grained sediment and its remobilization at 31 polluted sites.

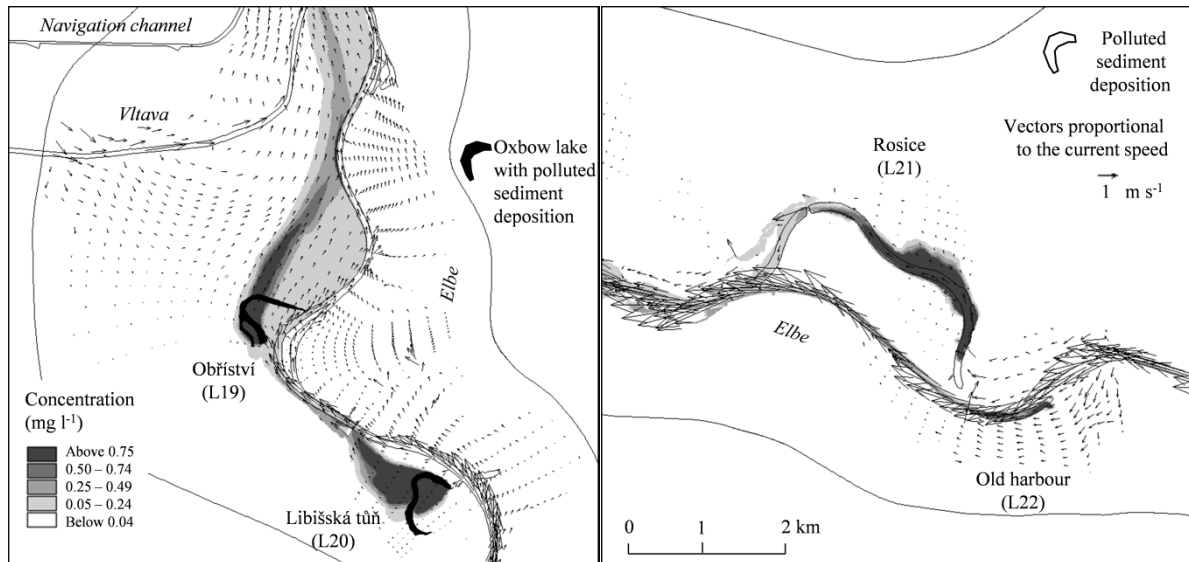


Fig. 5. Remobilization of fine-grained sediment layers at two selected sites. The left picture depicts L19 and L20 between the Spolana chemical plant and the Vltava confluence. Sediments are already progressively eroded after 1.5 days at the L19 site (Obříství) and after 10 hours at the L20 site (Libišská tůň). Inundation is generated from the Elbe flood with RP corresponding to 50 years (Elbe discharge is $1480 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, while Vltava discharge reached $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). The right picture depicts L21 and L22 downstream from the Paramo refineries. Sediments are eroded after flooding from upstream inundation (Elbe discharge is $912 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

The dataset resulting from the numerical modeling studies gains international importance in representing the first classification of the secondary pollution threats caused by told ecological burdens of the Northern Czech Republic. According to the evaluation, the remobilization of fine-grained sediments occurs as expected when site is connected with the transient flow. The RP of the causal hydrological conditions ranged from <1 year at less stable sites up to >100 years at sites where remobilization occurred after a high dividing structure experienced overflow. The statistical evaluation points out areas of special interest, most of which are situated up to 35 km upstream from the German border. Causal discharges are reached during 150 days within an average year. Flow parameters at remobilization were observed within the range $0.12\text{--}0.89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the case of depth-averaged velocities and within $0.12\text{--}7.8 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ in the case of bed shear stresses. As seen in the qualitative survey of sediment deposits, numerous toxic pollutants were found to occur in alarming concentrations at all sites. The results' environmental aspects were therefore discussed with a view to the threat of downstream aquatic ecosystems' possible secondary pollution.

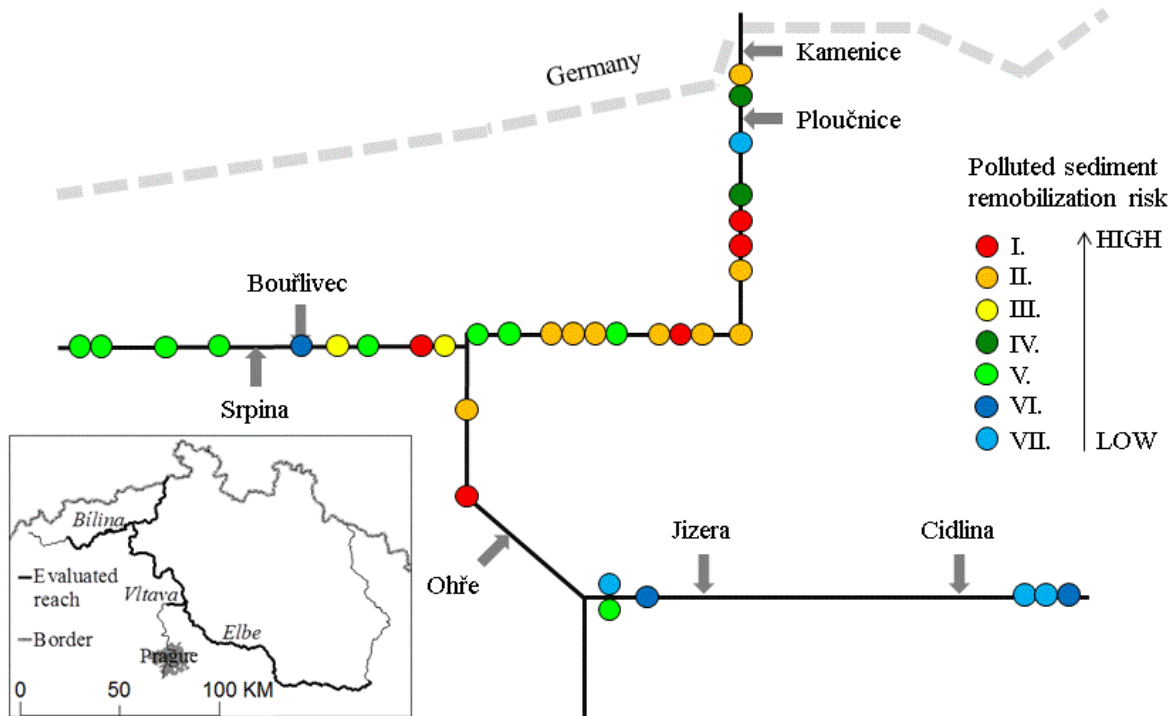


Fig. 5. Schematic plan of the evaluated river network with all sites classified based on causal flow conditions. Study sites are visualized from the border/confluence in ascending order.

Similar method as Case Study II, but focusing only on solid particle (sediment) transport was used in Case Study III. The study was focused on the evaluation of gravel remobilization competence in a fully-natural stream of the Javoří Brook in order to detect causal flow conditions of fluvial changes. The remobilization of bed material consisted of well-sorted gravel that was forced by local depth averaged velocities $1.8 \pm 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, resulting in excess shear stress ($\tau_e = \tau - \tau_c$) varying within $16.3 \pm 8.2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. The RP of the short discharge time series (4 years) from the *in situ* water stage measurement is difficult to estimate. Nevertheless, the flood event recorded in June 2013 was used as the real-case boundary condition that affected the entire catchment at a larger scale (Upper Vydra, Modrava gauge), where the long-term monitoring and RP evaluation is available. Thus, the causal *in situ* discharges were related with official monitoring data and the resulting return period of the remobilization could be estimated as $Q_1 - Q_3$.

According to Jacobub & Westrich (2006), each granulometric fraction of the sediment sample has to be simulated individually, even though the approach eliminates particle interactions and lead to misinterpretation of the results. The grain size was varied in order to describe the movement of individual fractions separately. The remobilization of the middle and higher grain fractions ($D_{40} - D_{90}$) were evaluated using the arbitrary set remobilization criteria. The method of site-specific grain entrainment relation to the causal flow conditions was proposed. The method called “*remobilization rating curves*” aggregates individual results into a general reach property (Fig 7). Thus, the method could serve for the sediment transport competence assessment in various reaches.

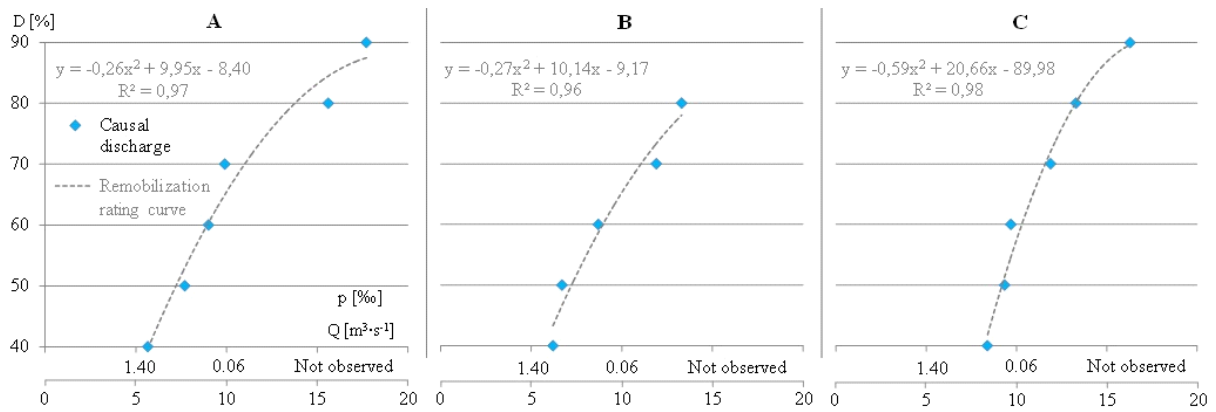


Fig. 7: Remobilization rating curves constructed at the Cross sections localities (A, B, C) based on the frequency of the remobilization causal conditions occurrence

By comparing the channel morphology before and after the flood events, the magnitude of the eroded material can be established (e.g. Eaton & Lapointe 2001; Pizzuto et al. 2010). However, flood events are largely unpredictable; thus, the data about channel morphology before a flood event is often missing. Remote sensing technologies can solve this absence of a detailed topography description, as the data resulting from a remote survey can cover much larger regions than geodetic surveys. Case Study III benefits from the presence of highly spatially distributed datasets on channel morphology surveyed by UAV Photogrammetry (Mířejovický 2012-2014, unpublished results) pre- and post- flood event.

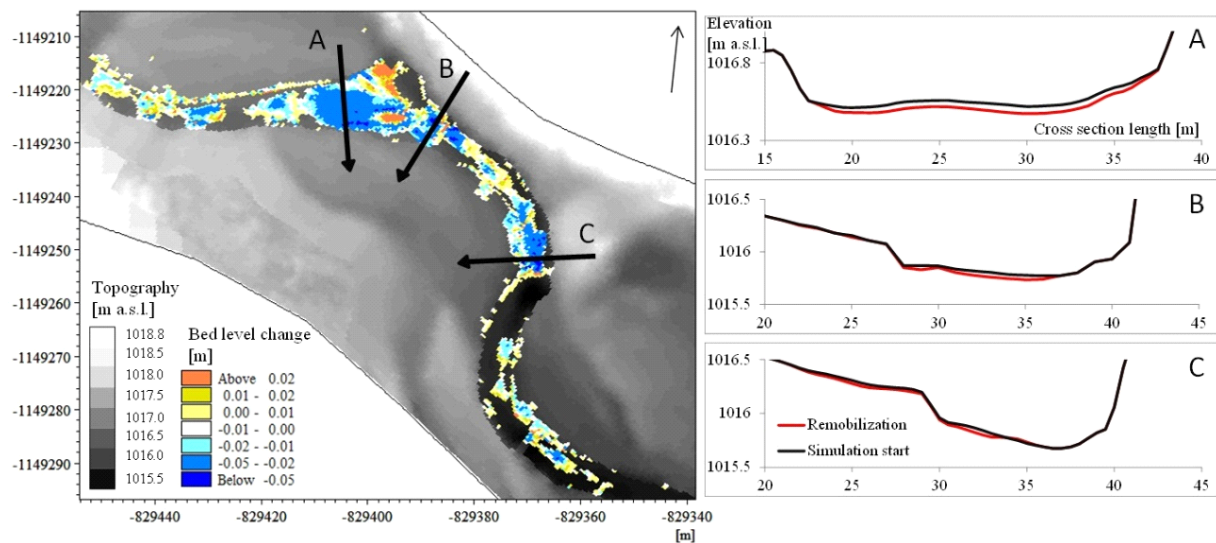


Fig. 8: Remobilization assessment considering the D_{50} parameter as grain size characteristics. Left is the horizontal plan of bed level change at the remobilization criteria fulfilment. Right are the cross sections with pre-simulation state and the state when the remobilization was evaluated

Due to the statistical evaluation (RP) of the causal flow conditions, the results from remote sites of different geographical conditions are comparable, bringing the overview of reach stability and the screening of the mass transport initialization issue. The flow conditions represented by flow velocities or excess shear stress are comparable across geographical scales as well. Case Study I brought information about the average transport conditions that are indirectly derived from the in-stream concentrations. Case Studies II and III refer in more detail to the specific flow conditions necessary for mass transport initialization.

Even in disregarding the conclusion statement of Papalexiou et al. (2013) that the frequency of extremes values (RP) evaluated using Gamma distribution is underestimated, thus the occasional high-flow events are not as rare as according to the RP evaluation, there is another problem with the predictive ability of RP. All the results of this study (joined by the RP characteristics) are based on the assumption of the hydrological stationary that, according to Matalas (1998), cannot be achieved in hydrology, being that they are the “*manifestation of climate*” (the hydrological boundary conditions). Therefore, the importance or reliability of our results that are based on the probabilistic evaluation of RP obtained in various regions should be discussed by focusing on the question of the hydrological stationarity. The key drivers of the oscillations or trend behavior are different in each of the studied environments. They can be divided into natural causes (climate change) and anthropogenic causes (channel modification, land use change, etc.). It is necessary to focus on the “*natural*” oscillations, present all over Central Europe. Those can be sufficiently described in the numerical models and can be most directly understood by analyzing the long-term runoff time series. According to Lu et al. (2013), who has studied sediment load response to climate change, a 1% change in precipitation can cause a 2% change in the sediment load. Thus, the precipitation records were studied together with temperature and land cover time-series in order to detect any dynamic progress in each component of the runoff response.

Focusing then on the nearly-natural catchment (Case Study III) located in the core of the Bohemian Forest (National Parks Šumava and Bayerischer Wald), the current most-discussed topic is the influence of climate change (regional factor) and forest disturbance (local factor) of the natural environment caused by the wind storm-induced bark beetle outbreaks. Although there are several studies focused on the effects of the bark beetle outbreak on biodiversity (Jonášová & Prach 2004; Müller et al. 2010), WQ (Beudert et al. 2015), or surface reflectance (Hais 2003; Hais et al. 2009), the effect of those drivers on the hydrological regime still remain unclear or uncertain.

The first expectation could be that the highly-notable influence of the bark beetle infestation on the whole hydrological regime of the mountain range would have a strong influence on the fluvial processes observed in the experimental reach of Javoří Brook. Nevertheless, the hydrological analysis of three Bohemian Forest catchments revealed only small changes in annual runoff yields of all studied runoff time series (Upper Vydra, Große Ohe, and Upper Große Ohe). This was in accordance with the insignificant changes in precipitation yields. Analyzing of trend behavior in intra-annual variability and high-flow measures was later done in order to detect any effect on magnitude or frequency of high-flow events consequently affecting the fluvial processes in the experimental reach of Javoří Brook. In the main findings of Case Study III, the low flow measures significantly increased in the late summer/early autumn period, while total runoff yields did not change. This underpins the importance of diminished evapotranspiration losses from severely disturbed stands, which enable more groundwater recharge during summer and likely describes the effect of a bark beetle infestation. The indirect evidence of the forest disturbance effect is the 9% increment of the runoff coefficient observed in the nested catchment of the Upper Große Ohe River corresponding with 30% of the area covered by dead forest. In contrast, the overall warming in February (+1.8°C) and April (+4°C) accelerated snow melt and significantly increased runoff and high flows in March in all catchments, irrespective of size, land cover, or land cover changes, while precipitation yields and intensities did not change. The increasing trend in April temperatures was reported even from a longer time-series evaluation by Bässler (2008), who places the first beginning of the trend existence in the year 1961. The most pronounced trend in air temperature took place in the period from 1980, and according to

Bässler, could support the bark beetle infestation. Similar air temperature trend patterns were detected in other Czech headwater catchments as well (Kliment et al. 2011).

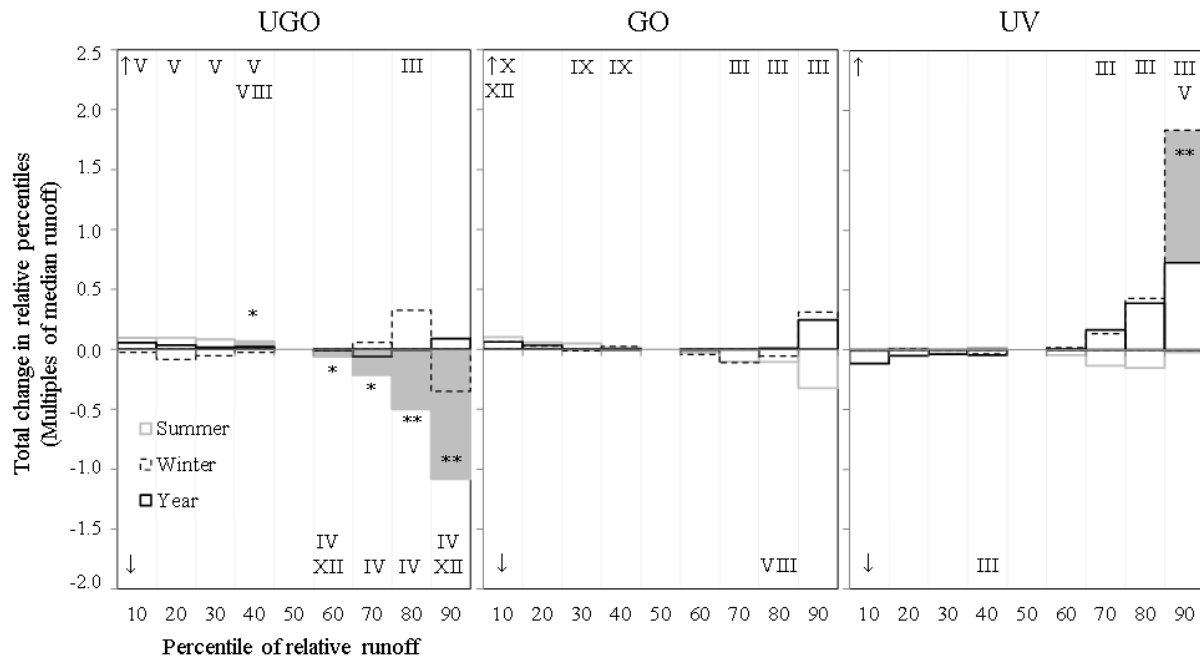


Fig. 9: Total change in relative runoff percentiles (P10 - P90) over the whole study period represented as multiples of the median of the respective season: bars indicate hydrological year and seasons, grey fills statistical significance with $p \leq 0.05$ at least; $p \leq 0.05$: *, $p \leq 0.01$: **. Roman numerals at the top (increasing) and bottom (decreasing) of the figure frame designate individual months with significant trends ($p \leq 0.05$) in the respective percentile.

The frequency of high flow events is slightly increasing in Case Study III, though the magnitude remains unchanged. That could mean that the return period is overestimated, which could be caused by the hydrological stationary assumption, and an overall underestimation of the risk processes connected with the mass transport initialization topic. Clever water management, connected with flood-risk mitigation, the magnitude of the remobilization caused by individual flood events should not increase from natural causes. As seen in Case Study I, the magnitude of wash load-induced mass transport could be decreased by implementing strategies required by the EU legislatives. Numerous measures to mitigate secondary pollution of aquatic ecosystems caused by the old ecological burdens must be implemented. The results of Case Study II can serve as a basis for the detection of most problematic sites and prioritizing measure design.

5. Conclusions

The thesis is focused on the issue of the mass transport initialization. The topic was solved by numerical modeling methods, selected from a broad scale of evaluation tools. The complex modeling system was designed and used at different spatial and temporal scales (Case Studies I, II, III). Several modeling approaches were compared and discussed regarding the data and computational time requirements within the 3 case studies (I-III). Case Studies were designed to deal with different environmental risks caused by the mass transport initialization expected in Central Europe. The *mass balance model* (Case Study I) was set up in the peripheral area of the Czech Republic, represented by Olšava catchment, while mass transport *process based*

models simulating the non-stationary high-flow episodes were set up first in the *polluted* Elbe River environment (Case Study II) and in a *natural* environment in the core of the Šumava mountains (Case Study III).

The results of the Case Study I are the differentiation of the WQ pollution sources, the non-point pollution quantification, and the measures for WQ improvement application and evaluation. The results of the Case Study II and III bring information about the site-specific causal flow conditions necessary for the entrainment of solid particles, widely-dispersed shear stresses about $0.12\text{--}7.8\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ and $16.3\pm 8.2\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$, for fine-grained sediment of Case Study II and coarser particles of Case Study III respectively. Those particles were heavily polluted in Case Study II, but untainted in Case Study III.

The non-stationarity of the natural (Case Study III) rainfall-runoff process, namely climate change and forest disturbance (bark beetle outbreak or windbreak) was discussed. No significant role of those drivers was proven regarding the magnitude of the high-flow events, but the increment in the frequency of those events can be expected as a consequence.

6. References

Aksoy, H. & Kavvas, M.L., 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, 64(2-3), pp.247–271.

Alila, Y. et al., 2009. Forests and floods: A new paradigm sheds light on age-old controversies. *Water Resources Research*, 45.

Bässler, C., 2008. Klimawandel – Trend der Lufttemperatur im Inneren Bayerischen Wald (Böhmerwald) Climate change – trend of air temperature in the Innerer. *Silva Gabreta*, 14(1), pp.1–18.

Beudert, B. et al., 2015. Bark Beetles Increase Biodiversity While Maintaining Drinking Water Quality. *Conservation Letters*, p.n/a–n/a.

Büttner, O. et al., 2006. Numerical modelling of floodplain hydraulics and suspended sediment transport and deposition at the event scale in the middle river Elbe, Germany. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 34(3), pp.265–278.

Buzek, L., 2000. Eroze lesní půdy při vyšších vodních srážkách a tání sněhové pokrývky (na příkladu střední části Moravskoslezských Beskyd). *Geografie – Sborník ČGS*, 105(4), pp.317–332.

Dettinger, M.D. & Cayan, D.R., 1995. Large-scale atmospheric forcing of recent trends towards early snowmelt runoff in California. *Journal of Climate*, 8, pp.606–623.

Eaton, B.C. & Lapointe, M.F., 2001. Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte Marguerite River. *Geomorphology*, 40, pp.291–309.

EP, 2000. Water Framework Directive WFD 2000/60/EC.

Förstner, U. et al., 2004. Historical Contaminated Sediments and Soils at the River Basin Scale. *Journal of Soils and Sediments*, 4(4), pp.247–260.

Gilbert, R., 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, New York: John Wiley & Sons.

Haddadchi, A., Ryder, D.S., et al., 2013. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research*, 28(4), pp.560–578.

Haddadchi, A., Omid, M.H. & Sdehghani, A. a., 2013. Total load transport in gravel bed and sand bed rivers case study: Chelichay watershed. *International Journal of Sediment Research*, 28(1), pp.46–57.

Hais, M. et al., 2009. Comparison of two types of forest disturbance using multitemporal Landsat TM/ETM+ imagery and field vegetation data. *Remote Sensing of Environment*, 113(4), pp.835–845.

Hais, M., 2003. Heis_2003.pdf. *Acta Universitatis Carolinae*, 2, pp.97–107.

Hannaford, J. & Marsh, T., 2006. An assessment of trends in UK runoff and low flows using a network of undisturbed catchments. *International Journal of Climatology*, 26, pp.1237–1253.

Hirsch, R.M., Slack, J.R. & Smith, R.A., 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18, pp.107–121.

Jacoub, G. & Westrich, B., 2006. Modelling transport dynamics of contaminated sediments in the headwater of a hydropower plant at the Upper Rhine River. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 34, pp.279–286.

Jonášová, M. & Prach, K., 2004. Central-European mountain spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forests: regeneration of tree species after a bark beetle outbreak. *Ecological Engineering*, 23(1), pp.15–27.

El Kadi Abderrezzak, K. et al., 2014. A physical, movable-bed model for non-uniform sediment transport, fluvial erosion and bank failure in rivers. *Journal of Hydro-Environment Research*, 8, pp.95–114.

Kiat, C.C. et al., 2008. Sediment transport modeling for Kulim River – A case study. *Journal of Hydro-environment Research*, 2(1), pp.47–59.

Kliment, Z. et al., 2011. Trend analysis of rainfall-runoff regimes in selected headwater areas of the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 59(1), pp.36–50.

Krüger, F. et al., 2006. Methods to calculate sedimentation rates of floodplain soils in the middle region of the Elbe River. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 34, pp.175–187.

Kuraš, P.K., Alila, Y. & Weiler, M., 2012. Forest harvesting effects on the magnitude and frequency of peak flows can increase with return period. *Water Resources Research*, 48, p.W01544.

Lair, G.J. et al., 2009. How do long-term development and periodical changes of river-floodplain systems affect the fate of contaminants? Results from European rivers. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 157(12), pp.3336–46.

Li, S. & Duffy, C.J., 2011. Fully coupled approach to modeling shallow water flow, sediment transport, and bed evolution in rivers. *Water Resources Research*, 47(3), p.n/a–n/a.

Lu, X.X. et al., 2013. Sediment loads response to climate change: A preliminary study of eight large Chinese rivers. *International Journal of Sediment Research*, 28(1), pp.1–14.

Matalas, N.C., 1998. Note on the Assumption of Hydrologic Stationarity. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 112(1), pp.64–72.

Müller, J. et al., 2010. Learning from a “benign neglect strategy” in a national park: Response of saproxylic beetles to dead wood accumulation. *Biological Conservation*, 143, pp.2559–2569.

Nilsson, C. & Malm-Renöfält, B., 2008. Linking flow regime and water quality in rivers: a challenge to adaptive catchment management. *Ecology & Society*, 13.

Papalexiou, S.M., Koutsoyiannis, D. & Makropoulos, C., 2013. How extreme is extreme? An assessment of daily rainfall distribution tails. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), pp.851–862.

Schwartz, R., 2006. Geochemical characterization and erosion stability of fine-grained gryone field sediments of the Middle Elbe River. *Acta hydrochim. Hydrobiol.*, 34, pp.223–233.

Simpson, G. & Castelltort, S., 2006. Coupled model of surface water flow, sediment transport and morphological evolution. *Computers & Geosciences*, 32(10), pp.1600–1614.

Van De Wiel, M.J. et al., 2011. Modelling the response of river systems to environmental change: Progress, problems and prospects for palaeo-environmental reconstructions. *Earth-Science Reviews*, 104(1-3), pp.167–185.

Wilcock, P.R. & Crowe, J.C., 2003. Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), pp.120–128.

Zeng, S., Xia, J. & Du, H., 2013. Separating the effects of climate change and human activities on runoff over different time scales in the Zhang River basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(2), pp.401–413.

Curriculum vitae

Name RNDr. Jana Bernsteinová
(Kaiglová)



Nationality Czech

Education

Ph.D, Physical geography and geoecology, Charles University in Prague, from 2011

RNDr. - Doctor of Natural Sciences, Physical geography and geoecology, Charles University in Prague, 2014

Master, Physical geography and geoecology, Charles University in Prague, 2010

Erasmus, Physical geography and oceanography, Universidad de Sevilla, 2008

Bachelor, Geography and Cartography, Charles University in Prague, 2007

Courses

XVI. EU-IP-Seminar on Geography of Water - Sustainable Water Policies in Europe, University of Zadar - department of geography, 2013

XV. EU-IP-Seminar on Geography of Water - Sustainable Water Policies in Europe, LMU München - department of geography, 2012

Internships

MOE-Austauschstipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, National Park Bayerischer Wald Verwaltung, 2014

Betreuer: Dipl. Ökolog Burkhard Beudert

Tema: Abflussdynamik Veränderungen als Reaktion auf dem Klimawandel und den Vegetation Störungen in den Bayerischer Wald und Böhmerwald Nationalparks.

Key qualifications

Hydrological and Hydrodynamic modeling for flood protection management.
Sediment transport modelling of the fine grained sediment deposition in riparian zones.

Employment record

Year: 2012 - 2014

Institution: Charles University in Prague, Department of Physical geography and geoecology

Position: Researcher

Project: Czech Science Foundation, the research project GAČR P209/12/0997 “The impact of landscape disturbance on the dynamics of fluvial processes“

Responsibilities: Numerical modelling of the hydrological and fluvial morphological processes.

Year: from 2011

Institution: DHI, a.s. (Danish hydraulic institute)

Position: Engineer of the expert group hydrology and groundwater

Responsibilities: Hydrological and Hydrodynamic modeling for flood and environmental protection.

Experience record

Year: 2012-2013

Project: „SedBiLa“ – Bedeutung der Bílina als historische und aktuelle Schadstoffquelle für das Sedimentmanagement im Einzugsgebiet der Elbe, ELSA, ICPER, coordinated by Povodí Labe s.p.

Responsibilities: Numerical modelling of the fine grained sediment remobilization. Methodological approach design. Results post processing and presenting.

Year: 2013-2014

Project: „SedLa“ – Bedeutung der Altsedimente der Elbe und ihrer Seitenstrukturen im Abschnitt von Pardubice bis Moldaumündung, ELSA, ICPER, coordinated by Charles university in Prague, Department of physical geography.

Responsibilities: Numerical modelling of the fine grained sediment remobilization. Results post processing and presenting.

Year: 2012

Project: Channel modification and fluvial dynamics - Volyňka

Responsibilities: Field mapping of upper Volyňka (HEM-F, HEM-G), field works coordination and post processing.

Foreign languages

	<u>Speaking</u>	<u>Reading</u>	<u>Writing</u>	<u>Certificate</u>
English	Excellent	Excellent	Excellent	Toefl 95%
German	Good	Good	Good	
Spanish	Good	Good	Good	DELE – B2

Publications

Papers published in peer-reviewed international journals:

Kaiglová, J., Jiřinec, P., Langhammer, J., Ingeduldová, E., Chalupová, D., Ferencík, M., Janský, B., 2015. Numerical modelling of the heavily polluted fine-grained sediments remobilization in the northern Czech Republic. *Ecohydrology and hydrobiology*, in print.

Kaiglová, J., Langhammer, J., Jiřinec, P., Janský, B., Chalupová, D., 2015. Numerical simulations of heavily polluted fine-grained sediment remobilization using 1D, 1D+ and 2D channel schematization. *Environmental Monitoring Assessment*, 187(115), 1-18.

Bernsteinová, J., Bässler, C., Zimmermann, L., Langhammer, J., Beudert, B., 2015. Changes in runoff of two neighbored catchments in the Bohemian Forest related to climate and land cover changes. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, (In review).

Kaiglová, J., Langhammer, J., 2014. Analysis of efficiency of pollution reduction measures in rural basin using MIKE Basin model. Case study: Olšava River Basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(1), 43-54.

Langhammer, J., Ye, Su., **Bernsteinová, J.**, 2015. Runoff response to climate warming and forest disturbance in a mid-mountain basin. *Water* (In review).

Papers published in international conference proceedings:

Kaiglová, J., Jiřinec, P., Langhammer, J., Janský, B., Chalupová, D., 2014. Numerical modeling of fine-grained sediment remobilization in heavily polluted streams. Case study: Elbe and Bílina Rivers, Czech Republic. In: Conference Proceedings: SHF Conference: «Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and river systems_Nantes 6 & 7 october 2014. Nantes.

Kaiglová, J., Langhammer, J., 2014. Numerical modelling of gravel remobilization competence in mountain stream. In: Hudec, M., Csáky, A., 2014. *Scientia Iuvenis*, UKF, Nitra.

Chalupová, D., Janský, B., Langhammer, J., Šobr, M., Medek, J., Král, S., Černý, M., Žáček, M., Jiřinec, P., **Kaiglová, J.**, Halířová, J., Leontovyčová, D., 2014. The significance of polluted sediments in the Elbe River floodplain. Magdeburský seminář. Špindlerův Mlýn.

Špatka, J., **Kaiglová, J.**, Mateáško, F., 2013. Dam Break studies by Mike11. Conference BULAQUA Sofia.

Kaiglová, J., 2013. Remobilization of fine-grained sediments as a source of ecological problems in heavily industrialized areas – methodological approach. in Majerčáková, O.,

sborník 16. konferencia mladých meteorológov a klimatológov, 25. konferencia mladých hydroológov. SHMÚ Bratislava.

Kaiglová, J., 2010 Analýza a modelování kvality vody v povodí Olšavy, in Majerčáková, O., sborník 13. konferencia mladých meteorológov a klimatológov, 22. konferencia mladých hydroológov, 9. konferencia mladých vodohospodárov. SHMÚ Bratislava.

Conferences with active participation

Year: 2014 (22. 10)

Organization: Faculty of Natural Sciences, Constantine the Philosopher University in Nitra

Title: Scientia Iuvenis

Participation: Oral presentation (Numerical modeling of fluvial processes in montane stream in Šumava - Czech Republic)

Year: 2014 (6-7.10)

Organization: SHF (Société Hydrotechnique de France)

Title: Small scale morphological evolution of costal, estuarine and river systems, Nantes

Participation: Poster presentation (Numerical modeling of fine-grained sediment remobilization in heavily polluted streams. Case study: Elbe and Bilina Rivers, Czech Republic)

Year: 2014 (28.8)

Title: 23. sjezd ČGS (Czech Geographical Society) a 16. sjezd SGS (Slovak Geographical Society)

Organization: Charles University in Prague

Participation: Oral presentation (Modeling the fluvial processes in mountain stream)

Year: 2014 (28-2.5)

Title: EGU General Assembly 2014

Organization: EGU (European Geoscience Union)

Participation: Oral presentation (Numerical modelling of fine-grained sediments remobilization in heavily polluted streams Case study: Elbe and Bilina River, (CZ))

: Poster presentation (Response of simple stream water quality indicators to rainfall-runoff events in forest disturbed basins in upper Vydra, Central Sumava Mountains)

: Poster presentation (Runoff response to climate warming and forest disturbance in a mid-latitude montane basin)

Year: 2013

Title: Konferencia Mladých hydroológov

Organization: SHMÚ (Slovak Hydrometeorological Institute)

Participation: Oral presentation (Remobilization of fine-grained sediments as a source of ecological problems in heavily industrialized areas)

Year: 2010

Title: Konferencia Mladých hydroológov

Organization: SHMÚ (Slovak Hydrometeorological Institute)

Participation: Oral presentation (Analýza a modelování kvality vody v povodí Olšavy)