

# PŘÍSPĚVEK K MOŽNOSTEM STANOVENÍ VLIVU LUŽNÍHO LESA NA TLUMENÍ POVODŇOVÝCH VLN S VYUŽITÍM 1D A 2D HYDRAULICKÝCH MODELŮ A GIS

## CONTRIBUTION TO THE POSSIBILITY OF IDENTIFYING THE FLOODPLAIN FOREST IMPACT TO THE FLOOD WAVES MITIGATION USING 1D AND 2D HYDRAULIC MODELS AND GIS

BARBORA KOŽANÁ<sup>1)</sup> - JARMILA MĚKOTOVÁ<sup>3)</sup> - VERONIKA ŘÍHOVÁ<sup>1,2)</sup> - ANNA SYNKOVÁ<sup>1)</sup> - OTAKAR ŠTĚRBA<sup>3)</sup> - JAN UNUCKA<sup>1,4)</sup> ✉

1) Institut geologického inženýrství, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15, CZ - 708 33 Ostrava - Poruba

2) Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava, K myslivně 3/2182, CZ - 708 00 Ostrava - Poruba

3) Český svaz ochránců přírody, ZO Castor, Přichystalova 11, CZ - 779 00 Olomouc

4) Ostravská univerzita v Ostravě, Přírodovědecká fakulta, Chittussiho 10, CZ - 710 00 Ostrava - Slezská Ostrava

✉ e-mail: jan.unucka@vsb.cz

### ABSTRACT

In the scientific literature, the influence of floodplain forest and riparian areas on the impairment of peak flow and volume of flood waves is often discussed both in technical and natural sciences. A common deficiency, which is advertised by the authors, is the inability to quantify such an effect, which arises from the difficulty in measuring the hydrological elements in the channels and inundation during extreme phases of runoff, where it undoubtedly belongs floods, and when the influence of floodplain forest, as all assumptions, is increasing. This case study focuses on the possibility of analysis of the impact of riparian forests with the support of different GIS tools and simulations in 1D and 2D hydraulic models. The aim was to highlight the possibility to quantify the impact of forest on the local and general characteristics of the flood wave and verifying the viability of infrastructure GIS and hydraulic models like-minded analysis. The selected hydraulic models were the most widely used tools and industrial standards HEC-RAS, MIKE 11 and MIKE 21c. Pilot area was inundation area in the Upper Morava Litovelské Pomoraví Nature Reserve.

**Klíčová slova:** niva, povodně, Litovelské Pomoraví, GIS, hydraulické modely

**Key words:** floodplain, floods, Czech Republic, GIS, hydraulic models

### ÚVOD

Vliv lužních lesů na transformaci povodňové vlny a retenci je nezpochybnitelný a krom často draze vykoupených zkušeností z konkrétních povodňových situací se o této skutečnosti diskutuje jak v zahraniční (např. EAMUS et al. 2006; MALANSON 1993; MIDDLETON 2002), tak v domácí literatuře (ŠTĚRBA et al. 2008; LANGHAMMER 2008). Obecným vlivem lesa na odtokové poměry se zabývá ucelená publikace KANTOR et al. 2003 či starší, ale komplexní publikace VÁLEK (1977). Vliv porostní struktury a zdravotního stavu fytoceózy na infiltraci, evapotranspiraci je komplexně analyzován autory RODRÍGUEZ-ITURBE, PORPORATO (2004). Vývojem a vlivem lužního lesa v rámci holocenní dynamiky fluvialních systémů se zabývají zejména SCHUMM (1977), BROWN et al. (1997), BRIDGE (2003) nebo v rámci České republiky LOŽEK 2011. Přístupy k hydraulickému modelování včetně zahrnutí vlivu nivy (*floodplain*) jsou uceleně popsány v publikacích BEDIENT et al. 2007 a DYHOUSE et al. 2007. Určitým problémem je však finální zobecnění vlivu inundací a lužního lesa jako takového. Lze říci, že je to v principu takřka nemožné, protože se zde jedná o interakci konkrétních fyzicko-geografických a hydrologických podmínek s určitou hydrosynoptickou situací (zejména z hlediska časoprostorového rozložení příčné srážky), takže nelze u jednotlivých vazeb očekávat lineární závislost mezi jednotlivými faktory. Dalším problé-

mem je pak možnost samotné kvantifikace tohoto vlivu. Lze v zásadě přijmout vstupní hypotézu, že se dominantně uplatňuje zejména vliv terénu a jeho drsnostních parametrů (terénní deprese fungující coby přechodné akumulace, valy apod.), vliv změn lokální hydrografické sítě (meandry, slepá ramena) a vliv samotného lužního lesa a jeho ekosystémů (proměnlivé rozložení drsností z hlediska změn skladby porostů a zakmenění) spolu s vlivem komponent hydrologické bilance území (infiltrace, evapotranspirace), jejichž lokální vliv lze však v extrémních odtokových situacích zanedbat. Pokud tuto hypotézu chceme testovat, máme v zásadě dvě základní možnosti: (i) hydrometrická měření za vybraných situací spolu s dlouhodobým monitoringem vybraných prvků a komponent, statistické vyhodnocení měření a (ii) matematické modelování tohoto vlivu za využití hydrologických modelů a geoinformačních technologií.

Tento příspěvek se soustředí na druhou variantu s tím, že nezpochybnuje variantu první. Naopak postupné zkvalitňování datové základny vede k lepším výsledkům environmentálního modelování a zpětné analýzy v GIS a matematických modelech umožňují lépe definovat požadavky na zkvalitnění datových vstupů a proměnlivost vybraných faktorů v prostoru a čase. Stejně tak v případě měření vybraných hydrologických prvků je často vysoká míra chyby a nejistoty takto získaných dat (např. hodnoty Q nebo tvar konsumpční křivky v případě rozlivů

v inundacích) a vybrané funkce matematických modelů a GIS umožňují tyto hodnoty lépe interpolovat, stanovit či verifikovat. Je tedy zřejmé, že se nejedná o alternativní, ale komplementární přístupy. Vstupní hypotézou je tedy kombinovaný vliv lužního lesa na tlumení hodnot kulminací a objemů povodňových vln díky morfologii terénu lužního lesa, a tedy inundací, drsnostních poměrů (živá i odumřelá vegetace) a také samotnými hydrologickými a částečně bioklimatickými poměry lužního lesa, které ovlivňují evapotranspiraci, vodní bilanci v půdě atd. Protože tyto hydrologické procesy nelze bez instalace monitorovací sítě kvantifikovat a ověřit, příspěvek se soustředí zejména na prvně jmenované morfologické a morfometrické parametry terénu lužního lesa a změnu drsností, které nabývají specifických hodnot v lužním lese, a např. na zemědělsky obdělávaných plochách se účinnost těchto faktorů podstatnou měrou snižuje. Tato data lze také v současnosti získat v dostatečné položové a výškové přesnosti pomocí technologií DPZ (např. laserové skenování, letecké snímky apod.) a geodetických metod. K ověření tohoto vlivu byly poté aplikovány simulace proudění v korytech a inundací pomocí hydraulických modelů HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c pro reálné epizody i N-leté hodnoty průtoků.

## MATERIÁL A METODIKA

### Popis pilotního území

Zájmová lokalita se nachází na území CHKO Litovelské Pomoraví, mezi staničením 171 a 181 km Horní Moravy. Nejbližší vodoměrnou stanicí jsou Moravičany (staničení 190 km, pozorování od r. 1897,  $P = 1558 \text{ km}^2$ ,  $Q_A = 17.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $Q_{100} = 394 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , viz např. údaje na seznamu hlásných profilů na stránkách HPPS ČHMÚ [1]), přičemž hydrologická data z této stanice byla použita i pro kalibraci hydraulických modelů. Zájmová lokalita územně náleží k CHKO Litovelské Pomoraví a přímo v pilotní lokalitě se nachází NPR Ramena řeky Moravy a PR Litovelské luhy. Z geologického hlediska dominují kvartérní fluvialní sedimenty (převážně šterkopisky), hlubší podloží tvoří kulmské droby a břidlice náležící k Českému masivu. Kvartérní šterkopisky tvoří silně zvodnělé kolektory a jsou tedy významným zdrojem podzemní vody. V území se nachází i několik pozorovacích vrtů, např. Litovel. Hlavní hydrologickou osu tvoří přirozeně řeka Morava, souběžně s ní protéká územím Mlýnský potok (též zvaný Malá voda). Z celkové rozlohy CHKO zaujímají lesy 56 %, zemědělská půda 27 % (z toho louky 9.5 %), vodní plochy 8 % a urbanizovaná území 9 % (ŠAFÁŘ et al. 2003). Z půd dominují fluvizemě, místy s mocností až 3 m s předpokládaným počátkem sedimentace v závěru Atlantiku. V potenciální přirozené vegetaci dominuje jilmová doubrava s lokálním zastoupením lipové dubohabřiny. Ze souborů lesních typů jsou zastoupeny jilmový luh (1L), topolový luh (1U) a vrbová olšina (1G) přírodní lesní oblasti (PLO) 34.

### Popis využitých programových prostředků

Pro analýzu v GIS a následný GIS preprocessing pro hydraulické modely byly využity programové prostředky ESRI ArcGIS, GRASS GIS a SAGA GIS. Je bezesporu pozitivní skutečností, že v současnosti existuje ke všem těmto uvedeným programovým prostředkům či platformám poměrně bohatá dokumentace, jakož i extenze (rozšiřující moduly) pro hydrologii a environmentální modelování. V neposlední řadě také rostoucí počet případových studií a jejich využití v kontextu hydrologie, environmentálního a hydrologického modelování. Z prací autorského kolektivu lze jmenovat např. UNUCKA (2010), popř. UNUCKA et al. (2009). V kontextu krizového řízení, analýzy rizik a hydraulického modelování pak potenciál těchto softwarových balíků GIS diskutuje ŘÍHOVÁ 2013. Potenciál jednotlivých programových balíků lze zhodnotit tak, že zatímco ESRI ArcGIS je již celosvětovým standardem a má i dominantní zastoupení v ČR v rámci státní správy či výzkumné sféry, tak GRASS GIS a SAGA GIS coby tzv. *open source* nástroje (tzn. freeware s otevřeným zdrojovým kódem) představují za-

jímavou alternativu z hlediska analýz digitálního modelu terénu (dále jen DMT) a obecně práce s rastrovými daty. Navíc je u těchto nástrojů patrný dynamický progres na úrovni implementace samotných hydrologických a environmentálních modelů (např. TOPMODEL, SIMWE, SWAT apod.).

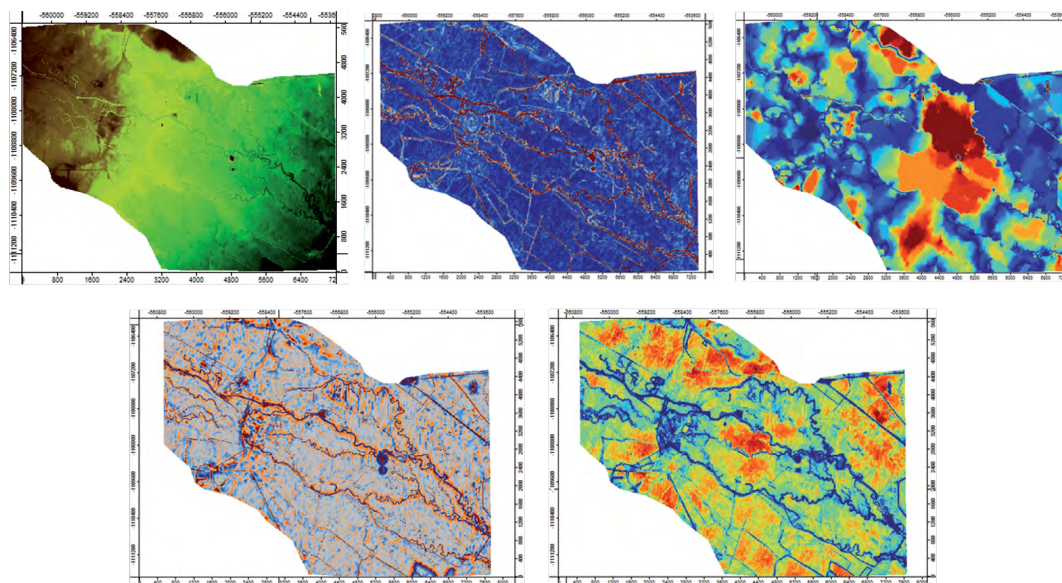
Na úrovni hydrologických, respektive hydraulických modelů byly aplikovány nástroje HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c. Hlavními argumenty pro jejich využití je fakt, že se jedná o celosvětově nejpoužívanější hydraulické modely, které mají dominantní zastoupení i v rámci ČR. Jejich již tradiční používání v hydraulických analýzách i operativním provozu v rámci systémů hydrologické prognózy vyústilo ve skutečnost, že se jedná nejen o verifikované a validované nástroje s dobrou konektivitou na GIS (zatím dominantně pro platformu ESRI ArcGIS), ale i o průmyslové standardy FEMA/NFIP [2]. HEC-RAS a MIKE 11 jsou zástupci 1D hydraulických modelů, MIKE 21c pak zástupcem 2D hydraulických modelů. Byť 1D modely představují určité zjednodušení hydraulických procesů v korytech toků (simulace proudění pouze ve směru sklonu podélného profilu koryta) a inundací (postprocessing v GIS neumožňuje simulaci některých procesů, jako jsou např. vzduť hladiny objekty v inundaci či hydraulické rázy), jsou stále nejpoužívanějším typem hydraulických modelů. Hlavním důvodem je možnost implementace transformace vlny ve vodních nádržích, schematizace a simulace řešení v technických objektech (mosty, propustky, jezy apod.) a implementace simulace vlivu přechodných zón akumulace, rozdělovacích objektů apod. Ve 2D modelech nelze detailně schematizovat tyto objekty a analyticky či numericky řešit jejich vliv. Proto se nejčastěji využívá kombinace 1D modelu pro simulace proudění koryta toků a 2D modelu simulace procesů v inundacích, což umožňuje např. nástroj MIKE FLOOD (MIKE 11 + MIKE 21c). Jak model HEC-RAS, tak model MIKE 11 umožňují schematizaci a následnou simulaci i v případě existence rozvětvené hydrografické sítě s odlehčovacími kanály a slepými rameny, což je v rámci pilotního území a této případové studie nezbytnou podmínkou. Dalším podstatným faktorem je i implementace pokročilých metod pro erozní, transportní a akumulační procesy v korytech toků a inundacích v rámci programových prostředků HEC-RAS a MIKE 11/21c. Eroze břehů a dna spolu s transportem a akumulací sedimentů ovlivňují kapacitu koryta a zároveň akumulační kapacitu nivy. Pokud je tedy vybraný software schopen simulovat a analyzovat tyto procesy, je to podstatnou výhodou.

### Metodika

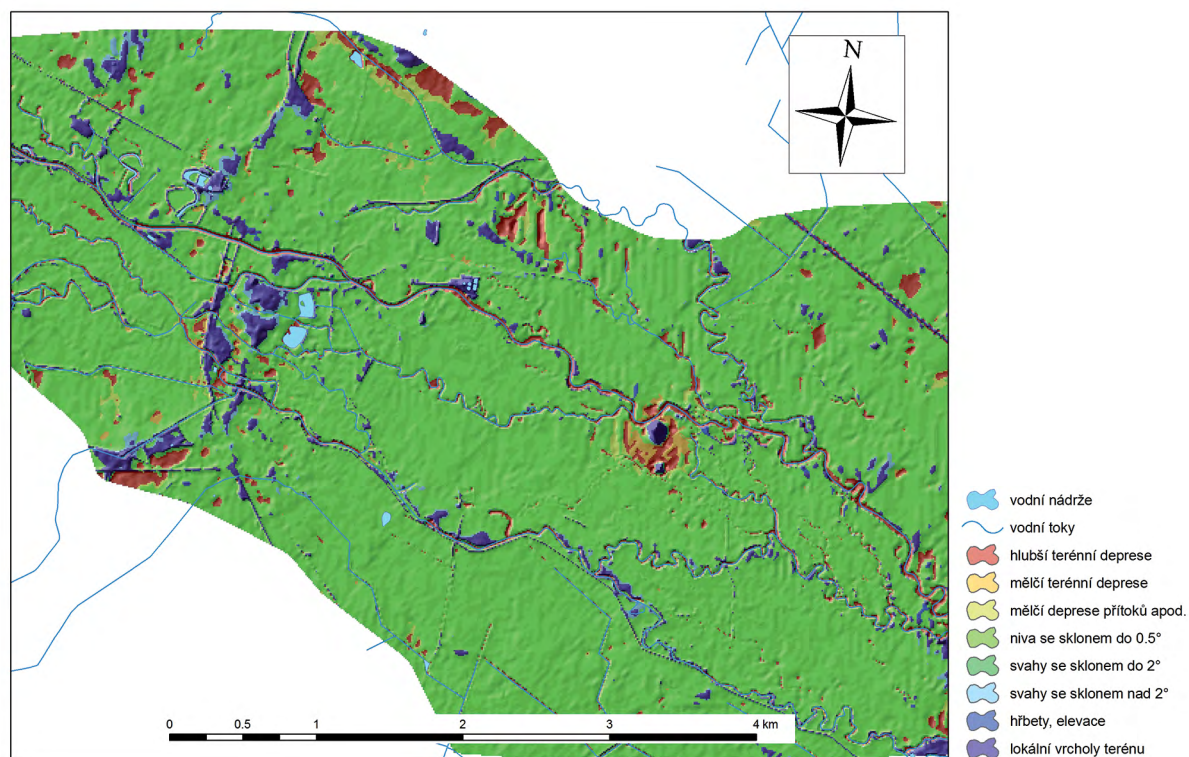
Rámcově lze postup analýz v rámci této studie rozdělit na 4 základní fáze:

1. Zpracování a analýzy geodat (tvorba a analýzy DMT, vyjádření drsností koryt a inundací), preprocessing GIS dat pro hydraulické modely
2. Schematizace hydraulických modelů HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c
3. Simulace proudění v korytech a inundacích v HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c
4. Postprocessing, analýza a dílčí statistické zhodnocení výsledků simulací v GIS

V rámci zpracování geodat dominovaly analýzy DMT a stanovení drsností dle Manninga (DYHOUSE et al. 2007) z dat o krajiněm pokryvu. Geomorfologické analýzy (morfometrické parametry DMT, klasifikace elementárních forem reliéfu apod.) byly provedeny v ESRI ArcGIS (spolu s vybranými extenzemi), GRASS GIS a SAGA GIS. Vybrané analýzy v SAGA GIS ilustruje obr. 1, výslednou mapu elementárních forem reliéfu pak obr. 2. Z výsledné mapy je patrné, že dominantním typem elementární formy reliéfu je plochá niva a koryta toku Moravy (86 %) spolu se slepými rameny, náhony a dalšími přirozenými či antropogenními prvky odtokové sítě (6 %). Měličí terénní deprese byly stanoveny pomocí kritéria  $\leq 70 \text{ cm}$ .



**Obr. 1.**  
 Analýzy DMT (morfometrie, elementární formy reliéfu, drsnosti) v SAGA GIS  
**Fig. 1.**  
 DTM analyses in SAGA GIS (morphometry, elemental terrain forms, roughness)



**Obr. 2.**  
 Mapa elementárních forem reliéfu zájmového území; výsledek analýz v ArcGIS, GRASS GIS a SAGA GIS  
**Fig. 2.**  
 Map of elemental terrain forms of the study area; result of ArcGIS, GRASS GIS and SAGA GIS analyses

Tato relativní pestrost forem reliéfu má již sama o sobě vliv na transformaci povodňové vlny, přičemž tento předpoklad potvrdily výsledky simulací v hydraulických modelech HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c a GIS postprocessing těchto výsledků. Je však zřejmé, že se jedná pouze o jeden z působících faktorů (viz dále v textu).

Dalším krokem po fázi GIS analýz byla samotná schematizace hydraulických modelů HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c. Pro schematizaci HEC-RAS a MIKE 11 byly využity extenze HEC-GeoRAS a MIKE 11 GIS pro ESRI ArcGIS, pro schematizaci MIKE 21c byly využity konverzní utility MIKE Zero a DHI Curvilinear Grid Generator, tzn. generátor křivočaré výpočetní sítě (tzv. *mesh*) pro 2D modely. Pro využití hned 2 typů 1D hydraulických modelů existují dva základní argumenty. Prvním je fakt, že lze takto srovnat dva průmyslové standardy (HEC-RAS coby freeware a MIKE 11 coby komerční produkt) a druhým skutečnost, že právě pro simulaci procesů v inundaci (tzv. *floodplain*) používají oba nástroje mírně odlišné přístupy, což může vyústit v rozdílné výsledky, a tedy i kvantifikaci vlivu lužního lesa. Pro simulaci ustáleného a neustáleného proudění pak tyto modely používají aproximace St. Venantových rovnic, případně numerická řešení Bernoulliho rovnice. Nespornou výhodou je možnost volby, a tedy i shodného nastavení numerického řešení v obou programových balících a díky tomu i eliminace nejistot vzniklých odlišným přístupem k simulaci hydraulických procesů. Schematizaci zájmového území v HEC-RAS a MIKE 11/21c znázorňují obr. 3 a 4.

Po simulaci neustáleného proudění s kulminací na úrovni  $Q_{100}$  v HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c byly verifikovány a kalibrovány hydrogramy ve zvolených profilech a poté byl proveden postprocessing v GIS a vygenerovány rastry hladin. Tyto byly srovnány s daty  $Q_{100}$  DIBAVOD a jednotlivé hydraulické modely dokalibrovány. Z těchto výsledků byly získány rastry hloubek, rychlostí a smykové napětí

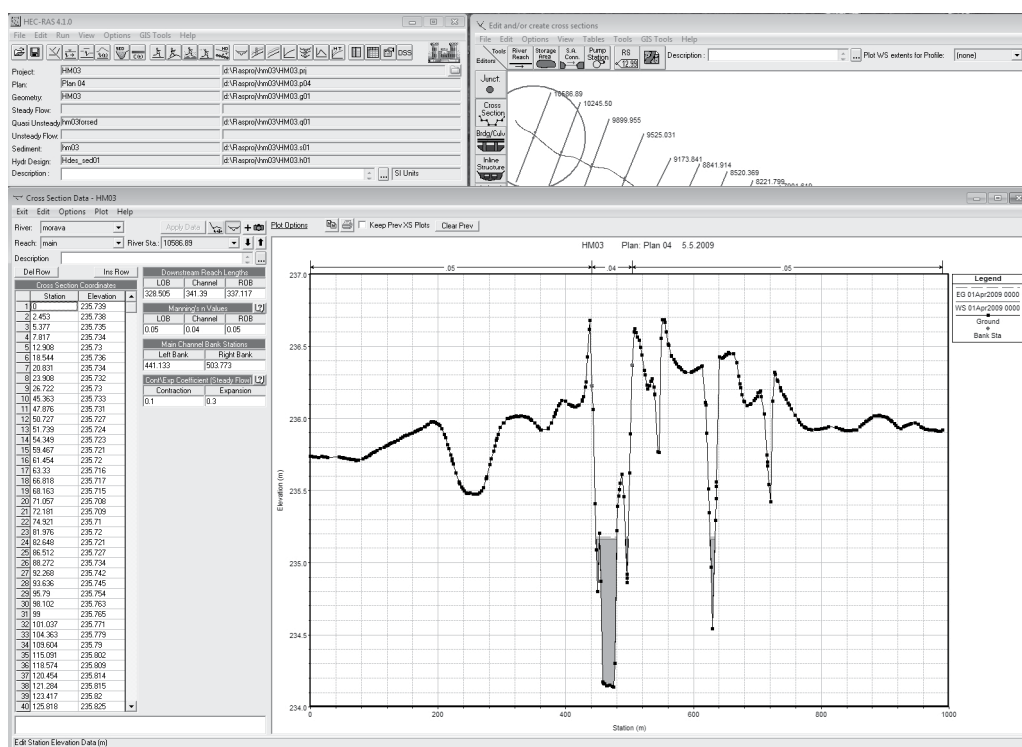
pro aktuální scénář, tedy DMT a prostorovou distribuci drsností dle Manninga.

Pomocí rastrů hloubek byl pak v GIS vyhlazen DMT celé zájmové oblasti tak, aby lokální terénní deprese na úrovni lužních porostů byly „zarovnané“. K tomuto účelu byly aplikovány nástroje ArcHydro a GRASS GIS (např. rastrový modul *r.lake*). Stejně tak byly upraveny a sníženy drsnosti dle Manninga. Takto vytvořená geodata byla využita jako nové počáteční a okrajové podmínky pro nový scénář „upravený DMT“ a další sérii simulací v hydraulických modelech HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c a konečně opětovný postprocessing těchto výsledků v GIS.

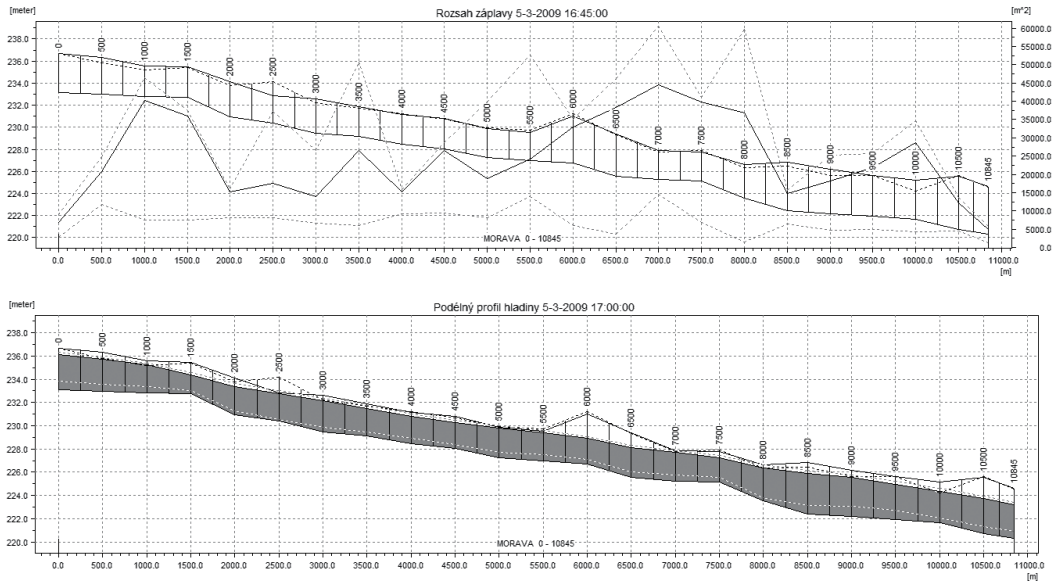
## VÝSLEDKY

Výsledky hydraulického modelování a postprocessingu potvrdily vstupní hypotézu. Pokud procesy v lužním lese z hlediska hydrologie zjednodušíme na vliv lužního lesa na snížení hodnot kulminačních  $Q$  z důvodu transformace a retence povodňové vlny v inundacích, lze konstatovat, že ve všech hydraulických modelech byly výsledky plně srovnatelné (po kalibraci se odchylky v rozsahu inundačních a rastrech hloubek pohybovaly jen lokálně v rozmezí hodnot 10–20 %, průměrná hodnota pro celou oblast činila 7 %). Při porovnání výsledků simulací a GIS postprocessingu s daty DIBAVOD či ČHMÚ je zřejmé, že hydraulické modely HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c dokázaly uspokojivým způsobem simulovat tyto situace a koeficient Nash-Sutcliffe se pro hydrogramy kalibrační epizody pohyboval nad hodnotou 0.8.

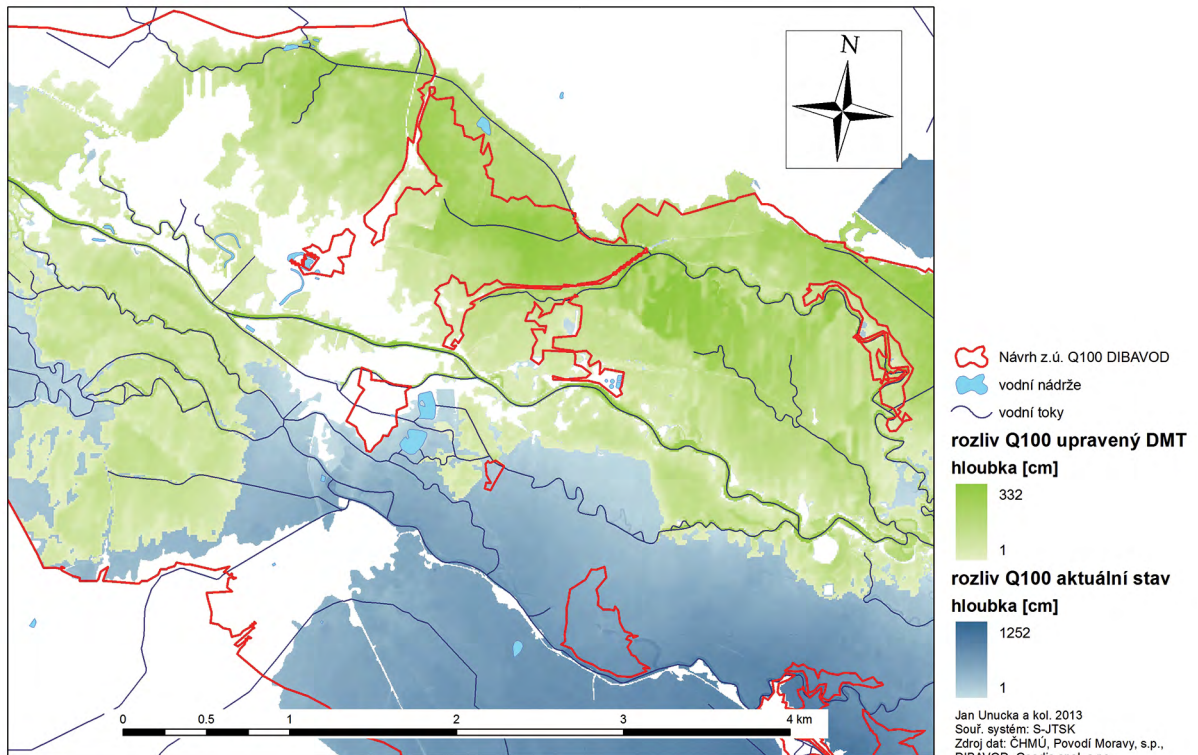
Zároveň byl prokázán poměrně velký vliv lužního lesa na snížení kulminačního  $Q$ . Toto ilustrují obr. 5 až 7.



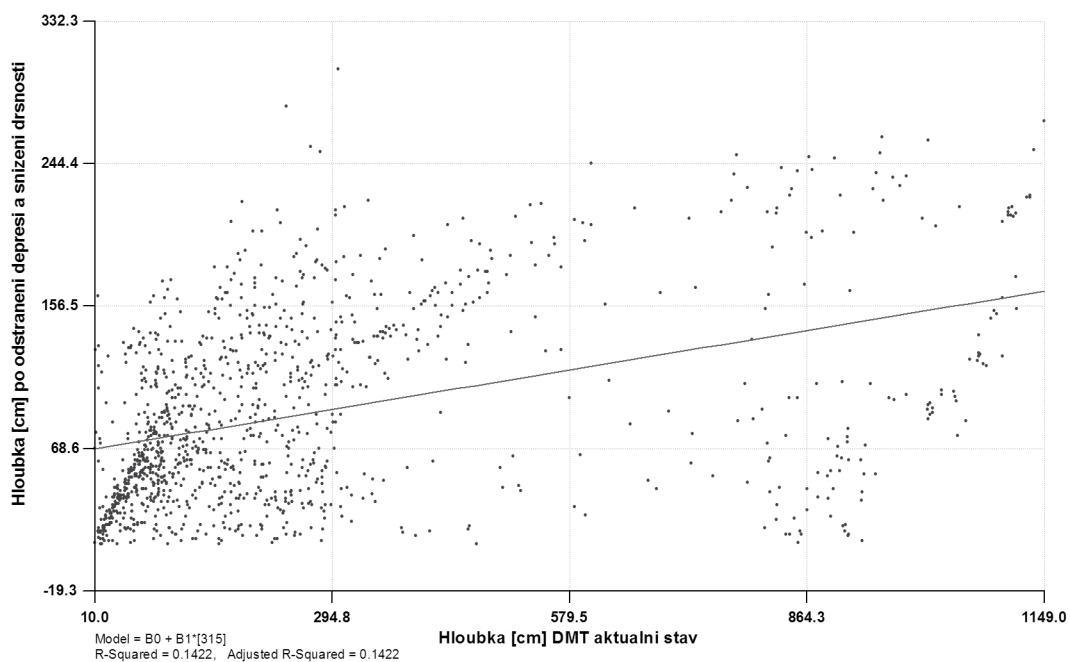
**Obr. 3**  
Schematizace v hydraulickém modelu HEC-RAS (příčný profil)  
**Fig. 3.**  
Schematization in HEC-RAS hydraulic model (cross-sections)



**Obr. 4.**  
 Výsledky simulace MIKE 11 (Q, rychlosti a profily hladin, rychlostí a rozsahu záplavy)  
**Fig. 4.**  
 Simulation results of MIKE 11 (Q, velocity and water surfaces, floodplain area)



**Obr. 5.**  
 Srovnání rozlivů vypočítaných MIKE 11/21c pro aktuální a upravený DMT  
**Fig. 5.**  
 Comparison of flood extents computed by MIKE11/21c for actual and modified DTM

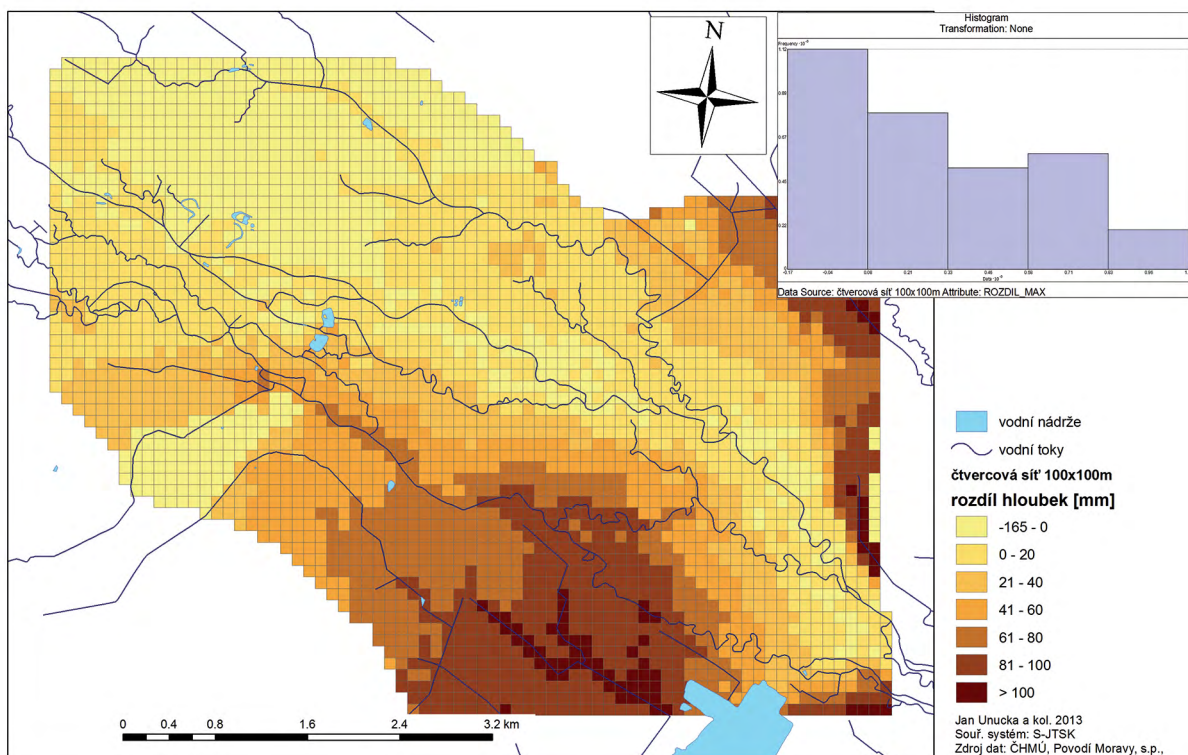


**Obr. 6.**

Geostatistické zhodnocení rastrů rozlivů

**Fig. 6.**

Geostatistical analysis of the flood extent grids



**Obr. 7.**

Rozdíly hloubek pro rozlivy MIKE11/21c generované pro aktuální a upravený DMT

**Fig. 7.**

Water depth difference for flood extents MIKE11/21c generated for actual and modified DTM

Pro vybrané epizody došlo ke snížení hodnot kulminací s maximem 27 %, což je nezanedbatelná hodnota. Na úrovni prostorových změn rozlivů byly pro některé epizody změny až na úrovni 72 %.

Obr. 7 pak ilustruje výsledek z hlediska změn v pravidelné čtvercové síti. Je celkem patrné, že v bezprostřední blízkosti vodotečí jsou rozdíly malé (na úrovni jednotek až prvních desítek mm v závislosti na hydraulických poměrech), kdežto právě v oblasti měkkého a tvrdého luhu jsou rozdíly nejmarkantnější (v ojedinělých segmentech na okrajích inundace  $Q_{100}$  se vyskytly rozdíly i nad 1500 mm). Pokud dojde ke změně hydraulických podmínek v inundaci, jsou změny i inverzní, kdy dojde k lokálnímu zvýšení úrovně hloubky vody. Tento jev nastal pro vybrané situace v 7 % segmentů pravidelné čtvercové sítě.

**Tab. 1.**

Srovnání ploch rozlivů a objemů zadržené vody pro oba simulované scénáře

Comparison of the flood extents and volumes of ponded water for both scenarios

| Scénáře                         | Plocha rozlivu [km <sup>2</sup> ] | Objem [m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Aktuální DMT, lužní les         | 27.5                              | 95657343.75             |
| Zarovnaný DMT, snížení drsnosti | 18.7                              | 35921625.00             |
| Rozdíl                          | 8.8                               | 59735718.75             |

## DISKUSE

Vliv lužního lesa na snížení hodnot kulminací, popř. objemů povodňové vlny, lze označit v zájmovém území za významný. Pokud dojde ke stavu snížení pestrosti lokální morfologie terénu (tzn. zejména odstranění terénních depresí) spolu se snížením drsnosti terénu v inundacích, dojde k nezanedbatelnému snížení rozlivů a propagaci zvýšeného magnitudy povodně níže po toku. Tento vliv je analyzován např. i v publikacích RODRÍGUEZ-ITURBE, PORPORATO (2004), BAIRD, WILBY (1999) nebo EAMUS et al. (2006), MALANSON (1993), MIDDLETON (2002). Také zkušenosti např. z povodí Odry a CHKO Poodří a vybraných povodňových situací potvrzují tuto hypotézu. Pro zobecnění těchto poznatků však schází více případových studií.

Zároveň je možné konstatovat, že pro simulace těchto procesů lze dobře využít hydraulické modely HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c. Všechny zmiňované nástroje pro tento typ případové studie úspěšně absolvovaly proces kalibrace a verifikace. Dalším aspektem je možnost komplexního řešení hydrologické studie včetně napojení na srážkoodtokový proces a hydrologickou bilanci (plně distribuovaný srážkoodtokový model MIKE SHE), hydrogeologické poměry (model proudění podzemních vod MODFLOW) či model urbánní hydrologie (MIKE URBAN). V tomto jediném ohledu je využití platformy DHI MIKE markantně efektivnější než využití platformy USACE HEC. Konsorcium USACE však v současnosti vyvíjí podobnou komplexní platformu. Jejich potenciál pro studie v rámci lužních lesů ještě dramaticky zvyšuje možnost přímého napojení na ekologické modely DHI ECO Lab a HEC-EFM [3], [4].

Aspekty využití těchto matematických modelů jsou dobře shrnuty v publikacích BEDIENT et al. (2007) a DYHOUSE et al. (2007). Aspekty nejistoty dat a úskalí nevhodného využití matematických modelů dobře diskutuje např. BEVEN (2009). V tomto ohledu je však nutné podotknout, že se jedná pouze o simulace scénářů (byť s kalibrovanými hydraulickými modely). Ideálním verifikačním prostředkem by byly hydrometrické metody ve spojení s metodami DPZ za probíhající extrémní odtokové situace, což je bohužel varianta technicky a časově takřka neproveditelná. Jak již bylo konstatováno v úvodu, matematické modely poskytují nejhodnotnější výsledky v případě existence kvalitních

vstupních dat. K prakticky shodným závěrům v podobné případové studii dochází i autorský kolektiv KOURGIALAS, KARATZAS (2013) v povodích ostrova Kréta nebo na Labi (CHATTERJEE et al. 2008). V obou případech se platforma DHI MIKE osvědčila, a to evidentně v odlišných fyzicko-geografických a hydrologických podmínkách. Podobně byl model HEC-RAS testován pro podobné analýzy v práci JOHNSON et al. (1999). Lze tedy očekávat, že počet případových studií tohoto typu a s využitím těchto hydraulických modelů bude nadále vzrůstat.

## ZÁVĚR

V rámci realizace případové studie byla vstupní hypotéza vlivu lužního lesa na transformaci a tlumení kulminačních Q povodňových vln potvrzena. Je zřejmé, že se jedná o kombinaci hned několika faktorů, přičemž maximálního účinku se dosáhne jejich synergií. Pokud situaci z hydrologického hlediska zjednodušíme a zanedbáme komponenty hydrologické bilance a srážkoodtokového procesu, jako jsou interceptce, evapotranspirace, infiltrace či perkolace, dominantními faktory zůstávají parametry reliéfu v oblastech inundací. V této skupině se pak na úrovni hydraulické transformace uplatňuje zejména drsnost terénu (ovlivněná samotným lužním lesem a výskytem dřevin měkkého a tvrdého luhu) a lokální formy reliéfu (zejména terénní deprese periodicky zaplavované vodou). Je nasnadě, že v případě nahrazení lužního lesa např. ornou půdou v rámci tzv. změn využití půdy (*land use*), může dojít ke snížení tohoto kombinovaného efektu, a to jednak odstraněním samotného porostu (drsnost), a jednak agrotechnickou náročností při obdělávání příliš komplikovaného terénu (mělčí terénní deprese). Z výše uvedených skutečností vyplývá, že lesní stanoviště krom samotné účasti v hydrologických procesech působí do značné míry jako „konzervant“ lokálních hydrologických a hydraulických podmínek a výslednic této kombinace je výše zmiňovaný synergický efekt při transformaci povodňové vlny. Rovněž byl potvrzen předpoklad vhodnosti využití GIS a hydraulických modelů, konkrétně průmyslových standardů HEC-RAS, MIKE 11 a MIKE 21c. Je zřejmé (a to byl rovněž jeden ze vstupních předpokladů), že kvalita výsledků těchto analýz, a tedy i jejich relevance v rámci studované problematiky, je přímo podmíněna kvalitou vstupních dat, přičemž zásadními datovými vstupy je digitální model terénu (DMT) a povrchu (DMP) spolu s daty o krajinném pokryvu a využití půdy (LULC). Pro data o terénu je tedy vhodné využít laserového skenování (LIDAR), což je v současnosti nejvyšší dostupná technologie pro získání přesného DMT/DMP.

### Poděkování:

Realizace tohoto článku byla mimo jiné umožněna i díky podpoře probíhající výzkumných projektů TAČR TA01021374 „Nové technologie ochrany životního prostředí před negativními následky pohybujícími se přírodních hmot“ a SGS19/PřF/2013 OU „Analýza změn složek hydrologické bilance povodí Bečvy a Bělé v podmínkách změny klimatu“, za což by autoři rádi poděkovali.

## LITERATURA

- BAIRD A.J., WILBY R.L. 1999. Eco-hydrology. Plants and water in terrestrial and aquatic environments. London, Routledge: 402 s.
- BEDIENT P.B., HUBER W.C., VIEUX B.C. 2007. Hydrology and floodplain analysis. London, Prentice Hall: 795 s.
- BEVEN K.J. 2009. Environmental modelling: An uncertain future? London, Routledge: 310 s.
- BRIDGE J.S. 2003. Rivers and floodplains. Forms, processes and sedimentary record. Oxford, Blackwell: 491 s.
- BROWN A.G. et al. 1997. Alluvial geoarchaeology. Floodplain archaeology and environmental change. Cambridge, Cambridge University Press: 377 s.

- DYHOUSE G.R. et al. 2007. Floodplain modelling using HEC-RAS. Watertown, Bentley Institute Press: 696 s.
- EAMUS D. et al. 2006. Ecohydrology: vegetation function, water and resource management. Collingwood, CSIRO Publishing: 348 s.
- CHATTERJEE C., FÖRSTER S., BRONSTERT A. 2008. Comparison of hydrodynamic models of different complexities to model floods with emergency storage areas. *Hydrological Processes*, 22 (24): 4695–4709.
- JOHNSON G.D., STRICKLAND M.D., BUYOK J.P., DERBY C.E., YOUNG D. P. 1999. Quantifying impacts to riparian wetlands associated with reduced flows along the Greybull River, Wyoming. *Wetlands*, 19 (1): 71–77.
- KANTOR P., KREČMER V., ŠACH F., ŠVIHLA V., ČERNOHOUS V. 2003. Lesy a povodně. Souhrnná studie. Praha, MŽP: 48 s.
- KOURGIALAS N.N., KARATZAS G.P. 2013. A hydro-economic modeling framework for flood damage estimation and the role of riparian vegetation. *Hydrological Processes*, 27: 515–531. DOI: 10.1002/hyp.9256
- LANGHAMMER J. (ed.) 2008. Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní. Praha, Univerzita Karlova v Praze, PřF: 276 s.
- LOŽEK V. 2011. Po stopách pravěkých dějů. O silách, které vytvářely naši krajinu. Praha, Dokořán: 181 s.
- MALANSON G.P. 1993. Riparian landscapes. Cambridge, Cambridge University Press: 296 s.
- MIDDLETON B.A. (ed.) 2002. Flood pulsing in wetlands: restoring the natural hydrological balance. New York, Wiley: 308 s.
- RODRÍGUEZ-ITURBE I., PORPORATO A. 2004. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. Soil moisture and plant dynamics. Cambridge, Cambridge University Press: 442 s.
- ŘÍHOVÁ V. 2013. Využití hydrologického modelování pro analýzu rizik území. Diplomová práce. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství: 78 s.
- SCHUMM S.A. 1977. The fluvial system. New York, Wiley: 338 s.
- ŠAFÁŘ J. et al. 2003. Chráněná území ČR. Svazek VI. Olomoucko. Praha, AOPK ČR; Brno, EkoCentrum: 454 s.
- ŠTĚRBA O. et al. 2008. Říční krajina a její ekosystémy. Olomouc, Univerzita Palackého: 391 s.
- UNUCKA J., MARTINOVIC J., VONDRÁK I., RAPANT P. 2009. Overview of the complex and modular system FLOREON+ for hydrologic and environmental modelling. In: Brebbia C.A. (ed.): River basin management V. International conference on river basin management. Mellieha, Malta. Southampton, WIT: 207–216.
- UNUCKA J. 2010. Možnosti propojení GIS a environmentálních modelů pro potřeby krizového řízení a ochrany přírody. Habilitační práce. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta: 241 s.
- VÁLEK Z. 1977. Lesní dřeviny jako vodohospodářský a protierozní činitel. Praha, Státní zemědělské nakladatelství: 203 s.

**Online zdroje:**

- [1] [http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps\\_prfbk\\_detail.php?seq=307337](http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307337)
- [2] <http://www.fema.gov/software>
- [3] <http://www.dhisoftware.com/Products/ECOLab.aspx>
- [4] <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-efm/>

## CONTRIBUTION TO THE POSSIBILITY OF IDENTIFYING THE FLOODPLAIN FOREST IMPACT TO THE FLOOD WAVES MITIGATION USING 1D AND 2D HYDRAULIC MODELS AND GIS

### SUMMARY

The paper deals with the verification of input assumptions influence of floodplain forest to control floods and selected characteristics of flood waves, the most important being the value of peak flow and flood volume. Floodplain forest is directly involved in the rainfall-runoff process due to the influence of rainfall interception, evapotranspiration and the protective effect of forest on the hydrological and hydraulic properties of soils. Some of these components of hydrological balance, however, without installing adequate monitoring network are difficult to measure; evapotranspiration values are even then subject to considerable uncertainty. Second important but neglected parameter in this case study is the infiltration and percolation amount in the quaternary fluvial sediments within the inundation areas during the flood events. Adequate model development and schematization for simulating such issues requires using of tensiometers and adequate parameterization of rainfall-runoff model (e.g. MIKE SHE) and its further coupling with the hydraulic model. On the other hand, it can be expected that the dominant factors are the morphometric parameters and terrain roughness within the inundation areas. These effects dominate in the case of overflow water from river courses into the inundations. These effects were in the main focus of the author's contribution. Using spatial accurate digital terrain model (e.g. spatial resolution, height values) obtained using laser scanning technology, the geodetical bearing of the watercourses and data on land cover and land use were first analyzed in the ESRI ArcGIS, GRASS GIS and SAGA GIS software packages. The classification of elementary forms of relief was among the basic terrain analyses (see Fig. 1 and 2) together with the standard parameters such is slope, aspect, tangential and profile curvature, first derivation and valley width. Hydraulic model HEC-RAS, MIKE 11 and MIKE 21c were schematized and calibrated after this step and these models simulated various historically occurred and design runoff situations at the level of flood events, when the values of N-year return period were reached or exceeded in the profiles. Statement of this case study is fact, that using these analyzes the impact of floodplain forest clearly demonstrated the effect of floodplain forests, when the value of accumulated water reached the amount of 60 million m<sup>3</sup> during selected runoff situations. It is obvious that the influence of riparian forest cannot be underestimated. The verification of the hydraulic models sufficiency for such type of studies was the second main outcome of this case study. HEC-RAS, MIKE 11 and MIKE 21 results has a good spatial accuracy using confrontation with N-year return periods flood lakes of DIBAVOD datasets and the extents of fluvisols and quaternary fluvial sediments extents (see Fig. 5).