

## VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

### Výzkum a činnost katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování FŽP ČZU v Praze

Pavel Pech, Petr Máca, Jiří Pavlásek

Mimořádné číslo VTEI představuje vybrané výsledky výzkumu realizovaného v posledních letech na katedře vodního hospodářství a environmentálního modelování Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze – dále KVHEM. Z tohoto důvodu bychom také rádi seznámili širší odbornou veřejnost s historií, zaměřením a vybranými aktivitami katedry.

Historie katedry je výrazně formována rokem 1952, kdy vznikla Vysoká škola zemědělská (VŠZ), na které byl později založen v rámci Agronomické fakulty obor meliorací. V souvislosti s jeho založením přešla část pracovníků se zaměřením na vodní hospodářství a meliorace z ČVUT na nově vzniklou VŠZ a stála při vzniku katedry základů vodního hospodářství.

Jedním z prvních vedoucích byl prof. Ing. Jaromír Němec, CSc., dále vedl katedru doc. Ing. Miloslav Moudrý, CSc., a od roku 1995 prof. Ing. František Hrádek, DrSc.

Katedra základů vodního hospodářství přešla po vzniku Lesnické fakulty v roce 1990 na tuto fakultu s novým názvem – katedra vodního hospodářství. Její činnost byla a je spjata především se studijním programem Krajině inženýrství. Lesnická fakulta byla v roce 2003 přejmenována na Fakultu lesnickou a environmentální (FLE) ČZU v Praze.

V roce 2006 se katedra s nově vzniklým magisterským studijním oborem Environmentální modelování a připojením Analytické laboratoře v Kostelci nad Černými lesy transformovala na katedru vodního hospodářství a environmentálního modelování. Po rozdělení FLE v roce 2007 je katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování součástí Fakulty životního prostředí (FŽP). V současné době na katedře působí jeden profesor, jeden docent, 13 odborných asistentů, z nich sedm s titulem CSc. nebo Ph.D. a tři technické síly.

Od 60. let minulého století katedra zajišťuje výuku v předmětech zaměřených na vodní hospodářství, povrchovou a podpovrchovou hydrologii a hydrauliku. Dále se specializuje na vodárenství, stokování, chemii životního prostředí, úpravu pitných a čištění odpadních vod, hydrauliku podzemních vod, transport znečištění v povodí, hydrologické a hydraulické modelování, hypopedologii, aplikovanou hydroinformatiku, malé vodní

nádrže, atmosférické procesy, transport znečištění v ovzduší. Nově se pak katedra zaměřuje na posouzení možných dopadů klimatických změn na hydrologické procesy v krajině.

V posledních pěti letech KVHEM připravila akreditaci nových studijních oborů, které v současné době garantuje – bakalářský obor Vodní hospodářství (od roku 2008) a navazující magisterský obor Environmentální modelování (2006), kde se podařilo zapojit do výuky špičkové odborníky z vybraných oblastí environmentálních věd (prof. Jaňour z Ústavu termomechaniky AV ČR, doc. Lachout z MFF UK, doc. Mayer a prof. Matoušek z ČVUT Praha, doc. Zeman z DHI a další).

V roce 2009 se podařilo pod garancí katedry získat akreditaci doktorského oboru Environmentální modelování vyučovaného v českém i anglickém jazyce, kde kromě akademických pracovníků z ČZU – doc. Frýdy, doc. Vacha, prof. Wittlingerové, prof. Borůvky, doc. Kodešové, doc. Vymazala, prof. Pecha jsou mezi externími členy špičkoví odborníci ve svých oborech prof. Vogel a prof. Matoušek – FSv ČVUT, prof. Jaňour – ÚT AV ČR, doc. Hrkal – VÚV, doc. Zeman – DHI, RNDr. Daňhelka – ČHMÚ Praha. Významnou posilou oboru jsou také zahraniční členové Dr. hab. Renata Romanowicz (Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warszawa, Polsko) a Drs. Paul J. J. F. Torfs (Wageningen University, Nizozemí), kteří se aktivně podílejí na výchově doktorandů a výzkumné činnosti realizované v rámci oboru.

Výzkumná činnost katedry je zaměřena na problematiku studia a modelování vybraných environmentálních procesů. Středem zájmu je modelování hydrologických procesů v malém měřítku a v měřítku zdrojových povodí.

Důraz je kladen na řešení vybraných otázek z oblasti hydrauliky podzemních vod, studium proudění v porézním prostředí, modelování srážkoodtokového procesu na malých povodích, modelování proudění v mezní vrstvě atmosféry, modelování transportních procesů v podpovrchových i povrchových vodách a v atmosféře. Zvláštní pozornost je věnována problematice odvodnění urbanizovaných území.

Součástí katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování jsou dvě laboratoře. **Analytická laboratoř v Kostelci nad Černými lesy** je zaměřena na chemické rozborů vzorků přírodního prostředí – vody, půdy, organického materiálu apod. Analýzy jsou orientovány zejména na zjišťování obsahu znečišťujících, ale i přirozeně zastoupených anorganických látek na úrovni minoritních a stopových koncentrací. Druhou laboratoř je **Laboratoř pro studium proudění vody v porézním prostředí**, která byla založena v roce 2007, částečně z prostředků grantu FRVŠ 1494/2007, částečně z investic FŽP a dalších zdrojů. Analýzy jsou orientovány na zrnitostní rozborů půd, stanovení nasycené hydraulické vodivosti, stanovení retenčních křivek a další.



Obr. 1. Uzávěrový profil povodí Modrava 1 – lokalita V Koutě



Obr. 2. Monitoring dynamiky sněhové pokrývky na povodí Modrava 2 – lokalita Medvědí doupě

Katedra spravuje tři experimentální mikropovodí v horních partiích NP Šumava a jedno v CHKO Šumava, na kterých probíhá kontinuální monitoring vybraných environmentálních procesů. Obrázek 1 ukazuje uzavěrový profil povodí Morava 1 – V Koutě. Modravská povodí byla vybudována katedrou vodního hospodářství a katedrou biotechnických úprav krajiny LF ČZU v roce 1998 v rámci výzkumných aktivit grantového projektu VaV 620/6/97 „Obnova biodiverzity a stability lesních ekosystémů v pásmu přirozeného rozšíření smrku na území NP Šumava“. V povodích je realizován experimentální výzkum (obr. 2).

Další experimentální povodí spravované katedrou je povodí Pastouška, které bylo zřízeno v období 2006–2008. Povodí se nachází v pramenné oblasti Němčického potoka a jeho plocha je 1,6 km<sup>2</sup>. Na tomto experimentálním povodí byla v roce 2006 založena meteorologická stanice, k povodnímu vybavení byla v průběhu roku 2007 pořízena další čidla pro snímání přízemní teploty, půdních vlhkostí a teploty. V uzavěrovém profilu povodí byla v roce 2008 vybudována měrná trať o délce 18 m, která umožňuje přesné měření průtoků.

V rámci aplikované výzkumné činnosti se KVHEM dále zaměřuje na poradenskou a posudkovou činnost ve výše uvedených oblastech. Zvláštní důraz je kladen na poskytování poradenství v rámci protipovodňové ochrany malých územních celků, v oblasti podpovrchové hydrologie, sanací, návrhové činnosti v rámci městského odvodnění a transportních procesů v ovzduší. Výzkumné projekty jsou orientovány na granty NAZV, CIGA ČZU a IGA ČZU v Praze.

Pro poradenskou a posudkovou činnost ve vodním hospodářství a environmentálním modelování je úspěšně využívána celá řada moderních simulačních nástrojů: programy Processing ModFlow, DesQ-MAX Q, Hec-HMS, Hec-RAS, GMS, Fluent, CHS, CAD, matematické a statistické prostředky Scilab, R, Matlab, programovací nástroje a jazyky Delphi, C++. Vedle uvedených softwarových produktů vyvíjí KVHEM vlastní softwarové nástroje orientované na podporu řešení vybraných vodohospodářských problémů.

Pro podporu řešení problematiky podpovrchových vod jsou na KVHEM vyvíjeny modely: **FitIII** – řešení průsaků pod hydrotechnickými konstrukcemi a štětovými stěnami na nepropustném podloží konečné nebo „nekonečné“ výšky pomocí konformního zobrazení, **Prusak** – řešení průsaku zemními hrázemi – homogenními i s těsnícím jádrem uprostřed nebo u návodního

líce, s různým uspořádáním vzdušného líce hráze, včetně různých typů drénů a **DruTra2D** – řešení 2D proudění nenasycenou zónou.

Pro podporu řešení problematiky modelování srážkoodtokového procesu byly na KVHEM sestaveny modely: **PONS – Hydromozek** a **FORTANNS** pro řešení krátkodobé predikce odtoku neuronovými sítěmi se zaměřením na vrstevnaté perceptrony, evoluční algoritmy a datově orientované srážkoodtokové black box modely.

Katedra rozvíjí spolupráci s vybranými českými a zahraničními pracovišti, která dlouhodobě působí v oblasti vodohospodářské a environmentální problematiky (WUR Wageningen, DHI Water & Environment, VÚV TGM, VÚMOP, UH AV ČR, MFF UK Praha, Vodní zdroje, GLÚ AV ČR, ČHMÚ a další).

Zahraniční vztahy katedry jsou orientovány na Dánský hydraulický institut (DHI) a Hydrology and Quantitative Water Management Group Wageningen University, Nizozemsko. Katedra se dlouhodobě podílí na zajišťování postgraduálních kurzů v hydrologii pod záštitou UNESCO a WMO.

Od roku 2007 KVHEM pravidelně organizuje týdenní workshop zaměřený na konceptuální hydrologické modelování, který je spolupořádán s Hydrology and Quantitative Water Management Group WUR. Workshop je zaměřen na podporu vzdělávání mladých hydrologů a rozšiřuje vzdělání studentů doktorských, magisterských a bakalářských vodohospodářsky orientovaných oborů. Od roku 2007 byl tematicky zaměřen na obecné principy kalibrace hydrologických modelů, na použití přenosových funkcí, modelů lineárních nádrží a neuronových sítí, příklady vybraných konceptuálních hydrologických modelů, jejich součástí, možnosti numerického řešení, citlivostní analýzy konceptuálních modelů, CHiMeRa – framework konceptuálních hydrologických modelů a další. Poslední workshop „**Uncertainties in conceptual hydrological modeling in Šumava 2010**“ byl zaměřen na odhad neurčitosti při hydrologickém modelování.

Od roku 2009 KVHEM pořádá konferenci **HYDROMODE** pro mladé vědecké pracovníky a doktorandy, zaměřenou na prezentování svého výzkumu v oblasti hydrologie, environmentálního modelování a vodního hospodářství.

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování  
Fakulta životního prostředí ČZU v Praze  
Kamýcká 1176, 165 21 Praha 6-Suchbát  
tel.: 224 382 132, e-mail: pech@fzp.czu.cz**

## OPTIMALIZACE PARAMETRŮ UČENÍ A ARCHITEKTURY NEURONOVÝCH SÍTÍ POMOCÍ EVOLUČNÍCH ALGORITMŮ

Vojtěch Havlíček

### Klíčová slova

neuronové sítě – evoluční algoritmy – předpověď průtoků – optimalizace

### Souhrn

**Příspěvek se zabývá problematikou optimalizace parametrů učení a architektury neuronových sítí pomocí evolučních algoritmů. Optimalizovaná síť byla testována při krátkodobé předpovědi průtoků (6 h) na povodí horního toku řeky Sázavy.**

**Použitým typem neuronové sítě byl vícevrstevný perceptron s učením zpětnou propagací chyby. Po optimalizaci parametrů byly neuronové sítě natrénovány a byly provedeny simulace. Kvalita předpovědi byla hodnocena vybranými kritérii.**

**Z výsledků vyplývá, že optimalizované neuronové sítě mají při krátkodobé předpovědi dobré výsledky. Optimalizace parametrů přispívá ke zlepšení kvality předpovědi a může být využita pro přesnější volbu hodnot parametrů ovlivňujících učení a simulace.**

### Úvod

Příspěvek je věnován použití modelu umělých neuronových sítí (NS) pro předpověď průtoků. Parametry modelu, které ovlivňují učení neuronové sítě a její architekturu, byly optimalizovány pomocí evolučních algoritmů (EA).

Cílem práce bylo otestovat metodu automatické volby parametrů NS a provést tímto modelem předpověď průtoků na řešeném vodním toku. Délka předpovědi byla 6 hodin. Dalším cílem bylo zvážit vliv optimalizace zvolených parametrů na potlačení negativních jevů doprovázejících zobecnění NS pro data obsahující výrazně jiné vlny, než které byly k dispozici při učení (trénování). Mezi uvažované negativní jevy při delším kroku předpovědi patří časový posun (time shift) a špatná generalizace při rozdílných trénovacích a validačních datech.

Výzkum na poli NS odstartovala práce McCullocha a Pittse [9] a od té doby prošly metody NS masivním vývojem. Neuronové sítě jsou v současné době, i přes některá úskalí, která jejich vývoj provázela, hojně využívanou a zavedenou heuristickou metodou.

Zahraničních prací věnovaných obecně NS je velké množství. Pro seznámení se s teorií NS je možné doporučit práce [3, 8, 10, 11, 13]. Princip fungování NS spočívá ve zjednodušeném napodobování procesů probíhajících v nervové soustavě živých organismů. Stejně jako u živých organismů je základním stavebním kamenem NS neuron – hrubá matematická reprezentace chování nervové buňky. Základní charakteristikou modelu NS je schopnost učit se. Při učení se NS snaží rozpoznat a zapamatovat si vztahy a závislosti ve vstupních datech. NS nacházejí uplatnění při řešení komplexních úloh, při kterých je s výhodou využíváno strojové učení.

Použití neuronových sítí v hydrologii nemá tak dlouhou historii, výraznější využití této metody je zaznamenáno teprve v posledních dvou desetiletích [5]. Z oblasti hydrologického modelování pomocí NS je nutné zmínit zahraniční práce [1, 2, 6, 7] a od tuzemských autorů například práce [11, 14, 15].

Pro optimalizaci parametrů učení a architektury NS byly použity algoritmy založené na evoluční strategii (dále jen evoluční algoritmy – EA). Tato metoda je velmi podobná genetickým algoritmům, operace se zde však provádí přímo s reálnými hodnotami, nikoliv s jejich bitovou interpretací [17]. Z oblasti věnované evolučním technikám je možné doporučit práce [10, 12, 15, 17].

V úvodu tohoto příspěvku jsou stručně popsána data, která byla použita pro předpověď. V další části je rozebrána metodika práce, následovaná prezentací a diskusí dosažených výsledků. Poslední částí je závěrečné zhodnocení.

### Data

Předpověď modelem NS byla prováděna pro povodí Sázavy, uzavírací profil stanice Havlíčkův Brod-Pohledští Dvořáci. Plocha povodí k tomuto profilu je 381,06 km<sup>2</sup>. Vstupními daty pro model NS byla jen průtoková a srážková data v hodinovém kroku. Srážková data byla použita ze srážkoměrné stanice Vatín. Záměrem práce bylo použít data co nejméně upravená a samotný model NS aplikovat bez výrazných úprav dat. Žádný preprocessing dat nebyl uskutečněn. Jedinými úpravami byl výběr vln a jejich subjektivní rozdělení na dvě třídy – malé vlny ( $Q_{\max} < 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a velké vlny ( $Q_{\max} \geq 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Malé vlny, kterých bylo 11 o celkové délce 1 449 záznamů, sloužily jako data pro učení sítě, čtyři velké vlny o celkové délce 1 769 záznamů byly použity jako validační data. Kulminální průtoky malých vln byly v rozmezí od 4,14 do 25,1 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, kulminální průtoky velkých vln měly rozpětí od 33,62 do 73,24 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Ve validačním souboru byly tedy vlny s kulminálním průtokem 1,3 až 2,9násobně větší než nejvyšší kulminální průtok v trénovacích datech.

### Metodika

Pro předpověď průtoků na vybraném povodí byl použit model neuronových sítí typu vícevrstevného perceptronu. Parametry ovlivňující učení a archi-

tekturu sítě byly optimalizovány pomocí EA (viz dále). Učícím algoritmem sítě byla zpětná propagace chyby (BPA) v tzv. online režimu učení. Princip fungování NS s BPA zde není uveden, tato technika je podrobně popsána v literatuře [3, 13, 16].

Fungování modelu NS s BPA je založeno na výpočetních operacích probíhajících v prostoru, obsahujícím neurony (vstupní, skryté a výstupní) a spoje jednotlivých neuronů, jejichž síla je vyjádřena hodnotou váhy daného spoje. Neurony se řadí do jednotlivých vrstev. V použité architektuře sítě byla zastoupena vrstva neuronů vstupních, jedna až dvě vrstvy skrytých neuronů a vrstva výstupní, s jedním neuronem. Výstupem z poslední jmenované vrstvy je vypočtená hodnota předpovědi. Všechny neurony v každé vrstvě jsou spojeny se všemi neurony následující vrstvy. Výše zmíněné základní stavební prvky sítě (neurony) fungují jako transformační signály, který je do nich přiváděn spoji z nejbližší vrstvy proti směru šíření signálu. Výstupem neuronu je jediná hodnota, která je sítí přenášena do další vrstvy po směru šíření signálu. Hodnota výstupu závisí na sumě vstupů do neuronu a na použité aktivační funkci neuronu. Pro NS s BPA se nejčastěji používají dva typy aktivačních funkcí – logistická sigmoida a funkce hyperbolického tangentu [2]. Na základě zkušenosti byla pro účely této práce vybrána hyperbolická tangenta, kvůli vyšší efektivitě při učení a lepší kvalitě předpovědí. Zvolenou aktivační funkci měly všechny neurony skrytých vrstev a vrstvy výstupní.

Učení neuronové sítě probíhá ve dvou fázích – dopředné šíření signálu a zpětná propagace chyby v síti spojená se změnou hodnot vah na spojích jednotlivých neuronů. Váhy jsou na začátku výpočtu nastaveny náhodně. Hodnota chyby je stanovena na základě rozdílu hodnoty předpovědi vypočtené sítí a hodnoty skutečně naměřené v čase předpovědi (trénovací data).

Naučená síť byla validována na souboru dat, která nebyla použita pro učení – validační data.

Ve validační množině dat byly záměrně zastoupeny pouze vlny, jejichž kulminační průtok byl vyšší než u všech vln použitých při trénování. Při takovém rozdělení dat bylo možné prověřit chování modelu při situacích, na něž nebyl připraven, a které ve skutečnosti způsobují možné selhání předpovědního systému s negativními důsledky pro pozorované povodí.

Kvalita a rychlost naučení sítě závisí na mnoha parametrech, z nichž ty hlavní byly v této práci stanoveny optimalizací pomocí evolučních algoritmů. Jednalo se o parametry určující architekturu sítě – počet vstupů, počet skrytých vrstev a počet neuronů ve skrytých vrstvách, včetně přítomnosti jednotkového neuronu (bias). Stanovení těchto parametrů je do značné míry ovlivněno charakterem úlohy a zkušeností uživatele. Existují sice techniky, které pomáhají při optimalizaci architektury sítě (dynamické sítě, pruning algoritmy, kaskádová korelace aj.) [2, 7, 8, 10, 13], ale v praxi je často tento problém řešen buď na základě zkušenosti, nebo metodou pokus-omyl [2, 8].

Dalšími optimalizovanými parametry byly parametry ovlivňující učení sítě – koeficient rychlosti učení (learning rate), vyhlazovací faktor (momentum) a počet epoch učení. Počet epoch i hodnoty parametrů byly voleny v takovém rozmezí, aby bylo potlačeno nebezpečí přeučení sítě.

Váhy učení sítě byly optimalizovány klasicky metodou BPA.

Optimalizace i následná předpověď probíhala pro dvě rozdílné transformace vstupních dat. Jedním typem transformace byla nelineární normalizace (rovnice 1) a druhým typem byla lineární průběžná normalizace (rovnice 2), která byla v průběhu práce odvozena jako lépe fungující alternativa ke klasické lineární transformaci. Obě tyto úpravy dat pro NS zaručují lepší předpovědi než často používaná jednoduchá lineární normalizace.

$$IN_{tr,i} = 1 - e^{-\alpha IN_i}, \quad i = 1, \dots, N_{in} \quad (1)$$

$$IN_{tr,i,j} = B_{min} + \frac{(IN_{i,j} - IN_{max,j})(B_{max} - B_{min})}{IN_{max,j} - IN_{min,j}}, \quad i = 1, \dots, N_{in,j}; j = 1, \dots, N_v \quad (2)$$

kde  $IN_i$  je původní hodnota vstupních dat,  $IN_{tr,i,j}$  je transformovaná hodnota vstupních dat,  $e$  je základ přirozených logaritmů,  $\alpha$  je koeficient ovlivňující míru transformace (pro nelineární transformaci byl také předmětem optimalizace),  $IN_{i,j}$  je  $i$ -tý vstup  $j$ -tého vzoru vstupních dat,  $IN_{tr,i,j}$  je odpovídající transformovaný vstup,  $IN_{max,j}$  a  $IN_{min,j}$  je maximální, respektive minimální hodnota vstupů v  $j$ -tém vzoru vstupních dat,  $B_{min}$  a  $B_{max}$  jsou volitelné hodnoty rozsahu lineární transformace,  $N_{in}$  je celkový počet vstupních dat k transformaci,  $N_{in,j}$  je počet dat v  $j$ -tém vzoru a  $N_v$  je počet vzorů. Vzor je soubor dat vstupující do sítě v jednom výpočetním kroku.

První částí práce byla optimalizace parametrů NS pomocí EA. Při optimalizaci pomocí EA je optimální sada parametrů vybírána z původně vygenerovaných možností – jedinců. Každý jedinec je pak testován jako možné řešení daného problému. Jedinci jsou vystaveni selekčnímu tlaku a do další generace postupují jen ti nejzdatnější z nich – ti, kteří poskytli nejlepší řešení problému. V každé následující generaci se úspěšní jedinci kříží (výměna parametrů ve formě reálných nebo celých čísel), a vznikají tak noví jedinci, kteří jsou kombinací vlastností rodičů. Reprezentace jedinců (optimalizované parametry) mohou s určitou pravděpodobností projít mutací – tj. náhodnou změnou své hodnoty. Noví i původní jedinci (rodiče) jsou vystaveni opět výběru a proces se opakuje. Postup do další

generace, a tedy i možnost křížení a přežití jedinců jsou závislé na jejich zdatnosti (fitness) při řešení zvoleného problému. Pro stanovení pravidel křížení existuje mnoho metod [10, 17]. Optimalizace je nejčastěji ukončena po dosažení určitého počtu generací, nebo určité hodnoty fitness kritéria, tj. funkční hodnoty, podle které se hodnotí zdatnost jedinců.

Pravděpodobnost účasti jednotlivých přeživších jedinců na křížení byla pro účely této práce stanovena metodou ruletového kola a na křížení se podílela úspěšnější polovina jedinců z celkového počtu v každé generaci. Zdatnost jedince byla vypočítána jako kvalita předpovědi naučenou sítí dosažená na učicích nebo validačních datech. Jako fitness kritérium byl použit index persistence (rovnice 4). Toto kritérium je zároveň mírou kvality předpovědi daného jedince. Délka optimalizace byla 40 generací. Počet jedinců generovaných ve startovní generaci byl 500, do další generace postupovalo 50 % nejlepších jedinců. Pravděpodobnost mutace byla stanovena 15 %.

Při optimalizaci parametrů architektury sítě byla rozpětí možných hodnot volena tak, aby byly testovány menší sítě, které jsou nenáročné na počty vstupních dat a výpočetní rychlost a jsou relativně odolné k přeučení. Stejně volbě podléhal i parametr počtu epoch, kdy možné hodnoty byly nižší (max. 600), opět z důvodu zabránění přeučení a zajištění vyšší rychlosti trénování sítě (což ovlivňuje i rychlost optimalizace). Tento subjektivní prvek musel být zahrnut, jelikož použitá neuronová síť nepoužívala k potlačení přeučení cross-validaci na testovacím datovém setu. Délka historie vstupních průtoků a srážek byla volena z rozpětí 1–10 pro předpověď na 6 hodin. Počet skrytých vrstev mohl být 1 nebo 2 vrstvy s počty neuronů z rozsahu 1–15. Bias byl buď použit, nebo nebyl. Počet epoch měl rozpětí 10–600, learning rate a momentum mohlo nabývat hodnot 0,1–0,9, rozsah parametru alfa u nelineární transformace byl volen z rozsahu  $5 \cdot 10^{-2}$ – $5 \cdot 10^{-4}$ .

Výše zmíněnou optimalizací byly získány výsledné sady parametrů, které náležely jedincům s nejvyšší hodnotou fitness kritéria. Optimalizace byla provedena s cílem najít sadu parametrů, která je nejvhodnější pro učení a naučená síť má nejlepší kvalitu předpovědi. Zároveň však byla provedena optimalizace parametrů, která měla za cíl nalézt sady parametrů, které budou poskytovat nejlepší předpověď při validaci. Tento krok v praxi není možný (validační soubor reprezentuje „neznámá“ data), avšak pro účely této práce byl nezbytný. Cílem bylo zjistit, jestli a jak moc ovlivní samotná volba parametrů sítě (učení vah probíhalo vždy na učicích datech) kvalitu predikce při validaci.

Po optimalizaci následovalo použití neuronové sítě pro výpočet předpovědi. Nastavení parametrů odpovídalo nejlepším výsledkům optimalizace. Předpověď byla prováděna pro délku 6 hodin. Síť s optimalizovanými parametry byla vždy 10x trénována, s různými inicializacemi vah – ve výsledku tedy šlo o deset různě naučených sítí – modelů. Hodnoty kritérií jsou prezentovány jako průměr z výsledků těchto deseti modelů, spolu s uvedením maximální a minimální hodnoty daného kritéria pro danou délku předpovědi. Kvalita předpovědi byla hodnocena pro trénování i validaci. Při předpovědi na trénovací množině dat byla síť předložena data, na kterých se učila, tj. neuronová síť tato data „znala“. Při předpovědi na množině validačních dat byla síť předložena neznámá data s 1,3–2,9násobně vyššími hodnotami kulminačních průtoků.

Jako kritéria pro hodnocení kvality předpovědi byla zvolena tři kritéria – Nash-Suttclifův koeficient (NASH) uvedený v rovnici (3), index persistence (PERI) uvedený v rovnici (4) a průměrná absolutní chyba (MAE) uvedená v rovnici (5). Index persistence byl použit i jako fitness kritérium při optimalizaci.

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_q} (Q_i - Q_i^*)^2}{\sum_{i=1}^{N_q} (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3)$$

$$PERI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_q} (Q_i - Q_i^*)^2}{\sum_{i=1}^{N_q} (Q_i - Q_{i-p})^2} \quad (4)$$

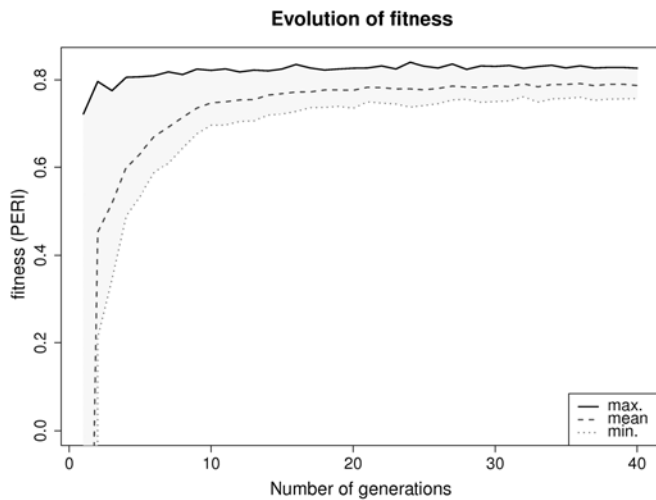
$$MAE = \sum_{i=1}^{N_q} |Q_i - Q_i^*| \quad (5)$$

kde  $Q_i$  je průtok v daném čase,  $Q_i^*$  je předpověď průtoků pro daný čas,  $\bar{Q}$  je střední hodnota průtoků,  $N_q$  je počet předpovídaných průtoků,  $p$  je délka předpovědi.

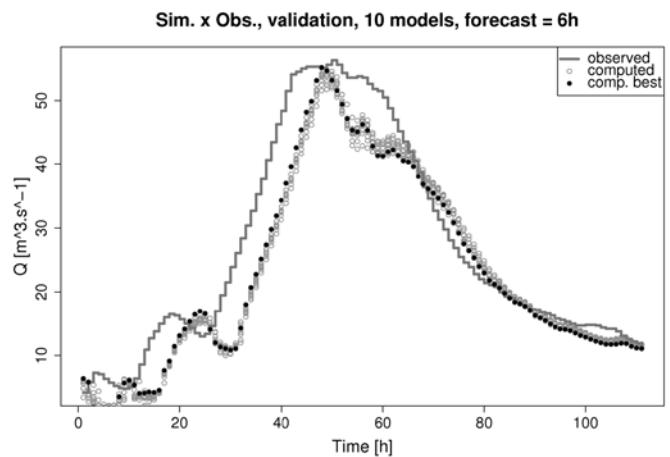
Pro práci s neuronovými sítěmi a evolučními algoritmy byl vytvořen software v programovacím jazyce FORTRAN 95.

## Výsledky a diskuse

Prezentované výsledky jsou rozděleny do dvou částí, a to v závislosti na použité transformaci dat – lineární a nelineární transformace. Výsledky pro zvolené transformace se dále dělí z hlediska cíle optimalizace, tj.



Obr. 1. Vývoj optimalizace, opt. – učení, linear. trans.



Obr. 2. Měření a predik. průtoky, valid. data – 6 h, opt. – učení

předpověď NS s optimalizovanými parametry pro učení a optimalizovanými parametry pro validaci. Optimalizace při předpovědi na validačních datech je zde uvedena pro srovnání efektivity a demonstrování vlivu správně nastavených parametrů sítě na naučení sítě a kvalitu předpovědi.

Prezentovanými výsledky jsou graf vývoje optimalizace a tabulka nejlepších sad parametrů získaných optimalizací. Dále je ukázána předpověď NS na vybrané povodňové vlně při validaci (uvedená kritéria byla počítána pro celé soubory trénovacích a validačních dat).

Grafy optimalizací ukazují vývoj maximální (plná čára), minimální (tečky) a průměrné (přerušovaná čára) hodnoty fitness kritéria v průběhu optimalizace.

V grafu s průběhem předpovědi jsou původní data šedě plnou čarou, model s nejlepší předpovědí (podle PERI) má plně černé body, ostatní modely jsou vykresleny šedým prázdným bodem.

### Lineární transformace dat

#### Optimalizace parametrů pro předpověď na trénovacích datech

Optimalizací parametrů cílenou na kvalitu předpovědi při učení na lineárně transformovaných datech bylo dosaženo sad parametrů bez větších rozdílů v hodnotách jednotlivých parametrů (tabulka 1 – tři nejlepší jedinci – sady parametrů). Průběh optimalizace je ukázán na obr. 1. Historie obou vstupů dosahovala horní hranice rozsahu možných hodnot. Tento fakt by ukazoval na potřebu zvýšit počet vstupních dat. Zvyšování počtu vstupních dat však může vést k přeučení sítě, proto je lépe pro učení použít menší počet vstupních dat. Požadavek na menší počet vstupních dat byl potvrzen optimalizací na validační množině dat. Stejný problém vysoké hodnoty parametru nastává při volbě počtu epoch učení. V tomto případě opět dosahovaly zoptimalizované hodnoty horní hranice možného rozsahu.

Při použití neuronových sítí pro předpověď průtoků bylo dosaženo velice

Tabulka 1. Optimalizované parametry sítě, 6h předp., opt. – učení, linear. trans.

Pořadí	Počet vstupů		Počet skrytých vrstev	Počet neuronů ve skrytých vrstvách		Počet epoch	Bias	Learning rate	Momentum	Hodnota kritéria
	Q	S		1. vrst.	2. vrst.					
1.	7	10	2	11	2	550	ano	0,111	0,282	0,826
2.	10	10	2	11	2	560	ano	0,115	0,398	0,826
3.	10	10	2	11	2	550	ano	0,119	0,398	0,823

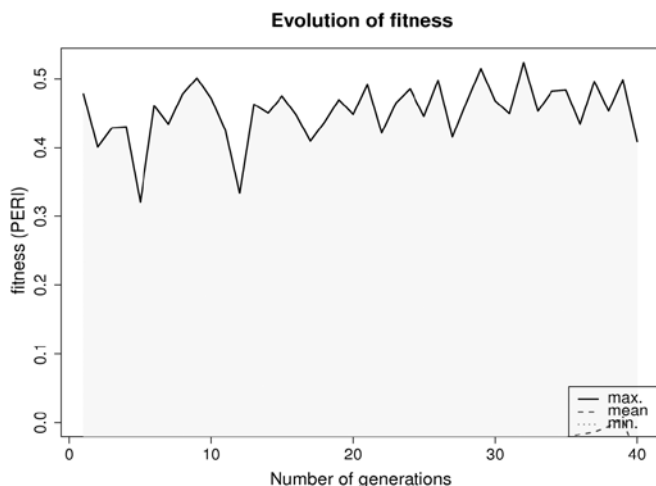
Tabulka 2. Hodnoty kritérií při předpovědi, 6h předp., opt. – učení, linear. trans.

	Předpověď 6 hodin					
	učení			validace		
	NASH	PERI	MAE	NASH	PERI	MAE
prům.	0,9682	0,8685	0,3854	0,9323	-1,2818	2,8175
max.	0,9755	0,8989	0,4359	0,9437	-0,8971	3,1401
min.	0,9639	0,8510	0,3254	0,9168	-1,8019	2,5019

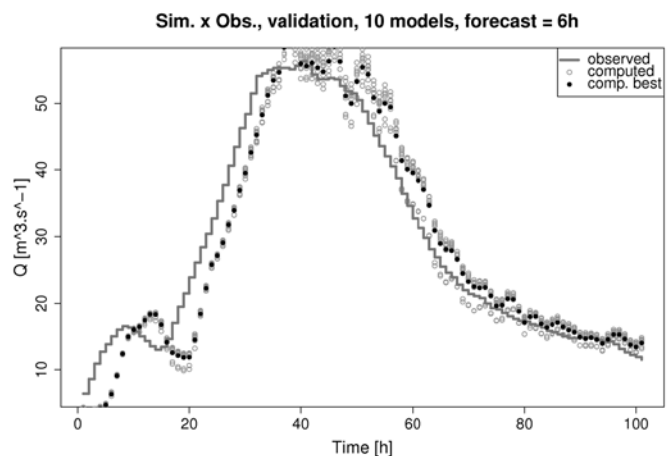
dobré předpovědi při učení, avšak při validaci byly výsledky podstatně horší. V případě validace klesaly hodnoty indexu persistence (tabulka 2) do záporných hodnot. Z této skutečnosti je možné konstatovat, že lepším modelem než neuronová síť by byl naivní model, předpovídající hodnotu průtoků v budoucnu pomocí poslední známé hodnoty průtoků. Na špatnou kvalitu předpovědi ukazuje i kritérium MAE. Nashovo kritérium má v tomto případě poměrně vysoké hodnoty a na jeho základě není možné jednoznačně rozhodnout o kvalitě modelu. Z grafu na obr. 2 je vidět neschopnost modelu předpovědět průtoky na validační množině dat. V průběhu předpovědi je patrný tzv. časový posun (time shift) predikovaných dat – tvar vlny je simulován dobře, ale je posunut o hodnotu kroku předpovědi.

#### Optimalizace parametrů pro předpověď na validačních datech

Při optimalizaci pro předpověď na validačních datech (obr. 3) bylo dosaženo menších hodnot parametrů architektury sítě než při učení. Zajímavá je změna počtu skrytých vrstev, která byla provázána vyššími



Obr. 3. Vývoj optimalizace, opt. – validace, linear. trans.



Obr. 4. Měření a predik. průtoky, valid. data – 6 h, opt. – validace

počty neuronů v optimální jediné vrstvě. Počet epoch byl obecně nižší než u optimalizace při učení. Tři nejlepší sady parametrů jsou uvedeny v tabulce 3.

Průběh simulací (obr. 4 a tabulka 4) je podobný jako v případě optimalizace při učení. U předpovědi při testování došlo sice ke zvýšení hodnot kritérií oproti optimalizaci při učení, ale z vizuálního hodnocení průběhu předpovědi není možné usuzovat na dobrou předpověď. Hodnoty kritérií při učení zaznamenaly pokles. Určité potlačení časového posunu je zde patrné, ale je slabé. NS s daty transformovanými postupnou lineární transformací nevykazuje problémy s generalizací na testovacích datech s vyššími hodnotami, než byly v trénovací množině dat.

### Nelineární transformace dat

#### Optimalizace parametrů pro předpověď na trénovacích datech

Vývoj optimalizace při učení na nelineárně transformovaných datech ukazuje obr. 5. V tabulce 5 jsou tři nejlepší sady parametrů. Při optimalizaci byl opět zaznamenán vyšší počet vstupních dat, a to jak u průtoků, tak u srážek. Závěr je stejný jako u lineární transformace dat – NS se s více vstupními daty dokáže lépe naučit, ale pro testování je vhodný menší počet vstupních dat (zejména průtoků se silnou autokorelací vůči předpovědi).

Při předpovědi průtoků bylo dosaženo relativně dobré předpovědi při učení, avšak při validaci je při této délce předpovědi a parametrech optimalizovaných pro předpověď na trénovacích datech patrná špatná generalizace NS na datech s vyššími hodnotami průtoků (obr. 6). Žádný testovaný model nedokázal překonat hodnotu  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , většina modelů se pohybovala kolem maximální hodnoty známé z učících dat, tj. kolem  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Špatná kvalita předpovědi je patrná i z hodnot kritérií (tabulka 6). Index persistence při testování nedosáhl nikdy kladných hodnot. Průměrná hodnota MAE je 4,7, což odpovídá průměrné absolutní odchylce předpovědi  $4,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Tato hodnota je nejvyšší ze všech počítaných variant.

#### Optimalizace parametrů pro předpověď na validačních datech

Optimalizace parametrů při validaci na nelineárně transformovaných datech měla celkově vzestupný průběh (obr. 7), zatímco u lineární a nelineární transformace při učení měly výrazný vzestupný průběh pouze minimální (a průměrné) hodnoty fitness kritéria. Jednalo se tedy o zužování rozptylu populace jedinců odstraňováním nevyhovujících řešení. Naproti tomu u optimalizace na nelineárních datech při validaci byl patrný nárůst hodnot fitness kritéria i pro nejlepší jedince v populaci a jednalo se tedy o celkové zvyšování kvality předpovědi vlivem evoluce řešení. Tabulka 7 uvádí výsledné sady parametrů. Je zde patrná tendence k preferenci menšího počtu vstupních dat, i když počty neuronů ve skrytých vrstvách zůstávají vyšší. Při optimalizaci byly zaznamenány u dvou nejlepších řešení maximální počty vstupních srážek, což by ukazovalo na vyšší využití srážkových dat pro předpověď průtoků než u lineární transformace. Z uvedených výsledků jak pro optimalizaci při učení, tak i pro optimalizaci při testování je zřejmé, že bias pro tento typ transformace dat není nutný.

Při předpovědi s parametry optimalizovanými pro validaci bylo dosaženo významného zlepšení předpovědi, jak ukazuje obr. 8. Samotná úprava těchto parametrů (váhy byly učeny standardně na učících datech) zapříčinila výraznou změnu schopnosti naučit NS, která bude poskytovat kvalitní předpověď na validačních datech. Bylo tedy dosaženo vyšší generalizační schopnosti NS. Velmi pozitivní je i značné potlačení časového posunu. Výrazné je zlepšení hodnot kritérií oproti případu s parametry optimalizovanými pro učení – index persistence je v kladných hodnotách a MAE je v průměru 1,157 (tabulka 8). V porovnání s případem, kdy byla vstupní data transformována lineárně, měla předpověď při validaci na nelineárních datech mírně lepší hodnoty kritérií, nicméně z průběhu předpovědi vztážen k pozorovaným datům je jednoznačně lepší předpověď uskutečněná na nelineárně transformovaných datech.

Z výsledků je možné konstatovat, že volba parametrů učení a architektury sítě ovlivňuje silně kvalitu předpovědi a schopnost zobecnění neuronových sítí s učením pomocí zpětného šíření chyby. Prezentovaná metoda optimalizace pomocí EA může být použita při stanovení zmíněných parametrů. Významným přínosem tohoto postupu je zvýšení kvality učení neuronových sítí určených pro předpověď průtoků.

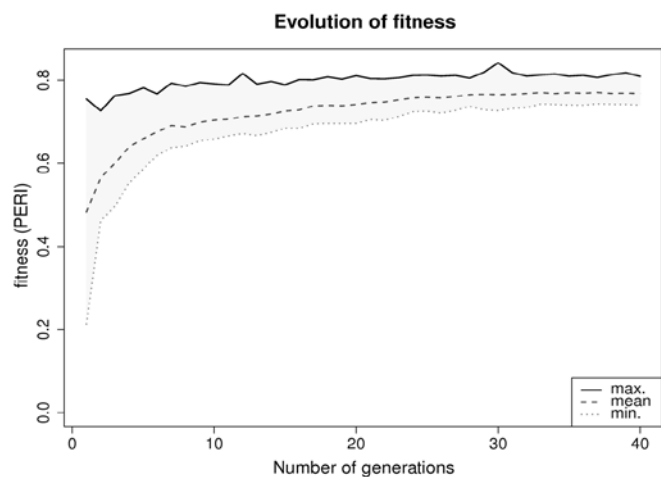
Výše prezentované postupy a výpočty byly vícekrát opakovány. Vždy bylo dosaženo přibližně stejných výsledků.

**Tabulka 3.** Optimalizované parametry sítě, 6h předp., opt. – validace, linear. trans.

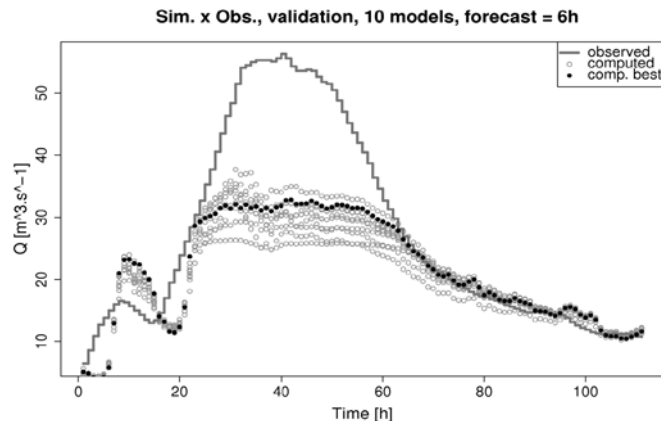
Pořadí	Počet vstupů		Počet skrytých vrstev	Počet neuronů ve skrytých vrstvách		Počet epoch	Bias	Learning rate	Momentum	Hodnota kritéria
	Q	S		1. vrst.	2. vrst.					
1.	2	5	1	9	x	40	ne	0,195	0,182	0,409
2.	1	1	1	14	x	420	ano	0,135	0,518	0,409
3.	5	4	1	10	x	90	ne	0,158	0,401	0,404

**Tabulka 4.** Hodnoty kritérií při předpovědi, 6h předp., opt. – validace, linear. trans.

	Předpověď 6 hodin					
	učení			testování		
	NASH	PERI	MAE	NASH	PERI	MAE
prům.	0,7912	0,2243	1,4214	0,9800	0,3217	1,2895
max.	0,8505	0,4446	2,2247	0,9823	0,3993	1,5877
min.	0,6639	-0,2485	0,9941	0,9746	0,1368	1,1493



**Obr. 5.** Vývoj optimalizace, opt. – učení, nelinear. trans.



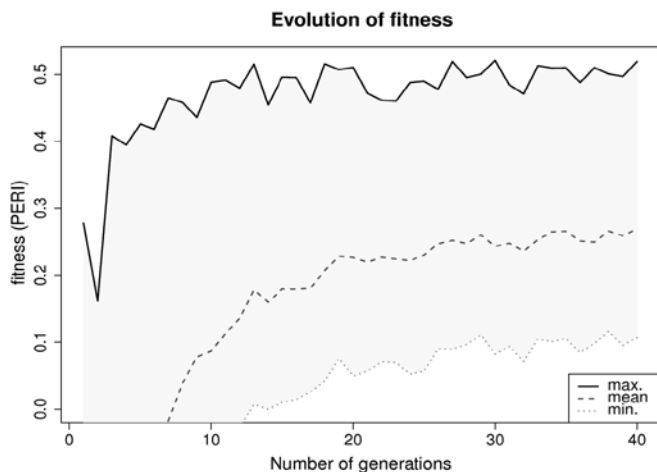
**Obr. 6.** Měření a predikované průtoky, valid. data – 6 h, opt. – učení

**Tabulka 5.** Optimalizované parametry sítě, 6h předp., opt. – učení, nelin. trans.

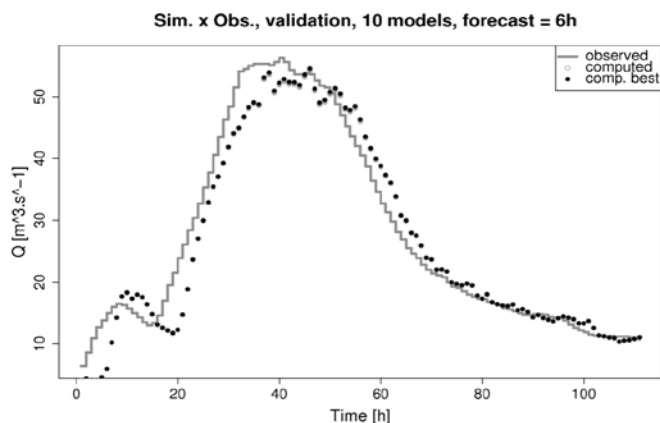
Pořadí	Počet vstupů		Počet skrytých vrstev	Počet neuronů ve skrytých vrstvách		Počet epoch	Bias	$\alpha$	Learning rate	Momentum	Hodnota kritéria
	Q	S		1. vrst.	2. vrst.						
1.	5	10	2	9	4	500	ne	0,0485432	0,188	0,280	0,809
2.	10	9	2	14	5	600	ne	0,0480387	0,175	0,444	0,806
3.	8	10	2	12	7	550	ano	0,0379938	0,116	0,689	0,804

**Tabulka 6.** Hodnoty kritérií při předpovědi, 6h předp., opt. – učení, nelin. trans.

	Předpověď 6 hodin					
	učení			testování		
	NASH	PERI	MAE	NASH	PERI	MAE
prům.	0,9303	0,7120	0,6572	0,6526	-10,700	4,0520
max.	0,9448	0,7719	0,7691	0,7455	-7,5712	4,7064
min.	0,9216	0,6759	0,5342	0,5450	-14,325	3,3842



Obř. 7. Vývoj optimalizace, opt. – validace, nonlinear. trans.



Obř. 8. Měřené a predik. průtoky, valid. data – 6 h, opt. – validace

## Závěr

Tento příspěvek prezentuje dílčí postup. Pokračování práce bude směřovat k vytvoření modelu založeného na principu neuronových sítí, který bude oproštěn od tzv. zpětného posunu a bude mít vysokou schopnost generalizace. Výsledky této práce ukazují možný směr dalšího vývoje zlepšování předpovědi průtoků pomocí modelu neuronových sítí.

Pro další postup v této problematice bude potřeba otestovat, zda mezi optimalizovanými parametry při učení a parametry při testování neexistuje relevantní závislost. Pro takové testování bude potřeba vyhodnotit mnoho běhů optimalizací, které budou prováděny na více povodích. Při potvrzení hypotézy o závislosti bude možné pouze z tréninkových dat odvodit nejvhodnější parametry, tak aby model NS měl vysokou schopnost generalizace a nezkolaboval při předpovědi vyšších povodňových průtoků.

Dalším postupem by mohlo být zavedení fitness funkce, která by na odlišném základě vybírala vhodná řešení. Tím by mohl být zvýšen tlak na výběr řešení s vyšší schopností generalizace NS a takových řešení, která by potlačovala časový posun při předpovědi na delší časové období.

Zajímavou možností je také zavedení evolučních algoritmů jako učícího algoritmu vah.

### Poděkování

Děkuji Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí průtokových a srážkových dat.

### Literatura

- [1] Abrahart, R.J., See, L.M., and Kneale, P.E. Using pruning algorithms and genetic algorithms to optimise network architectures and forecasting inputs in a neural rainfall-runoff model. *Journal of Hydroinformatics*, 1(2), 1999, 103–114.
- [2] Dawson, C.W. and Wilby, R.L. Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 25(1), 2001, 80–108.
- [3] Fausett, L. *Fundamentals of Neural Networks*. New Jersey: Prentice-Hall, 1994, 461 p.
- [4] Fořumpaur, P. Použití umělých neuronových sítí pro operativní předpovědi říčních průtoků. *Vodní hospodářství*, 6, 1999, 121–123.
- [5] Govindaraju, R.S. and Rao, A.R. *Artificial neural networks in hydrology*. Springer, 2000, 329 p.
- [6] Hsu, K., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31 (10), 1995, 2517–2530.
- [7] Maier, H.M. and Dandy, G.C. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water Resources Research*, 32(4), 1996, 1013–1022.
- [8] Masters, T. *Practical Neural Network Recipes in C++*. Academic Press, 1993, 493 p.
- [9] McCulloch, W.S. and Pitts, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biology*, 5, 1943, 115–133.
- [10] Nacházal, K., Starý, M., Zezulák, J. aj. *Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství*. Praha: Academia, 2004, 318 s.
- [11] Neruda, M., Neruda, R. a Kudová, P. Aplikace umělých neuronových sítí ve vodním hospodářství. *Vodní hospodářství*, 4, 2007, 127.
- [12] Onwubolu, G.C. and Babu, B.V. *New Optimization Techniques in Engineering*. Berlin: Springer-Verlag, 2004, 712 p.
- [13] Reed, R.D. and Marks, R.J., II. *Neural Smoothing*. MIT Press, 1999, 352 p.

Tabulka 7. Optimalizované parametry sítě, 6h předp., opt. – validace, nelin. trans.

Pořadí	Počet vstupů		Počet skrytých vrstev	Počet neuronů ve skryt. vrstvách		Počet epoch	Bias	$\alpha$	Learning rate	Momentum	Hodnota kritéria
	Q	S		1. vrst.	2. vrst.						
1.	2	10	2	14	2	480	ne	0,0030045	0,806	0,873	0,519
2.	3	1	1	14	x	560	ne	0,0037602	0,688	0,873	0,491
3.	4	10	1	3	x	430	ne	0,0043600	0,870	0,871	0,470

Tabulka 8. Hodnoty kritérií při předpovědi, 6h předp., opt. – validace, nelin. trans.

	Předpověď 6 hodin					
	učení			testování		
	NASH	PERI	MAE	NASH	PERI	MAE
prům.	0,9118	0,6357	0,5398	0,9817	0,3828	1,1570
max.	0,9120	0,6363	0,5403	0,9821	0,3985	1,1709
min.	0,9117	0,6351	0,5388	0,9811	0,3641	1,1456

- [14] Starý, M. Neuronové sítě a předpověď kulminačních průtoků a objemů povodní v povodí Ostravice – uzávěrový profil Šance. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 46, 1, 1998, 45–61.
- [15] Sedki, A., Ouazar, D., and El Mazoudi, E. Evolving neural network using real coded genetic algorithm for daily rainfall-runoff forecasting. *Expert Systems with Applications*, 36 (3), 2009, 4523–4527.
- [16] Šíma, J. a Neruda, R. *Teoretické otázky neuronových sítí*. MATFYZPRESS, 1996, 390 s.
- [17] Zelinka, I., Oplatková, Z., Šeda, M., Ořmera, P. a Včelář, F. *Evoluční výpočetní techniky – principy a aplikace*. Praha: BEN – techn. lit., 2008, 536 s.

Ing. Vojtěch Havlíček  
KVHEM, FŽP, ČZU

tel.: 224 382 152, havlicekv@fzp.czu.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Artificial Neural Networks Learning and Architecture Parameters Optimization by Evolutionary Algorithms (Havlíček, V.)*

### Keywords

neural networks – evolutionary algorithms – runoff forecast – optimization

The paper deals with artificial neural networks learning and architecture parameters optimization by evolutionary algorithms. Optimized network was tested by short-term runoff forecasts (6 h) on the Sázava upper river basin.

Type of used neural network was the multilayer perceptron with back propagation learning algorithm. The learning and the simulations were performed after optimizing the parameters of the neural network. The efficiency of the predictions was evaluated by selected criteria.

The results show that optimized neural networks provide good results for short-term forecast. Optimization of parameters helps to improve the efficiency of forecasts and may be used for more precise choice of parameter values that affect learning and simulation.

# KRÁTKODOBÁ PREDIKCE ODTOKU MODELEM PONS NA VYBRANÝCH POVODÍCH

Petr Máca

## Klíčová slova

predikce odtoku – neuronové sítě – vrstevnatý perceptron – povodně

## Souhrn

Za krátkodobou predikci povodňového odtoku je považována predikce, která simuluje povodňový odtok z povodí pro blízký časový interval v nadcházející budoucnosti. Předložený příspěvek se zabývá touto problematikou a prezentuje vybrané výsledky případových studií, realizované modelem PONS. PONS je počítačový program vyvíjený na katedře vodního hospodářství a environmentálního modelování FŽP ČZU Praha, který vychází z teorie neuronových sítí. Je zaměřen na vícevrstevnatý perceptron. Model umožňuje tvorbu libovolného vícevrstevnatého perceptronu, jeho kalibraci a validaci, která byla v rámci příspěvku testována na povodích Morávky a Sázavy s využitím srážkoodtokových dat. Součástí příspěvku je stručné představení aplikačního postupu, odhadu parametrů modelu a komentář k vybraným kalibračním validačním kritériím, která hodnotí predikční schopnost modelu PONS.

## Úvod

Neuronové sítě jsou jedním z široce využívaných přístupů k modelování těchto hydrologických procesů, které jsou typické vysokou nelinearitou (Abraham and See, 2007). Při výběru vhodných modelovacích technik jsou jedněmi z nejčastěji používaných black-boxových nástrojů, které nejsou náročné na přesný popis struktury a dílčích procesů modelovaného hydrologického systému (Dawson and Wilby, 2001).

Při srovnání modelů neuronových sítí založených na teorii vícevrstevnatého perceptronu s konceptuálním hydrologickým modelem bylo poukázáno, že při výskytu vodného období a dobrých datových záznamů jsou modely neuronových sítí schopny dostatečně konkurovat konceptuálnímu modelu GR4J v rámci krátkodobé predikce odtokového procesu (Ancill et al., 2004).

Na druhou stranu bylo také poukázáno na to, že i když neuronové sítě s dopředným šířením signálu mají vlastnosti „univerzálního aproximátoru“, při aplikaci velmi komplexních sítí s velkým počtem neuronů ve skrytých vnitřních vrstvách dochází k přeparametrizování a při použití datových souborů zatížených náhodným šumem neuronové sítě nejsou schopny dostatečně konkurovat parsimonnímu konceptuálnímu modelu (Gaume and Cosset, 2003).

Při aplikaci modelů neuronových sítí v rámci krátkodobé predikce odtoku řada autorů poukazuje na několik aspektů souvisejících s aplikačním postupem: nutnost správného výběru vstupních dat (May et al., 2008), výběr vhodného typu modelu neuronových sítí (Imrie et al., 2000), volby vhodného kalibračního a optimalizačního postupu (de Vos and Rientjes, 2005; Giustolisi and Laucelli, 2005), volby kalibračních dat a délky predikovaného období (Toth and Brath, 2007), použití správných kalibračních a validačních kritérií (Coulibaly et al., 2001; Gaume and Cosset, 2003).

Standardní postup aplikace modelů neuronových sítí v rámci krátkodobé predikce odtoku ze zdrojových povodí, založené na srážkových a odtokových datech, se skládá z výběru vstupních dat – nejčastěji reprezentovaných vhodnou délkou předchozí historie srážkových a odtokových dat. K tomuto účelu mohou být využity postupy založené jak na popisu vzájemné lineární závislosti predikovaných odtokových dat a srážkové historie (Rajukar et al., 2004), tak na popisu nelineární závislosti za použití vzájemné informace („mutual information“) mezi predikovanými odtokovými daty a srážkoodtokovou historií (May et al., 2008).

Dalším krokem je výběr vhodného modelu neuronových sítí. Modely vycházející z teorie vícevrstevnatého perceptronu jsou jedny z nejčastěji testovaných a používaných modelů (Abraham and See, 2007; Dawson and Wilby, 2001). Nalezení jejich optimální architektury, která je tvořena daným počtem neuronů ve vstupních, skrytých a výstupních vrstvách a počtem vrstev, je součástí kalibrační části aplikačního postupu (Maier and Dandy, 2000).

Cílem předloženého příspěvku je prezentace vybraných aspektů aplikace modelu neuronových sítí založených na vícevrstevnatém perceptronu při krátkodobé predikci odtoku na vybraných povodích v České republice. Testována byla povodí, na kterých je odtok generován a jediný zdroj informací o srážkoodtokovém procesu jsou průtoky měřené v uzávěrovém profilu povodí a srážky zaznamenané na povodí.

## Metodika

### Neuronová síť – vrstevnatý perceptron

Vícevrstevnatý perceptron je řazen mezi neuronové sítě s dopředným šířením signálu. Skládá se ze zvoleného počtu neuronů, které jsou

uspořádány do vrstev. Neuronové předávají a transformují vstupní signál do výstupního signálu.

Signál, který je předáván mezi neuronů v různých vrstvách, je lineární kombinací výstupních hodnot neuronů umístěných v předcházející vrstvě umístěné podle směru šíření signálu a vah příslušejících spojení mezi neuronů.

Pro transformaci vstupního signálu neuronu do výstupního je využita aktivací nelineární funkce. V uvedené studii byl použit vícevrstevnatý perceptron s jednou skrytou vrstvou a aktivací funkcí byl zvolen hyperbolický tangens, s oborem hodnot v intervalu (-1,1). Výstupní vrstva obsahovala podle typu simulace jeden nebo více neuronů.

Jako metoda učení neuronové sítě byla zvolena supervizní metoda založená na tradičním algoritmu zpětného šíření chyby (Rumelhart et al., 1986) – povodí Morávky, dále byla také použita metoda založená na Marquardt-Levenbergovu algoritmu (Hagan and Menhaj, 1994) – povodí Sázavy.

Vzhledem k oboru hodnot transformační nelineární funkce byly použité datové soubory transformovány do intervalu (0,1). Použitá transformační funkce má tvar

$$y = 1 - \exp(-\alpha x)$$

kde  $y$  jsou data po transformaci a  $x$  data před transformací,  $\alpha$  je parametr transformace, který je nalezen při kalibraci.

Neuronové sítě je nejprve předloženo soubor dat obsahující vzorové chování. Model je učícím algoritmem nastaven tak, aby nejlépe modeloval vzorové chování. Na závěr je simulační schopnost výsledného modelu ověřena na nezávislých datech, která nebyla použita při učícím procesu.

K ověření výsledných simulací byla využita následující kritéria: Nash-Sutcliffeův index (NS) – rovnice 1, index persistence (PI) – rovnice 2, střední absolutní chyba (MAE) – rovnice 3 a PLC index – rovnice 4 až 6 (Coulibaly et al., 2001; Kitinadis and Bras, 1980).

Použitá kritéria jsou definována následovně:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - \bar{Q}_{mer})^2}$$

$$PI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{mer}(i - LAG))^2}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i)|$$

$$PLC = pk \cdot pl$$

$$pk = \frac{\left( \sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i))^2 Q_{mer}(i)^2 \right)^{1/4}}{\left( \sum_{i=1}^N Q_{mer}(i)^2 \right)^{1/2}} \quad \text{pro } Q_{mer} > 0,75 Q_{kulminace}$$

$$pl = \frac{\left( \sum_{i=1}^N (Q_{mer}(i) - Q_{sim}(i))^2 Q_{mer}(i)^2 \right)^{1/4}}{\left( \sum_{i=1}^N Q_{mer}(i)^2 \right)^{1/2}} \quad \text{pro } Q_{mer} < 0,25 Q_{kulminace}$$

kde  $Q_{mer}$  jsou měřená data;  $Q_{sim}$  data vypočtená a  $Q$  je aritmetický průměr měřených dat;  $N$  počet dat a  $LAG$  je predikční interval.

Použitý metodický postup byl naprogramován v programovacím jazyce C++ do softwaru PONS (Máca a Horáček, 2008), využita byla poslední verze z roku 2010.

### Vyhodnocovaná povodí a data

Příspěvek prezentuje vybrané výsledky krátkodobé predikce odtoku na dvou povodích. První je povodí Morávky uzavírající profil Úspolka – 22,1 km<sup>2</sup>, jako druhé povodí bylo testováno povodí Sázavy uzavírající profil Havlíčkův Brod-Pohledští Dvořáci – 381 km<sup>2</sup>. Data srážkoodtokového procesu byla zaznamenána v hodinovém kroku.

Na povodí Morávky byl vybrán soubor pěti povodňových vln, který obsahoval hydrogram povodňové vlny z roku 1997. Rozsah kulminací se pohyboval v intervalu (10,3–53,8) m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

Na povodí Sázavy byly vybrány úseky z let 2000–2003. Rozsah průtoků se pohyboval v intervalu (0,1–56,3) m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

## Výsledky

### Morávka – povodňové události

Na povodí Morávky byl testován srážkoodtokový model PONS v následujícím nastavení. Architektura vrstevnatého perceptronu byla tvořena jednou

skrytou vrstvou a jednou vstupní a výstupní vrstvou. Vstupní vrstva obsahovala sedm vstupních jednotek, ve skryté vrstvě bylo umístěno pět neuronů a výstupní vrstva byla složena ze šesti neuronů.

Vstupní data modelu PONS byla tvořena historií hodinových průtoků o délce 2 hodiny a srážkovou historií o délce 5 hodin.

Pro verifikační predikci byla vybrána povodňová událost z roku 1997. Jako kalibrační události byly použity vybrané povodňové vlny z let 1985, 1996, 1999 a 2000. Počet vzorů předložených neuronové síti byl 1 040. Vzory obsahovaly dvojici vektorů vstupních a výstupních dat.

Byly testovány predikce odtoku na 1 až 6 hodin. Výsledky byly vyhodnoceny hodnotami příslušných kritérií. Nejprve bylo provedeno 100 simulací kalibračních validačních výpočtů. Pro každou simulaci byly stanoveny hodnoty vyhodnocovacích kritérií. Výsledné hodnoty Nash-Sutcliffova indexu (NS) a indexu persistence (PI) pro kalibraci a validaci jsou uvedeny na obr. 1, hodnoty MAE a PLC indexu jsou uvedeny na obr. 2. Výsledky jsou prezentovány krabicovými grafy, které znázorňují minimální, maximální hodnoty, 25, 50, 75% percentily dosažených kritérií.

Režim trénování byl nastaven na online učení za použití učící konstanty „learning-rate“ a momenta. Parametry učení jsou uvedeny v tabulce 1.

### Sázava – ensemble

Na povodí horní části Sázavy byl testován pouze predikční model, jehož vstupní data byla tvořena výhradně průtokovou historií. Model byl kalibrován na vybraném úseku o délce 104 dní: 31. 12. 2002–14. 4. 2003 (časový úsek od 17 800 až do 20 000 hodin v obr. 3), validace byla provedena na úseku o délce 625 dní: 11. 1. 2000–19. 8. 2002. Součástí validačních dat byla povodňová událost z roku 2002 (obr. 5). Rozdělení souboru dat je znázorněno na obr. 3.

Pro krátkodobou predikci odtoku na Sázavě byl model PONS využit k vytvoření ensemble predikce. Bylo vytvořeno 30 modelů vícevrstevnatého perceptronu s různým nastavením trénování a nelineární transformace dat. Ty byly kalibrovány Levenberg-Marquardtovým algoritmem s různou úspěšností.

Nastavení architektury perceptronu bylo shodné pro každý dílčí model neuronové sítě. Parametry nastavení neuronových sítí jsou uvedeny v tabulce 2. V příspěvku jsou prezentovány výsledky tříhodinové předpovědi. Architektura neuronové sítě se skládala z vstupní vrstvy obsahující čtyři předchozí průtokové intervaly, jedné skryté vrstvy s 20 neuronů a výstupní vrstvy obsahovala jeden neuron. Modely se od sebe navzájem lišily hodnotami transformačního parametru  $\alpha$  (tabulka 2).

Výsledné simulace souborem modelů neuronových sítí byly vyhodnoceny prostřednictvím příslušných kvantilů. Byly stanoveny 5, 25, 50, 75 a 95% percentily pro každou modelovanou hodnotu průtoků.

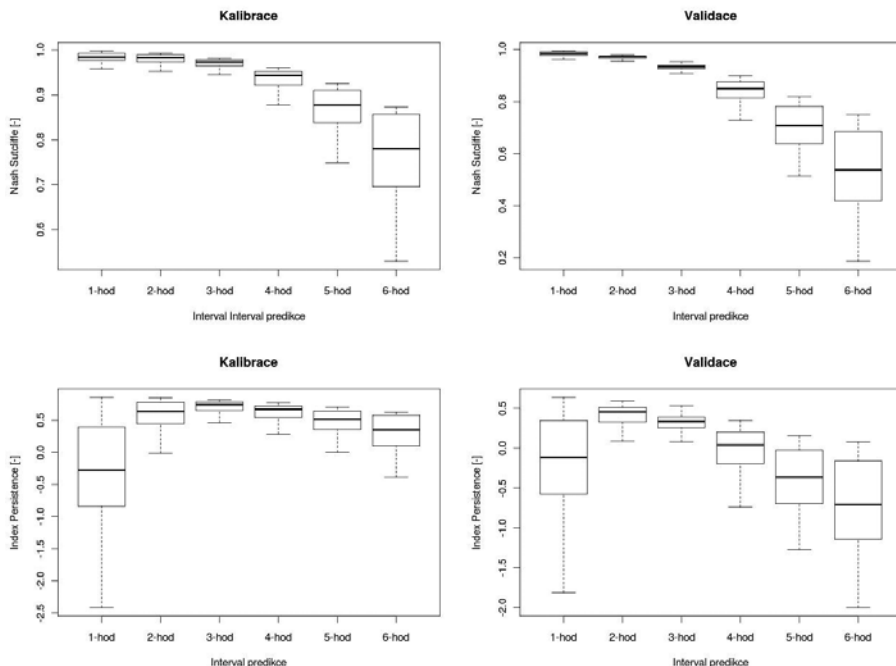
Hodnoty hodinových průtoků v kalibračním souboru se pohybovaly v intervalu (1,37–36,9)  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , pro validaci v intervalu (0,8–56,3)  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Tímto bylo umožněno testovat schopnost generalizace souborové předpovědi. Výsledné hydrogramy s intervalovou předpovědí jsou pro přehlednost uvedeny na obr. 4 a 5. Uvedené výsledky ukazují obecné chování validačního souboru. Kalibrační výsledky vykazovaly shodné chování.

**Tabulka 1.** Parametry učení neuronové sítě povodí Morávky

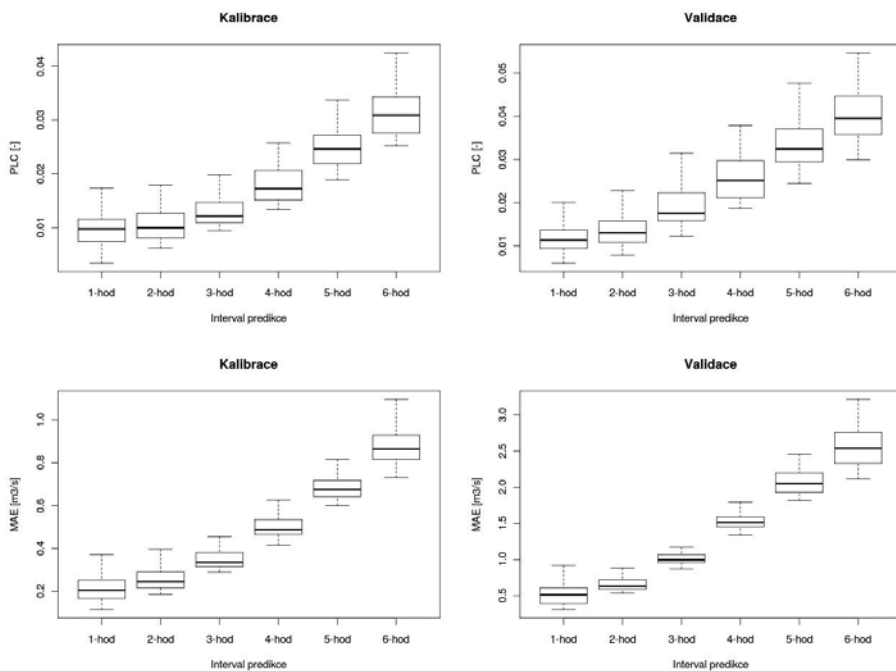
Momentum	Learning rate	Počet epoch	$\alpha$
0,25	0,1	200	0,045

**Tabulka 2.** Parametry učení neuronové sítě povodí Sázavy

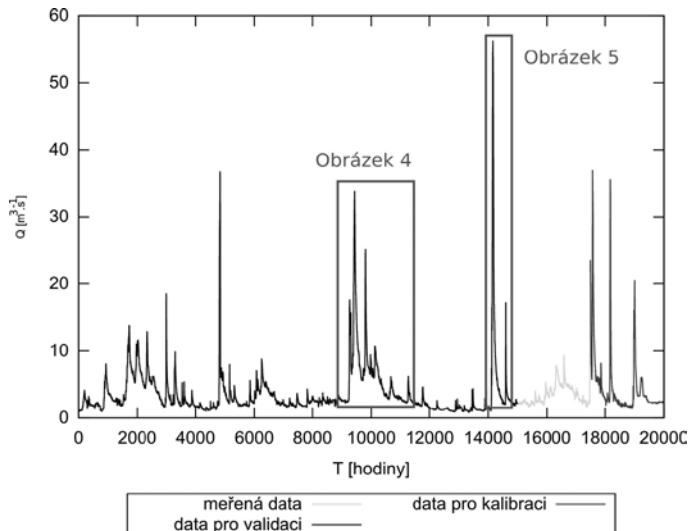
Počet epoch	$\alpha$
10 000	0,001–0,005



**Obr. 1.** Hodnoty Nash-Sutcliffova indexu a indexu persistence

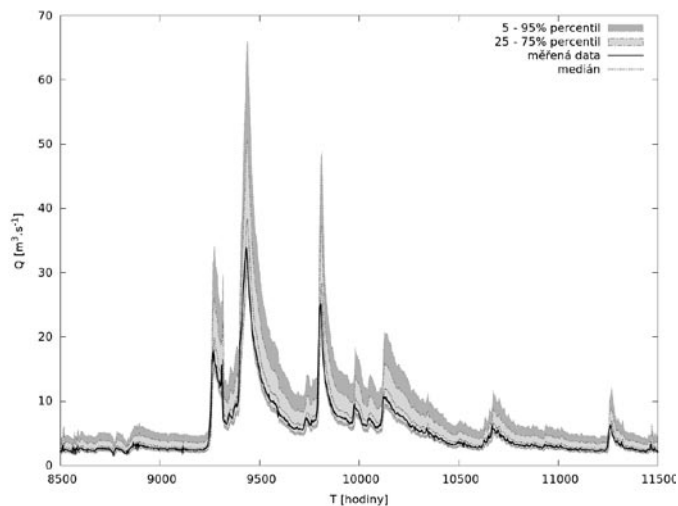


**Obr. 2.** Hodnoty MAE a PLC

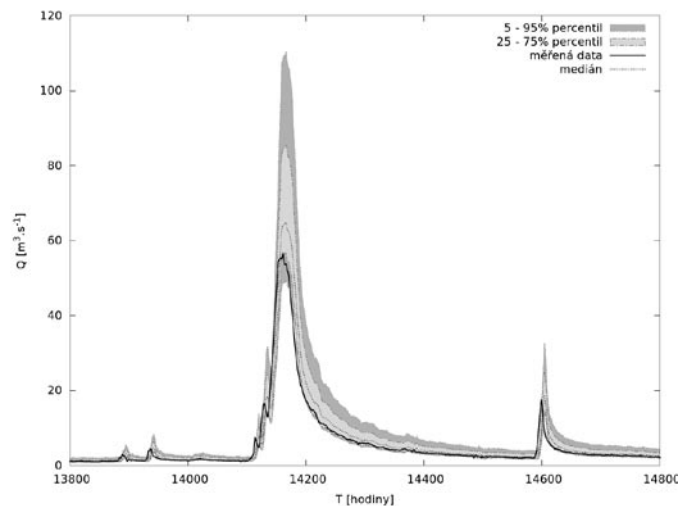


**Obr. 3.** Rozdělení datového souboru povodí Sázavy





Obr. 4. Třihodinová předpověď, Sázava 21. 11. 2001–2. 12. 2002



Obr. 5. Třihodinová předpověď, Sázava 29. 6. 2002–10. 8. 2002

## Diskuse

### Morávka

Příspěvek ukazuje výsledky 100 simulací při jednom nastavení vrstevnatého perceptronu. Tímto přístupem je umožněno posoudit neurčitosti v širších souvislostech podle kontextu (Gaume and Gosset, 2003).

Výpočtem je dále posouzen vliv rostoucího intervalu predikce na přesnost výpočtu. Jak je patrné a očekávané, s rostoucím predikčním intervalem klesá přesnost predikce (obr. 1 a 2).

Při vzájemném porovnání hodnot PI a NS indexů je patrné, že při posouzení krátkodobé predikce odtoku je vhodné pro vyhodnocení využít kombinaci těchto dvou indexů. Ačkoli hodnoty NS indexu ukazují na velice dobré výsledky při predikci na 1 a 2 hodiny, v testovaném souboru se vyskytly modely, které mají velice dobré výsledky pro hodnoty NS indexu, ale dosahují nežádoucích nižších hodnot než 0 u PI indexu. To znamená, že daný model byl slabší než známá informace o aktuálních průtocích.

Z obr. 1 je zároveň patrné, že testované nastavení neuronové sítě vykazuje nejstabilnější výsledky v oblasti 3hodinové predikce. Nicméně v souboru testovaných modelů byly nejuspěšnější modely predikující průtoky s nejkratším predikčním intervalem.

U hodnot PI indexu byly i pro predikční interval 6 hodin dosaženy hodnoty validačního PI indexu vyšší než 0 spolu s dobrými hodnotami u NS indexu.

Podle očekávání byly výsledky kalibračních výpočtů podle vyhodnocení všech indexů lepší než výsledky validačních. Z uvedeného souboru je tedy možné vybrat modely neuronových sítí, které jsou schopny relativně dobře předpovídat krátkodobě průtok při podobné povodňové události, jako byla v roce 1997.

### Sázava

Při simulaci odtoku na Sázavě byl zvolen alternativní postup, který není založen pouze na vyhodnocení výsledků predikce vhodnými indexy. Výše uvedené indexy byly využity při výběru vhodných modelů, které vytvořily soubor modelů neuronových sítí pro ensemble predikci. Cílem predikce odtoku je nalezení intervalů, kde se bude pravděpodobně vyskytovat budoucí odtok.

Výsledky jsou ovlivněny použitým kalibračním souborem dat. Využití kalibračního souboru obsahuje záměrně malou část odtokového chování, nicméně je schopen poskytnout intervalovou predikci vymezenou odhady 95, 75, 25 a 5% percentilů.

Z uvedených validačních výsledků je u povodňové události z roku 2002 (obr. 5) patrný časový posun. Na počátku vzestupu a části poklesové větve hydrogramu nebyla souborová předpověď schopná modelovat měřená data. Tento fakt byl částečně potlačen souborovou predikcí realizovanou větším počtem použitých modelů. Popřípadě jej lze zmenšit přidáním srážkových dat mezi vstupní data.

U další události z období 21. 11. 2001–2. 12. 2002 (obr. 4) je patrné, že celý ensemble obsahuje měřená data a poskytuje informaci o intervalu, ve kterém se budou průtoky nacházet.

Dále lze očekávat, že výsledky mohou být vylepšeny přidáním srážkové informace a zvolením kvalitnějšího souboru kalibračních dat, který obsahuje detailnější informaci o odtokovém procesu.

## Závěr

Předložený příspěvek se zabývá problematikou krátkodobé predikce odtoku datově orientovaným modelem PONS, který vycházel jak z informace vybraných povodňových vln (povodí Morávky), tak i z delších úseků odtokových dat (povodí Sázavy).

Model je založen na teorii vícevrstevnatého perceptronu, který je řazen mezi neuronové sítě s dopředným šířením signálu. Pro predikci odtoku

byla použita data srážkové a odtokové historie. Jako učící algoritmy byly použity standardní algoritmus zpětného šíření chyb a Levenberg-Marquardtův algoritmus. V příspěvku byla vyhodnocena data zaznamenaná v hodinovém časovém kroku.

Na povodí Morávky byl testován postup umožňující postupnou predikci od 1 po 6 hodin. Výsledky prokázaly dobrou simulační schopnost použité neuronové sítě. Nejlepší shody bylo dosaženo v intervalech 1–3 hodiny, s růstem predikčního intervalu přesnost predikce klesá. V testovaném souboru modelů neuronových sítí byly modely, které poskytovaly lepší predikce než naivní model, založený na datech přítomnosti.

Na povodí Sázavy byl vyzkoušen postup umožňující ensembleovou 3hodinovou predikci odtoku. Bylo ukázáno, že soubor více modelů umožňuje zlepšit predikci odtoku z pohledu snížení vlivu chyby časového posunu. Výsledky souborové predikce odtoku ukázaly také na dobrou schopnost generalizovat predikci odtoku použitými neuronovými sítěmi.

## Literatura

- Abrahart, R.J. and See, L.M. Neural network modelling of non linear hydrological relationships. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 2007, s. 1563–1579.
- Ancil, F., Perrin, Ch., and Andreassia, V. Impact of the length of observed records on the performance of ANN and of conceptual parsimonious rainfall-runoff forecasting models. *Environmental Modelling & Software*, 19, 2004, s. 357–368.
- Coulibaly, P., Bobee, B., and Ancil, F. Improving extreme hydrologic events forecasting using a new criterion for artificial neural network selection. *Hydrological Processes*, 15, 2001, s. 1533–1536.
- Dawson, C.W. and Wilby, R.L. Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 21, 1, 2001, s. 80–108.
- de Vos, N.J. and Rientjes, T.H.M. Constraints of artificial neural networks for rainfall-runoff modelling: trade-off in hydrological state representation and model evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 2005, s. 111–126.
- Gaume, E. and Gosset, E. Over-parametrisation, a major obstacle to use of artificial neural networks in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7 (5), 2003, s. 693–706.
- Giustolisi, O. and Laucelli, D. Improving generalization of artificial neural networks in rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, 50 (3), 2005, s. 439–457.
- Hagan, M.T. and Menhaj, M.B. Training feedforward networks with the Marquardt Algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5, 6, 1994, s. 989–993.
- Imrie, C.E., Duruncan, S., and Korre, A. River flow prediction using artificial neural networks: generalisation beyond the calibration range. *Journal of Hydrology*, 233, 2000, s. 138–153.
- Kitanidis, P.K. and Bras, R.L. Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 2. Application and results. *Water Resources Research*, 16 (6), 1980, s. 1034–1044.
- Máca, P. a Horáček, S. PONS – Predikce odtoku neuronovými sítěmi. Autorizovaný software KVHEM FZP ČZU Praha, 2008.
- Maier, H.R. and Dandy, G.C. Neural networks for prediction and forecasting of water resources: a review of modelling issues and applications. *Environmental Modelling & Software*, 15, 2000, s. 101–124.
- May, R.J., Maier, H.R., Dandy, G.C., and Fernando, T.M.K.G. Non-linear variable selection for artificial neural networks using partial information. *Environmental Modelling & Software*, 23, 2008, s. 1312–1326.
- Rajukar, M.P., Kothiyari, U.C., and Chaube, U.C. Modeling of the daily rainfall-runoff relationship with artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 285, 2004, s. 96–113.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., and Williams, R.J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 9, 1986, s. 533–536.
- Toth, E. and Braith, A. Multistep ahead streamflow forecasting: Role of calibration data in conceptual and neural network modeling. *Water Resources Research*, 43, 2007.

Děkuji pracovníkům ČHMÚ za poskytnutí srážkoodtokových dat z testovaných povodí. Data povodí Sázavy byla poskytnuta v rámci testování PONS, data povodí Morávky byla získána v rámci řešení projektu NAZV 1G46040.

Ing. Petr Máca, Ph.D.  
KVHEM, FŽP, ČZU  
tel.: 224 382 152, e-mail: maca@fzp.czu.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

Short-term runoff prediction with the PONS model on the selected catchments (Máca, P.)

#### Key words

runoff prediction – neural network – multilayer perceptron – floods

## VLIV VÝBĚRU DESKRIPTORŮ POVODÍ NA PROCES SESKUPOVÁNÍ POVODÍ METODOU INVERZNÍHO SHLUKOVÁNÍ

Martin Heřmanovský

#### Klíčová slova

regionalizace – shluková analýza – inverzní shlukování – deskriptor povodí

#### Souhrn

Příspěvek je zaměřen na hledání významných deskriptorů povodí a jejich optimálního počtu při regionalizaci jedenácti parametrů modelu Sacramento. Použitý regionalizační přístup je založen na podobnosti povodí ve smyslu použitých deskriptorů. Vyhledávání nejpodobnějších pozorovaných povodí je prováděno metodou inverzního shlukování. K analýze jsou použita data 438 povodí z USA projektu MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment). Použitý datový soubor obsahoval deskriptory povodí z různých kategorií a optimální sady parametrů stanovené pro každé povodí, které byly při analýze využity jako srovnávací hodnoty. Deskriptory povodí byly do souboru shlukových proměnných řazeny podle schématu, které můžeme nazvat postupný výběr pozorovaných povodí nejpodobnějších zájmovému nepozorovanému povodí. Výběr významných deskriptorů ze zvolených kategorií je založen na předpokladu, že přidání takového deskriptoru do souboru shlukových proměnných zlepšit přesnost odhadu parametrů modelu na nepozorovaném povodí. Přesnost odhadu parametrů je vyjádřena poklesem mediánů absolutních hodnot procentických odchylek odhadovaných parametrů od jejich optimálních hodnot (stanovených při kalibraci modelu), a dále také poklesem aritmetických průměrů a dosažených maxim absolutních hodnot procentických odchylek odhadovaných parametrů od jejich optimálních hodnot.

#### Úvod

Jednou z velmi důležitých součástí regionalizačního procesu využívajícího deskriptory povodí je výběr takových deskriptorů, které můžeme považovat za významné z hlediska odhadu zájmových charakteristik na nepozorovaných povodích, protože pouze takové deskriptory jsou vhodné pro odvození korektních vztahů mezi nimi a zájmovými charakteristikami (např. parametry modelu nebo specifickými průtoky). Výběr významných deskriptorů povodí je často subjektivní záležitostí, která souvisí zejména se zkušeností hydrologa, který regionalizaci provádí, ale také s použitou modelovou strukturou, souborem analyzovaných povodí a s druhem použitého regionalizačního přístupu. Výběr významných deskriptorů bývá často prakticky omezen také tím, že určité deskriptory, které mohou být považovány za významné, nemusí být na některých povodích zaznamenány, a proto nemohou být při regionalizaci použity.

Problematika výběru významných deskriptorů se stává výraznější, pokud použijeme regionalizační přístup, který přímo vychází z podobnosti povodí na základě zvolených deskriptorů (deskriptorová podobnost). Hlavní myšlenkou tohoto přístupu je nalezení jednoho nebo více pozorovaných povodí, která jsou svými deskriptory velmi podobná zájmovému nepozorovanému povodí a na základě těchto pozorovaných povodí provést odhad zájmových charakteristik na nepozorovaném povodí (Acreman and Sinclay, 1986; Burn and Boorman, 1993; Nathan and McMahon, 1990; Oudin et al., 2008; Parajka et al., 2005). Argument, proč vybírat pozorovaná povodí, jejichž deskriptory jsou nejpodobnější deskriptorům zájmovému nepozorovanému povodí, vychází z předpokladu, že zájmové charakteristiky jsou s takovými deskriptory úzce spojeny. Z tohoto důvodu by povodí s podobnými deskriptory měla vykazovat

The short-term flood runoff prediction is the prediction, which simulates the flood runoff on the future short temporal interval. Presented contribution deals with this problematic and shows the chosen results of case studies computed with the PONS model. PONS model is software developed on the Department of Water resources and Environmental Modelling FES CULS Prague and is based on the theory of neural networks. PONS is focused on the multilayer perceptron. Model enables developing of perceptron neural network, its calibration and validation. Its simulation ability is presented by the means of two case studies of two catchments Moravka and Sazava rivers. Chosen aspects of calibration, application setup, performance criteria are commented. Results show the estimated limits for the application of neural network for purposes of flood forecasting in headwater catchments.

velmi podobné zájmové charakteristiky (Acreman and Sinclay, 1986; Merz and Blöschl, 2004; Wagener and Wheeler, 2006). Protože různá povodí si mohou být velmi podobná na základě různě zvolených deskriptorů, je nutnou podmínkou k nalezení nejpodobnějších pozorovaných povodí použití takových deskriptorů, které souvisejí se zájmovou charakteristikou na nepozorovaném povodí. V opačném případě hrozí, že odhad zájmové charakteristiky na nepozorovaném povodí nebude přesný.

Významné deskriptory (a jejich optimální počet) se velmi často vybírají metodou pokus-omyl na základě různých kombinací vybraných deskriptorů (např. Laaha and Blöschl, 2006; Oudin et al., 2008; Parajka et al., 2005; Zrinji and Burn, 1994). Očekává se, že významné deskriptory patří zejména do kategorií deskriptorů souvisejících s půdními charakteristikami (Wagener et al., 2004), s vegetačním krytem a využitím půdy a s klimatem (Young, 2006). Tyto kategorie bývají často také doplněny o vybrané morfologické deskriptory (Laaha and Blöschl, 2006; Oudin et al., 2008; Parajka et al., 2005). Velkou nevýhodou této metody je pravděpodobně fakt, že takto získaný „optimální“ soubor významných deskriptorů povodí (optimální kombinace deskriptorů) je skutečně optimální pouze pro zvolený soubor povodí a zvolenou zájmovou charakteristiku (Oudin et al., 2008). Použití takového souboru deskriptorů může vést na jiném souboru povodí (nebo na stejném souboru povodí, ale pro jinou zájmovou charakteristiku) pravděpodobně ke špatným výsledkům. Alternativní způsob výběru významných deskriptorů navrhli Nathan and McMahon (1990), kteří tyto definovali na základě krokové regrese. Takto získané významné deskriptory pak byly použity jako shlukové proměnné při vytváření homogenních skupin povodí.

#### Metodika

##### Inverzní shlukování

Metoda inverzního shlukování, která vychází z nehierarchických metod shlukové analýzy dat, je založena na formování pravidelných shluků pozorovaných povodí okolo bodů (geometrických středů shluků), které svými souřadnicemi odpovídají souřadnicím použitých deskriptorů nepozorovaných povodí. Počet vytvářených shluků je dán počtem nepozorovaných povodí a je v průběhu analýzy neměnný. Proto odpadá hledání optimálního počtu shluků před procesem seskupování povodí metodami, jako jsou např. Calinski-Harabascův index, Goodman-Kruskalova metoda a jiné (Lukasová a Šarmanová, 1985). Protože jsou nepozorovaná povodí umístěna právě v geometrických středech formovaných shluků, odpadá také problém optimálního počátečního rozkladu, tedy stanovení typických vzorových objektů, kolem kterých se předpokládá vytvoření shluků např. Forgových metodou, Janceyovou metodou a jinými (Lukasová a Šarmanová, 1985). Přiřazování pozorovaných povodí do jednotlivých shluků je založeno na vážené Euklidovské vzdálenosti mezi bodem odpovídajícím souřadnicím deskriptorů nepozorovaného povodí (v geometrickém středu shluku) a bodem odpovídajícím souřadnicím deskriptorů přiřazeného pozorovaného povodí:

$$d_{ug} = \left[ \sum_{c=1}^N w_c (X_c^u - X_c^g)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1),$$

kde  $d_{ug}$  je Euklidovská vzdálenost mezi nepozorovaným povodím v geometrickém středu shluku  $u$  a přiřazeným pozorovaným povodím  $g$ ,  $X_c^u$  – hodnota  $c$ -tého deskriptoru nepozorovaného povodí  $u$ ,  $X_c^g$  – hodnota  $c$ -tého deskriptoru  $e$ -tého pozorovaného povodí  $g$  a  $w_c$  – váha aplikovaná na každý použitý deskriptor povodí.

Na rozdíl od nehierarchických metod shlukové analýzy dat může být každé pozorované povodí přiřazeno do všech vytvořených shluků, kam by podle vypočtené vážené Euklidovské vzdálenosti teoreticky patřilo. Předpokládáme-li několik nepozorovaných povodí s velmi podobnými deskriptory, můžeme očekávat shluky, které se mohou z velké části překrývat (v krajním případě se při určité kombinaci zvolených deskriptorů mohou takové shluky překrývat úplně). Pokud bychom do takových shluků přiřazovali pozorované povodí, jehož vzdálenost vypočtená na základě rovnice (1) by byla

k těžištěm určitých shluků stejná, bylo by velmi obtížné takové pozorované povodí přiřadit do shluku z důvodu platnosti předpokladu, který platí pro nehierarchické metody shlukové analýzy dat (průnik dvou shluků je vždy prázdnou množinou).

Kontrola homogenity takto zformovaných shluků je provedena výpočtem koeficientu determinace mezi Andrewsovou křivkou (Andrews, 1972) odvozenou na základě použitých deskriptorů povodí nepozorovaného povodí v těžišti shluku a Andrewsovou křivkou odvozenou na základě použitých deskriptorů povodí přiřazovaného pozorovaného povodí:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (f_u(t) - f_g(t))^2}{\sum_{t=1}^N (f_u(t) - \bar{f}_u)^2} \quad (2),$$

kde  $f_u(t)$  je funkční hodnota Andrewsovy křivky nepozorovaného povodí v bodě  $t$ ,  $f_g(t)$  – funkční hodnota Andrewsovy křivky pozorovaného povodí v bodě  $t$  a  $\bar{f}_u$  – je průměr hodnot vypočtených na základě Andrewsovy křivky nepozorovaného povodí. Andrewsova křivka reprezentuje bod ve vícerozměrném prostoru o souřadnicích (hodnotách vybraných deskriptorů povodí)  $x = [X_1, X_2, \dots, X_N]$  (kde  $N$  je maximální počet deskriptorů povodí) matematickou funkcí ve formě:

$$f(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \sin(t) + X_3 \cos(t) + X_4 \sin(2t) + X_5 \cos(2t) + \dots \quad (3),$$

v rozsahu  $-\pi \leq t \leq \pi$ , kde  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  jsou hodnoty použitých deskriptorů povodí. Dá se předpokládat, že povodí s velmi podobnými Andrewsovými křivkami – s vysokou hodnotou koeficientu determinace vypočtenou podle rovnice (2) – mají velmi podobné deskriptory povodí, a proto lze očekávat podobné hydrologické chování těchto povodí a tedy i velmi podobné sady parametrů modelu.

Pouze pozorovaná povodí, jejichž Andrewsovy křivky jsou velmi podobné Andrewsovým křivkám nepozorovaných povodí (hodnota  $r^2 \geq r_c^2$ ), jsou ponechána ve shlucích, kam byla přiřazena. Prahovou hodnotu koeficientu determinace  $r_c^2$  je nutné stanovit s ohledem na očekávaný celkový počet použitých deskriptorů povodí před vlastní analýzou. Předpokládáme-li nižší celkový počet identifikovaných významných deskriptorů povodí, je nutné volit spíše vyšší hodnoty  $r_c^2$ , abychom zaručili vznik homogenních shluků. Pokud očekáváme vyšší celkový počet identifikovaných významných deskriptorů povodí, je nutné volit spíše menší hodnoty  $r_c^2$ , abychom zamezili zvýšenému počtu prázdných shluků.

Parametry modelu pro každé nepozorované povodí jsou vypočteny jako vážené průměry parametrů přiřazených pozorovaných povodí v rámci každého shluku:

$$\theta_i^u = \frac{\sum_{p=1}^N w_p \theta_{ip}^g}{\sum_{p=1}^N w_p} \quad (4),$$

kde  $\theta_i^u$  je zájmový parametr na nepozorovaném povodí,  $\theta_{ip}^g$  – známý parametr pozorovaného povodí a  $w_i$  – váha aplikovaná na každý parametr  $\theta_{ip}^g$ . Jako váha zde byla zvolena převrácená hodnota vzdálenosti mezi těžištěm shluku (nepozorovaným povodím) a přiřazovaným pozorovaným povodím vypočtená na základě rovnice (1).

### Vytváření souboru shlukových proměnných a definování významných deskriptorů

Deskriptory povodí byly do souboru shlukových proměnných řazeny podle schématu, které můžeme nazvat postupný výběr pozorovaných povodí nejpodobnějších zájmovému nepozorovanému povodí. Toto schéma je založeno na postupném vymezování homogenních oblastí (regionů) deskriptory ze zvolených kategorií. Deskriptory z první kategorie definují primární regiony, ze kterých jsou pak vymezovány subregiony pomocí deskriptorů dalších kategorií. Použité schéma předpokládá, že v souboru shlukových proměnných bude přítomen alespoň jeden významný deskriptor z každé zvolené kategorie, což by mělo zaručit vznik regionů velmi podobných povodí, a tedy homogenních shluků.

Pokud označíme vybrané kategorie deskriptorů  $a_j$  (pro  $j = 1, \dots, l$ , kde  $l$  je maximální počet kategorií deskriptorů) a třídy výpočetních cyklů  $b_k$  (pro  $k = 1, \dots, m$ , kde  $m$  je maximální počet tříd výpočetních cyklů), pak použité schéma probíhá v následujících krocích:

1. vytvoření  $\binom{n_{a_j}}{2}$  souborů shlukových proměnných z dvojic deskriptorů  $a_j$  kategorie (kde  $n_{a_j}$  udává celkový počet deskriptorů  $a_j$  kategorie),
2. provedení  $\binom{n_{a_j}}{2}$  cyklů výpočtů v  $b_k$  třídě pomocí souborů shlukových proměnných vytvořených v kroku 1 a výběr dvojice významných deskriptorů podle zvolených kritérií,
3. vytvoření  $\binom{n_{a_j} - 2 + n_{a_{j+1}}}{2}$  nových souborů shlukových proměnných (kde  $\binom{n_{a_j} - 2}{2}$  je počet zbylých deskriptorů  $a_j$  kategorie a  $n_{a_{j+1}}$  je celkový počet deskriptorů  $a_{j+1}$  kategorie),

4. opakování kroku 2 s  $\binom{n_{a_j} - 2 + n_{a_{j+1}}}{2}$  novými soubory shlukových proměnných v  $b_{k+1}$  třídě výpočetních cyklů, výběr trojice významných deskriptorů,

5. vytvoření  $\binom{n_{a_j} - 3 + n_{a_{j+1}}}{2}$  souborů shlukových proměnných (kde  $\binom{n_{a_j} - 3}{2}$  je počet zbylých deskriptorů  $a_j$  kategorie a  $n_{a_{j+1}}$  – celkový počet deskriptorů  $a_{j+1}$  kategorie), nebo  $\binom{n_{a_j} - 2 + n_{a_{j+1}} - 1}{2}$  nových souborů shlukových proměnných (kde  $\binom{n_{a_j} - 2}{2}$  je počet zbylých deskriptorů  $a_j$  kategorie a  $\binom{n_{a_{j+1}} - 1}{2}$  – počet zbylých deskriptorů  $a_{j+1}$  kategorie),

6. opakování kroku 2 s  $\binom{n_{a_j} - 3 + n_{a_{j+1}}}{2}$  nebo s  $\binom{n_{a_j} - 2 + n_{a_{j+1}} - 1}{2}$  soubory shlukových proměnných v  $b_{k+2}$  třídě výpočetních cyklů, výběr čtveřice významných deskriptorů,

7. opakování kroků 3, 4, 5 a 6 pro deskriptory následných kategorií.

Toto schéma probíhalo tak dlouho, dokud další přidání deskriptorů  $a_j$  kategorie v  $b_k$  třídě výpočetních cyklů ještě zlepšil odhad parametrů modelu na nepozorovaném povodí.

Za významný deskriptor byl považován každý deskriptor z dané kategorie, který:

a) zapřičinil minimální hodnoty procentických odchylek odhadovaných parametrů od jejich optimálních hodnot v  $b_k$  třídě výpočetních cyklů oproti ostatním deskriptorům ze stejné nebo jiné kategorie podle rovnice:

$$MIN = \sum_{i=1}^N w_i \left[ \left( \frac{\tilde{D}_{\theta_i^u}}{\bar{D}_{\theta_i^u}} \cdot 100 \right) - 100 \right] \quad (5),$$

kde  $\tilde{D}_{\theta_i^u}$  je medián absolutních hodnot procentických odchylek mezi odhadovaným parametrem  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí a optimální hodnotou parametru  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí, stanovený v každém cyklu  $b_k$  třídy,  $\bar{D}_{\theta_i^u}$  – minimální hodnota zjištěná mezi mediány absolutních hodnot procentických odchylek mezi odhadovaným parametrem  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí a optimální hodnotou parametru  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí všech cyklů z  $b_k$  třídy a  $w_i$  – váha aplikovaná na každý parametr modelu  $\theta_i^u$ ,

b) zapřičinil maximální zpřesnění odhadu parametrů po jeho přidání do souboru shlukových proměnných z  $a_j$  kategorie v  $b_k$  třídě výpočetních cyklů podle rovnice:

$$MAX = \sum_{i=1}^N w_i \left( \tilde{D}_{\theta_i^u} - \bar{D}_{\theta_i^u} \right) \quad (6),$$

kde  $\tilde{D}_{\theta_i^u}$  je medián absolutních hodnot procentických odchylek mezi odhadovaným parametrem  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí a optimální hodnotou parametru  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí, stanovený pro skupinu významných deskriptorů  $b_{k+1}$  třídy,  $\bar{D}_{\theta_i^u}$  – medián absolutních hodnot procentických odchylek mezi odhadovaným parametrem  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí a optimální hodnotou parametru  $\theta_i^u$  na nepozorovaném povodí v každém cyklu  $b_k$  třídy a  $w_i$  – váha aplikovaná na každý parametr modelu  $\theta_i^u$ .

Kromě mediánů absolutních hodnot procentických odchylek odhadovaných parametrů od optimálních hodnot byly rovnicemi (5) a (6) řešeny také aritmetické průměry absolutních hodnot procentických odchylek odhadovaných parametrů od optimálních hodnot a maximální absolutní hodnoty procentických odchylek odhadovaných parametrů od optimálních hodnot. Pokud budou dále v textu uváděny termíny mediány odchylek a průměrné odchylky a maximální odchylky, myslí se vždy mediány absolutních hodnot odhadovaných parametrů od jejich optimálních hodnot ( $\tilde{D}_{\theta_i^u}$ ), aritmetické průměry absolutních hodnot procentických odchylek odhadovaných parametrů od optimálních hodnot ( $\bar{D}_{\theta_i^u}$ ) a maximální absolutní hodnoty procentických odchylek odhadovaných parametrů od jejich optimálních hodnot ( $D_{\theta_i^u}^{\max}$ ).

### Použitá data

K analýze byla využita data 438 povodí projektu MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment), situovaných po celém území USA. Použitý datový soubor obsahoval jednak deskriptory povodí z různých kategorií (klimatické, hydrologické, půdní charakteristiky, vegetační kryt a jiné), ale také optimální sady jedenácti parametrů modelu Sacramento, které byly určeny metodou SCE-UA (Duan et al., 1992) pro každé povodí v rámci projektu. Tyto optimální sady byly při analýze využity jako srovnávací hodnoty při odhadech parametrických sad metodou váženého průměru podle rovnice (4) v rámci každého shluku. Popisu modelu Sacramento a jeho parametrům bylo věnováno mnoho místa v různých publikacích, např. Burnash (1995). Z tohoto důvodu zde nebudou nijak výrazně popisovány. V *tabulce 1* jsou uvedeny všechny parametry tohoto modelu i s jejich jednotkami.

K analýze byly použity čtyři kategorie deskriptorů povodí. Vybrané deskriptory ze zvolených kategorií i s jejich označením a jednotkami jsou uvedeny v *tabulce 2*. Hodnoty deskriptorů  $P_{aa}$  byly vypočteny modelem PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) pro období 1961–1990 (dostupné na <http://www.prism.oregonstate.edu/>). Hodnoty deskriptorů  $PE_{aa}$  a  $E_{aa}$  byly odvozeny na základě NOAA Freewater Evaporation Atlas. Deskriptory  $LS$ ,  $MS$  a  $HS$  byly vytvořeny sloučením 12 půdních druhů (z 15 možných kategorií podle USDA): deskriptor  $LS$  jako suma písčítých a hlinitopísčítých půd, deskriptor  $MS$  jako suma písčitohlí-

nitých púd, hlinitých púd, prachových hlín a prachu a deskriptor *HS* jako suma písčitojílovitých púd, jílovitohlinitých púd, písčitojílovitohlinitých púd, jílovitých púd, prachového jílu a prachových jílovitohlinitých púd. Uvažovány nebyly půdy organického původu, suť a ostatní půdy, protože jejich relativní zastoupení v povodích bylo velmi malé. Základem pro deskriptory *Fo*, *Cr*, *Gr* a *Ur* byla klasifikace IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme). Deskriptor *Fo* byl sestaven jako suma relativního zastoupení ploch neopadavých jehličnatých lesů, neopadavých listnatých lesů, opadavých jehličnatých lesů, opadavých listnatých lesů, smíšených lesů a hustých křovin, deskriptor *Cr* byl sestaven jako suma relativního zastoupení ploch orné půdy a mozaiky orné půdy, deskriptor *Gr* byl sestaven jako suma relativního zastoupení ploch otevřených křovin, lesních savan, savan a luk. Deskriptor *G<sub>v</sub>* byl zařazen do třetí kategorie, protože je schopen upřesnit relativní zastoupení opadavých a neopadavých lesů na povodí (velmi souvisí s deskriptorem *Fo*).

Protože hodnoty jednotlivých deskriptorů povodí měly různé rozsahy a jednotky, mohlo by dojít k tomu, že určité deskriptory by se mohly jevit jako dominující a jiné deskriptory jen málo ovlivňují průběh shlukování. Proto bylo nutné deskriptory upravit (standardizovat) tak, aby byly všechny souměřitelné. Standardizace deskriptorů povodí proběhla následujícím způsobem:

$$S_{ce} = \frac{X_{ce} - \bar{X}_c}{s_c} \quad (7),$$

kde  $S_{ce}$  je standardizovaná hodnota  $e$ -tého deskriptoru  $c$ -té skupiny deskriptorů,  $X_{ce}$  – nestandardizovaná hodnota  $e$ -tého deskriptoru  $c$ -té skupiny deskriptorů,  $\bar{X}_c$  – průměrná hodnota souboru deskriptorů  $c$ -té skupiny a  $s_c$  – směrodatná odchylka souboru deskriptorů  $c$ -té skupiny. Takto standardizované hodnoty deskriptorů pak měly střední hodnotu rovnou 0 a rozptyl roven 1.

## Výsledky a diskuse

Prahová hodnota koeficientu determinace pro porovnání Andrewsových křivek přiřazených pozorovaných povodí s Andrewsovou křivkou nepozorovaného povodí byla zvolena  $r_i^2 = 0,85$ . Tato hodnota byla zvolena jako kompromisní, neboť při nízkých hodnotách mohou ve shlucích zůstat nevhodná pozorovaná povodí, jejichž většina deskriptorů může být spíše odlišná od deskriptorů nepozorovaného povodí, nebo taková povodí, jejichž některé deskriptory jsou velmi podobné deskriptorům zájmového nepozorovaného povodí, ale některé deskriptory jsou až příliš odlišné od deskriptorů nepozorovaného povodí, což nepříznivě ovlivní odhad parametrů modelu. Na druhou stranu, při použití velmi vysoké hodnoty může docházet k tomu, že se zvyšujícím se počtem použitých deskriptorů bude výrazně stoupat počet prázdných shluků (shluků kolem nepozorovaných povodí, kam nebylo přiřazeno žádné pozorované povodí).

Váhy  $w_c$  aplikované na deskriptory povodí v rovnici (1) byly pro všechny deskriptory rovny jedné. Důvodem výběru této hodnoty byl fakt, že nebyla provedena žádná předběžná analýza, která by určila pravděpodobné kandidáty na významné deskriptory při procesu shlukování. Z tohoto důvodu se předpokládalo, že všechny použité deskriptory mohou být teoreticky stejně významné a o jejich skutečném významu rozhodne vlastní analýza založená na vypočtených hodnotách *MIN* a *MAX*. Váhy  $w_i$  spojené s parametry modelu v rovnicích (5) a (6) byly zvoleny následujícím způsobem: pokud byly hodnoty mediánů odchylek (*tabulka 2*) v intervalu  $\bar{D}_0 \in (0,00;10,00)$  %, pak byla hodnota váhy  $w_i = 0,01$  (stejný interval platil pro  $\bar{D}_0$  a  $D_0^{\max}$ ), pokud se pohybovaly hodnoty mediánů odchylek v intervalu  $\bar{D}_0 \in (10,00;20,00)$  %, pak byla hodnota váhy  $w_i = 0,5$  (stejný interval platil pro  $\bar{D}_0$  a  $D_0^{\max}$ ), pokud byly hodnoty mediánů odchylek v intervalu  $\bar{D}_0 \in (20,00;+\infty)$  %, pak byla hodnota váhy  $w_i = 1,0$  (stejný interval platil pro  $\bar{D}_0$  a  $D_0^{\max}$ ). Toto rozdělení vah bylo zdůvodněno zejména faktem, že hodnota *MIN* byla vztahována v dané třídě výpočetních cyklů k nejmenší nalezené hodnotě mezi mediány odchylek a průměrnými odchylkami a maximálními odchylkami. Proto parametry s mediány odchylek (průměrnými a maximálními odchylkami) menšími než 10 % přispívaly díky tvaru rovnice (5) k celkové hodnotě *MIN* tak výrazně, že vliv parametrů s mediány odchylek (průměrnými a maximálními odchylkami) většími než 20 % byl malý. Tento jev by pak mohl zapříčinit výběr deskriptoru, který není skutečně významný. Podobné důvody vedly k použití stejných vah při výpočtu hodnot *MAX*.

Významné deskriptory byly podle zvoleného schématu nejprve hledány ve skupině klimatických deskriptorů (první kategorie). Nejlepších výsledků

**Tabulka 1.** Označení, popis a jednotky parametrů modelu Sacramento

Označení	Popis	Jednotka
UZTWM	horní zóna vázané vody (maximální kapacita)	mm
UZFWM	horní zóna volné vody (maximální kapacita)	mm
LZTWM	dolní zóna vázané vody (maximální kapacita)	mm
LZFPM	dolní zóna volné primární podzemní vody (maximální kapacita)	mm
LZFSM	dolní zóna volné suplementární podzemní vody (maximální kapacita)	mm
UZK	výtokový koeficient horní zóny	den <sup>-1</sup>
LZPK	výtokový koeficient dolní primární zóny	den <sup>-1</sup>
LZSK	výtokový koeficient dolní suplementární zóny	den <sup>-1</sup>
ZPERC	koeficient maximální míry perkolace	–
REXP	exponent tvaru infiltrační křivky	–
PFREE	část vody převáděná do LZFPM i před nasycením LZTWM	%

**Tabulka 2.** Kategorie použitých deskriptorů povodí s konkrétně vybranými deskriptory, doplněné o jejich označení a jednotky

Kategorie deskriptorů	Použité deskriptory	Označení	Jednotka
klimatické deskriptory	průměrná roční srážka	$P_{aa}$	mm
	průměrná roční potenciální evaporace	$PE_{aa}$	mm
	podíl průměrné roční srážky a průměrné roční potenciální evaporace	$P_{aa}/PE_{aa}$	–
	podíl průměrné roční evaporace a průměrné roční potenciální evaporace	$P_{aa}/PE_{aa}$	–
půdní charakteristiky a půdní druhy	pórovitost	$Po$	–
	nasyčená hydraulická vodivost	$SHC$	m.s <sup>-1</sup>
	bod vadnutí	$Wp$	–
	relativní zastoupení lehkých púd na povodí	$LS$	–
	relativní zastoupení středních púd na povodí	$MS$	–
vegetační kryt a pokrývnost	relativní zastoupení těžkých púd na povodí	$HS$	–
	relativní zastoupení lesních porostů	$Fo$	–
	relativní zastoupení orné půdy	$Cr$	–
	relativní zastoupení trvalých travních porostů	$Gr$	–
	relativní zastoupení urbanizovaných ploch	$Ur$	–
morfologické deskriptory	pokrývnost povodí v únoru	$G_v$	–
	plocha povodí	$A_c$	km <sup>2</sup>

bylo dosaženo pro dvojici deskriptorů  $P_{aa}$  a  $PE_{aa}$ . Třetí významný deskriptor byl hledán jak mezi deskriptory druhé kategorie (půdní charakteristiky a relativní zastoupení půdních druhů na povodí), tak i mezi zbylými klimatickými deskriptory. Jako významný byl identifikován deskriptor *HS*. Čtvrtý významný deskriptor byl hledán opět jak mezi deskriptory druhé kategorie, tak i mezi zbylými klimatickými deskriptory. Jako významný byl identifikován deskriptor *SHC*. Pátý významný deskriptor byl hledán jednak mezi deskriptory třetí kategorie (vegetační kryt a pokrývnost), tak i mezi zbývajícími deskriptory druhé kategorie. Jako významný deskriptor byl identifikován  $G_v$ . Šestý významný deskriptor byl hledán opět mezi deskriptory třetí kategorie a zbývajícími deskriptory druhé kategorie. Jako významný deskriptor byl identifikován *Ur*. Sedmý významný deskriptor byl hledán mezi deskriptorem čtvrté kategorie a zbývajícími deskriptory třetí kategorie. Jako významný deskriptor byl identifikován  $A_c$ .

Výsledky analýzy jsou uvedeny v *tabulkách 3, 4 a 5*. V *tabulce 3* jsou uvedeny změny mediánů odchylek se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů identifikovaných v  $a_j$  kategoriích deskriptorů v  $b_k$  třídách výpočetních cyklů. V *tabulce 4* si můžeme všimnout u několika parametrů výrazného snížení hodnoty mediánů odchylek (LZPK, REXP, PFREE) při použití tří významných deskriptorů (proti použití dvou deskriptorů), ale také velkého zvýšení hodnoty mediánů odchylek u parametrů LZTWM, UZK, po kterém opět následovalo výrazné snížení hodnot mediánů odchylek těchto parametrů (při použití čtyř významných deskriptorů). Dále si můžeme všimnout, že u pěti parametrů bylo dosaženo minimálních hodnot mediánů odchylek již při použití pěti významných deskriptorů. Při použití šesti (sedmi) deskriptorů došlo buď k navýšení hodnot mediánů odchylek, nebo k jejich dalšímu nepřítis výraznému poklesu.

Celkově můžeme z *tabulky 3 a obr. 1, 2 a 3* usoudit, že s rostoucím počtem použitých významných deskriptorů se zvyšovala přesnost odhadu parametrů modelu vyjádřená poklesem hodnot jak mediánů odchylek, tak i průměrných odchylek a maximálních odchylek. Pokles v jejich hodnotách byl nejvýraznější do 4–5 použitých významných deskriptorů. Další přidání deskriptorů (6–7) přesnost odhadu nijak výrazně nezlepšily. Toto zvýšení přesnosti však u mediánů odchylek nebylo příliš zřejmé, protože již při použití dvou významných deskriptorů byly mediány odchylek u sedmi parametrů menší než 10 %. Nejlepších odhadů bylo dosaženo při použití pěti významných deskriptorů, kdy u deseti parametrů mediánů byly hodnoty mediánů odchylek menší než 10 % (u šesti parametrů dokonce menší než 5 %).

V *tabulce 4* jsou uvedeny hodnoty *MIN* vypočtené na základě mediánů odchylek  $MIN_{vd}^{med}$ , průměrných odchylek  $MIN_{vd}^{pr}$  a maximálních odchylek  $MIN_{vd}^{max}$  se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů v  $b_k$  třídách výpočetních cyklů v porovnání s hodnotami *MIN* vypočtenými na základě

**Tabulka 3.** Změna mediánů odchylek se zvyšujícím se počtem významných deskriptorů použitých jako shlukové proměnné

Parametr	Počet použitých významných deskriptorů povodí					
	2	3	4	5	6	7
UZTWM	4,930	6,436	4,534	2,776	3,656	4,396
UZFWM	10,191	6,214	6,096	4,986	5,369	5,983
LZTWM	3,061	7,382	4,896	3,755	3,336	3,681
LZFPM	14,755	11,387	10,215	9,025	12,534	12,388
LZFSM	7,848	6,549	5,982	7,035	6,691	6,196
UZK	4,821	7,228	2,190	2,954	3,578	2,981
LZPK	37,805	17,014	30,326	19,643	22,696	25,150
LZSK	5,522	6,496	2,425	2,241	3,529	2,985
ZPERC	6,463	8,707	5,878	8,573	9,064	7,665
REXP	6,424	3,961	3,049	3,420	3,303	3,328
PFREE	16,585	9,515	5,539	7,553	6,926	5,850

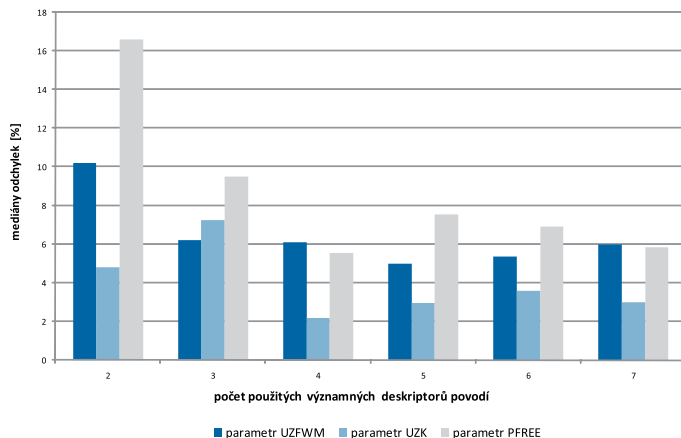
mediánů odchylek  $MIN_{\min}^{med}$ , průměrných odchylek  $MIN_{\min}^{pr}$  a maximálních odchylek  $MIN_{\min}^{max}$ , které byly získány v  $b_k$  třídě výpočetních cyklů, ale jejichž hodnota  $MIN$  byla menší než hodnota  $MIN$  souboru významných deskriptorů. Pokud není v *tabulce 4* ve sloupcích  $MIN_{\min}$  uvedena žádná hodnota, pak hodnota  $MIN$  souboru významných deskriptorů byla v  $b_k$  třídě cyklů výpočtů nejmenší. Ze získaných výsledků je patrný výrazný nárůst hodnot  $MIN$  po přidání třetího významného deskriptoru jak pro průměry, tak i maxima. Po tomto výrazném zvýšení hodnot  $MIN$  došlo k jejich výraznému poklesu po přidání čtvrtého významného deskriptoru. Po přidání šestého a sedmého deskriptoru již nedocházelo k výraznějšímu poklesu hodnoty  $MIN$ . Naopak u hodnoty  $MIN_{\min}^{med}$  došlo po přidání šestého a sedmého deskriptoru k jejímu výraznému zvýšení (až dvacetinásobek proti pěti použitým deskriptorům).

První výrazné zvýšení hodnot  $MIN$  souviselo patrně s výběrem třetího významného deskriptoru. Jako významný deskriptor byl v této  $b_k$  třídě výpočetních cyklů identifikován deskriptor  $HS$ , avšak podobných jen o málo větších hodnot  $MIN$  bylo dosaženo i při použití deskriptorů  $P_{ae}/PE_a$  a  $Wp$ . Tato skutečnost může ukazovat na určité omezení rovnice (5) a nutnost její redefinice. Druhé zvýšení hodnoty  $MIN_{\min}^{med}$  patrně souvisí se skutečností, že šestý a sedmý deskriptor jsou již redundantní informací, která odhad parametrů nijak nezlepšila, ale spíše naopak. Se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů se snižoval rozptyl vypočtených hodnot  $MIN$  v rámci  $b_k$  tříd výpočetních cyklů, což vedlo k tomu, že výběr významného deskriptoru byl v dané  $b_k$  třídě výpočetních cyklů stále obtížnější. Z tohoto důvodu bylo nutné k výběru významných deskriptorů používat ještě vypočtené hodnoty  $MAX$ .

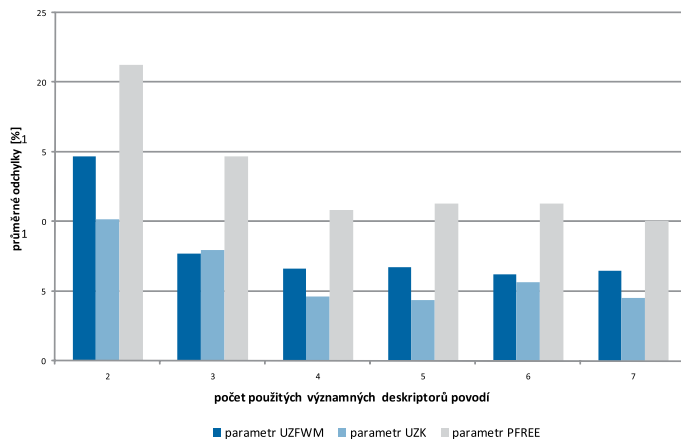
V *tabulce 5* jsou uvedeny hodnoty  $MAX$  vypočtené na základě mediánů odchylek  $MAX_{\min}^{med}$ , průměrných odchylek  $MAX_{\min}^{pr}$  a maximálních odchylek  $MAX_{\min}^{max}$  se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů v  $b_k$  třídě cyklů v porovnání s hodnotami  $MAX$  vypočtenými na základě mediánů odchylek  $MAX_{\max}^{med}$ , průměrných odchylek  $MAX_{\max}^{pr}$  a maximálních odchylek  $MAX_{\max}^{max}$ , které byly získány v  $b_k$  třídě cyklů, ale jejichž hodnota  $MAX$  byla větší než hodnota  $MAX$  souboru významných deskriptorů. Pokud není v *tabulce 5* ve sloupcích  $MAX_{\max}$  uvedena žádná hodnota, pak hodnota  $MAX$  souboru významných deskriptorů byla v  $b_k$  třídě cyklů největší. V *tabulce* si můžeme všimnout určitého obecného poklesu v hodnotách  $MAX_{\min}^{med}$  a  $MAX_{\min}^{pr}$  se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů. U hodnot  $MAX_{\min}^{max}$  není tento pokles patrný. Dále si můžeme všimnout výrazného zvýšení hodnot  $MAX_{\min}^{pr}$  a  $MAX_{\min}^{max}$  po přidání čtvrtého významného deskriptoru do souboru shlukových proměnných.

Na základě výsledků v *tabulce 5* můžeme konstatovat, že se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů bylo stále obtížnější dále zpřesňovat odhad parametrů modelu v  $b_k$  třídě výpočetních cyklů v porovnání s  $b_{k-2}$  třídou výpočetních cyklů. Tento fakt je z *tabulky 5* více než zřejmý, když zejména s vyšším počtem použitých významných deskriptorů byly hodnoty  $MAX$  velmi často záporné, což mohlo znamenat, že odhad většího počtu parametrů nebyl v  $b_k$  třídě výpočetních cyklů v porovnání s  $b_{k-2}$  třídou zpřesněn. Patrné je to u hodnot  $MAX_{\min}^{med}$  pro šest a sedm deskriptorů proti hodnotě  $MAX_{\min}^{med}$  pěti deskriptorů. Dále si můžeme všimnout, že hodnoty  $MAX_{\min}$  po přidání třetího významného deskriptoru jsou ve všech třech případech menší než hodnoty  $MAX_{\max}$ . Tento výsledek je pravděpodobně opět způsoben výběrem třetího významného deskriptoru, který musel negativně ovlivnit odhadované parametry.

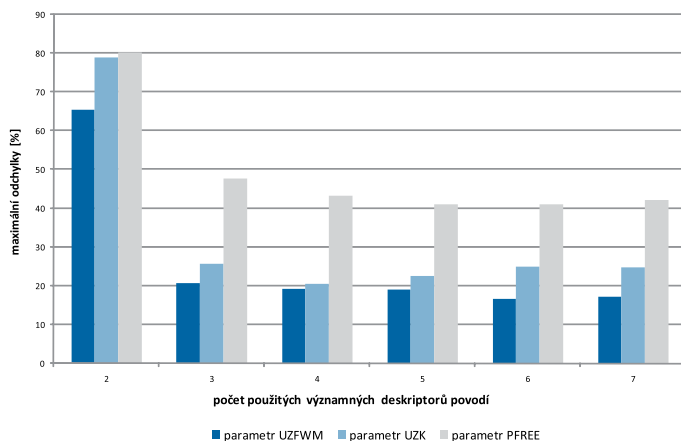
Ze získaných výsledků je patrné, že ke spolehlivému odhadu parametrů modelu je při použití schématu dostatečný počet pět významných deskriptorů povodí ze tří kategorií. Další přidání významných deskriptorů (šestý a sedmý) byly pravděpodobně redundantní informací a odhady parametrů nijak výrazně nezpřesnily. Můžeme také konstatovat, že vybrané „významné“ deskriptory byly podle vypočtených hodnot  $MIN$  většinou skutečně významné (sporný je pouze třetí významný deskriptor), neboť použití těchto deskriptorů vedlo k takovým hodnotám  $MIN$ , které byly několikanásobně menší (v extrémních případech až 200x menší) než hodnoty  $MIN$  ostatních souborů deskriptorů v daných  $b_k$  třídách výpočetních cyklů. Dále je ze získaných výsledků patrné, že se zvyšujícím se počtem



**Obr. 1.** Změna mediánů odchylek u parametrů UZFWM, UZK a PFREE se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů povodí



**Obr. 2.** Změna průměrných odchylek u parametrů UZFWM, UZK a PFREE se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů povodí



**Obr. 3.** Změna maximálních odchylek u parametrů UZFWM, UZK a PFREE se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů povodí

použitých významných deskriptorů bylo stále obtížnější identifikovat další významné deskriptory – na základě hodnot  $MIN$  a  $MAX$  bylo stále obtížnější rozhodnout o tom, který deskriptor z  $a_k$  kategorie byl významný, neboť se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů se hodnoty  $MIN$  a  $MAX$  různých souborů deskriptorů v  $b_k$  třídách výpočetních cyklů velmi podobaly (snižoval se rozptyl hodnot  $MIN$  a  $MAX$  se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů). Z tohoto důvodu by jistě bylo vhodné buď upravit rovnice (5) a (6), nebo přidat další hodnotící kritérium pro výběr významných deskriptorů.

Pokud se zaměříme na identifikované významné deskriptory, pak si můžeme všimnout výrazné absence deskriptorů vegetačního krytu (zejména deskriptoru  $Fo$ ) v souboru významných deskriptorů. Přitom jsou tyto deskriptory obecně považovány za významné, a jsou proto často používány jako shlukové proměnné – zejména deskriptor  $Fo$  (Nathan and McMahon, 1990; Oudin et al., 2008). Pravděpodobným důvodem výrazné absence těchto deskriptorů ve výsledném souboru je fakt, že velká část použitých povodí má tyto deskriptory velmi podobné: 50 % povodí je zalesněno z více než 80 %, 30 % povodí je naopak zalesněno z méně než 10 %. Zastoupení deskriptoru  $Gr$  je na více než 85 % povodí menší než 10 %

a zastoupení deskriptoru  $Cr$  je na více než 95 % povodí menší než 10 % (velmi často bylo 0 %). A právě tato skutečnost musela vést k tomu, že žádný z těchto tří deskriptorů nebyl identifikován jako významný. Na rozdíl od deskriptorů  $Gr$  a  $Cr$  souvisel problém spojený s vysokým relativním zastoupením deskriptoru  $Fo$  na povodích pravděpodobně také s jeho odvozením. Protože byl tento deskriptor odvozen jako suma z šesti odlišných typů lesních porostů, pak to jistě vedlo ke skutečnosti, že až na 50 % povodí bylo relativní zastoupení deskriptoru  $Fo$  tak vysoké, ale také, že tento deskriptor touto nepřilíhivě vhodnou úpravou pozbyl na významnosti. Na druhou stranu bylo dosaženo velmi dobrých výsledků u deskriptorů  $P_{aa}/PE_a$  a  $A_c$ . Zejména první uvedený deskriptor (který dával velmi podobné výsledky jako deskriptor  $HS$ ) byl jistě redundantní informací ve výsledném souboru významných deskriptorů, protože byl odvozen na základě deskriptorů, které byly zařazeny do souboru shlukových proměnných jako významné v  $b_2$  třídě výpočetních cyklů. Skutečnost, že na základě přidání tohoto deskriptoru bylo dosahováno velmi podobných hodnot  $MIN$  a  $MAX$  jako u třetího významného deskriptoru  $HS$ , naznačuje, že významnost deskriptorů také výrazně souvisí s vysokou variabilitou v jejich hodnotách napříč celým souborem analyzovaných povodí. Deskriptor  $A_c$  byl identifikován jako sedmý významný deskriptor. Tento deskriptor má vysokou variabilitu ve svých hodnotách a také jistě souvisí s některými odhadovanými parametry, avšak jeho „významnost“ spočívá pouze v doplňkové informaci k dalším významným deskriptorům. Z tohoto důvodu byl tento deskriptor umístěn až ve čtvrté kategorii. Vysoká variabilita v hodnotách je patrná i u deskriptoru  $HS$ . Tento deskriptor byl identifikován jako třetí významný deskriptor, i když hodnoty  $MIN$  a  $MAX$  byly po zařazení tohoto deskriptoru jen nepříliš výrazně lepší oproti hodnotám  $MIN$  a  $MAX$  dalších deskriptorů z testovaných kategorií v dané  $b_k$  třídě výpočetních cyklů. Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena jeho odvozením. Deskriptor  $HS$  byl sestaven jako suma šesti různých půdních druhů a právě tato skutečnost mohla způsobit, že po přidání tohoto deskriptoru nedával soubor shlukových proměnných takové hodnoty  $MIN$  a  $MAX$ , jak by se očekávalo po přidání významného deskriptoru.

## Závěr

Představená metoda popisuje schéma postupného výběru významných deskriptorů aplikované na rozsáhlý a velmi heterogenní soubor povodí (ve svých deskriptorech) projektu MOPEX, které byly použity jako shlukové proměnné při procesu seskupování povodí metodou inverzního shlukování. Získané výsledky naznačují, že postupné vymezování oblastí podobných povodí na základě hierarchické kategorizace skupin deskriptorů může vést k uspokojivým výsledkům při regionalizaci vycházející z přístupu deskriptorové podobnosti. Na základě dosažených výsledků můžeme konstatovat, že významnost jednotlivých deskriptorů sice úzce souvisí s odhadovanými parametry, ale také s variabilitou deskriptorů v jejich hodnotách a v neposlední řadě i v jejich odvození (špatně odvozený deskriptor musí jistě výrazně ztrácet na své informativnosti – problém s deskriptorem  $HS$ ). Z tohoto důvodu je pravděpodobně obtížné označit jeden nebo druhý deskriptor za významnější. Zřejmé je to například u parametrů LZTWM, LZFSM, ZPERC a REXP, jejichž mediány byly i při použití pouze dvou deskriptorů (navíc klimatických, ale s vysokou variabilitou v hodnotách) velmi nízké (pod 10 %). U těchto parametrů se očekávalo, že výraznější zpřesnění odhadu přijde až po zařazení významných půdních charakteristik do souboru deskriptorů.

Je jistě pravda, že soubor významných deskriptorů povodí, který byl získán při této studii, je „skutečně významný“ pouze pro zvolený soubor povodí a zvolenou zájmovou charakteristiku, avšak navržené schéma by mělo být aplikovatelné na jakýkoliv i velmi heterogenní soubor povodí a pro jakoukoliv zájmovou charakteristiku. Zejména pro velmi rozsáhlé soubory obsahující povodí z velmi rozdílných oblastí je navržené schéma pravděpodobně velmi vhodné (povodí projektu MOPEX napříč USA nebo na východním pobřeží Austrálie). Na druhé straně může být schéma po vhodné úpravě použito i na malých a relativně homogenních souborech povodí, kdy pouze dojde k redukci zvolených kategorií deskriptorů.

## Literatura

- Acreman, AC. and Sinclay, CD. (1986) Classification of drainage basins according to their physical characteristics; an application for flood frequency analysis in Scotland. *Journal of Hydrology*, 84, p. 365–380.
- Andrews, DF. (1972) Plots of high-dimensional data. *Biometrics*, 28, p. 125–136.
- Burn, DH. and Boorman, DB. (1993) Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 143, p. 429–454.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, VK. (1992) Effective and efficient global optimization for

**Tabulka 4.** Změna hodnot  $MIN_{vd}^{med}$ ,  $MIN_{vd}^{pr}$  a  $MIN_{vd}^{max}$  se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů v porovnání s hodnotami  $MIN_{min}^{med}$ ,  $MIN_{min}^{pr}$  a  $MIN_{min}^{max}$  deskriptorů, které nebyly určeny jako významné, ale jejichž hodnota  $MIN$  je menší než hodnota  $MIN$  významných deskriptorů

Počet deskriptorů	$MIN_{vd}^{med}$	$MIN_{min}^{med}$	$MIN_{vd}^{pr}$	$MIN_{min}^{pr}$	$MIN_{vd}^{max}$	$MIN_{min}^{max}$
2	46,625	–	55,007	–	356,61	–
3	51,961	–	159,317	–	837,606	–
4	27,532	5,756	1,137	–	91,992	–
5	2,129	–	23,045	1,604	136,612	–
6	53,979	21,590	15,833	–	116,254	–
7	45,975	36,631	21,737	–	90,590	73,018

**Tabulka 5.** Změna hodnot  $MAX_{vd}^{med}$ ,  $MAX_{vd}^{pr}$  a  $MAX_{vd}^{max}$  se zvyšujícím se počtem použitých významných deskriptorů v porovnání s hodnotami  $MAX_{max}^{med}$ ,  $MAX_{max}^{pr}$  a  $MAX_{max}^{max}$  deskriptorů, které nebyly určeny jako významné, ale jejichž hodnota  $MAX$  je větší než hodnota  $MAX$  významných deskriptorů

Počet deskriptorů	$MAX_{vd}^{med}$	$MAX_{max}^{med}$	$MAX_{vd}^{pr}$	$MAX_{max}^{pr}$	$MAX_{vd}^{max}$	$MAX_{max}^{max}$
3	12,415	14,262	8,608	20,601	-187,246	117,353
4	-10,536	-6,126	26,699	–	584,203	–
5	5,190	–	-3,272	0,259	-29,001	2,784
6	-5,023	0,217	-1,018	-0,313	50,531	–
7	-50,390	-16,627	0,257	4,269	1,200	–

- conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28, p. 1015–1031.
- Laaha, G. and Blöschl, G. (2006) A comparison of low flow regionalisation methods – catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323, p. 193–214.
- Lukasová, A. a Šarmanová, J. (1985) Metody shlukové analýzy. Praha : SNTL, 210 s.
- Merz, R. and Blöschl, G. (2004) Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, p. 95–123.
- Nathan, RJ. and McMahon, TA. (1990) Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology*, 121, p. 217–238.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., and Le Moine, M. (2008) Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44, W03413, doi:10.1029/2007WR006240.
- Parajka, J., Merz, R., and Blöschl, G. (2005) A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, p. 157–171.
- Wagener, T. and Wheeler, HS. (2006) Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*, 320, p. 132–154.
- Wagener, T., Wheeler, HS., and Gupta, HV. (2004) Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. London : Imperial College Press, 300 p. ISBN 1-86094-466-3.
- Young, AR. (2006) Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320, p. 155–172.
- Zhang, Y. and Chiew, HSF. (2009) Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments. *Water Resources Research*, 45, W07412, doi:10.1029/2008WR007504.
- Zrinji, Z. and Burn, DH. (1994) Flood frequency analysis for ungauged sites using a region of influence approach. *Journal of Hydrology*, 153, p. 1–21.

**Ing. Martin Heřmanovský**  
KVHEM, FZP, ČZU Praha

tel.: 224 382 141, e-mail: Hermanovsky@fzp.czu.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Influence of the catchment descriptor selection on the model parameters estimation on the ungauged catchments (Heřmanovský, M.)*

## Key words

regionalization – cluster analysis – inverse clustering – catchment descriptor

**This paper is focused on finding significant catchment descriptors and their optimum number in the regionalization of Sacramento model parameters. The regionalization approach used in this study is based on the catchment descriptors similarity. Searching of the most similar catchments is made by the inverse clustering method. For analysis the data from MOPEX project (438 catchments from the USA) were used. Data file contained catchment descriptors from different categories and optimal model parameter set for each catchment. These parameter sets were used in the analysis as the comparative values. Catchment descriptors were sorted to the clustering variable set by progressive selection of gauged catchments, which are the most similar with ungauged catchment. Choice of the significant descriptors from selected categories is based on the assumption that the addition of the significant descriptor to the clustering variable set improves the accuracy of model**

parameter estimation on ungauged catchment. Accuracy of estimated parameters is expressed by the decrease of medians of absolute values of percentage deviations of estimated parameters from their optimal values (which were defined in the model calibration) and decrease of mean of absolute values of percentage deviations of estimated parameters from

their optimal values and also maximum of absolute values of percentage deviations of estimated parameters from their optimal values.

## MODELOVÁNÍ ROZVODNICE A PRIMÁRNÍCH TERÉNNÍCH CHARAKTERISTIK NA EXPERIMENTÁLNÍM POVODÍ MODRAVA 2

Petr Bašta

### Klíčová slova

digitální model terénu – interpolace – inverse distance weighting – spline – ordinary kriging – odtokový algoritmus – primární charakteristiky terénu – rozvodnice

### Souhrn

Studie popisuje tvorbu digitálního modelu terénu (DTM) užitím čtyř interpolačních metod, hodnocení úspěšnosti těchto metod, následný odhad primárních charakteristik terénu a vymezení rozvodnice na malém horském povodí Modrava 2 v prostředí ArcGIS 9.2 od ESRI. Povodí se nachází v centrální části Šumavy, jeho plocha činí pouze 17 ha, průměrná nadmožská výška je 1 260 m n. m. a reliéf není příliš členitý. Sběr dat proběhl v letech 2007 a 2009, výsledkem je dataset více než 3 100 nepravidelně rozmístěných referenčních bodů se zaznamenanou výškou. K interpolaci pravidelných gridů reprezentujících model terénu byla použita metoda inverzní vzdálenosti (IDW), spline (spline regularizovaný a spline s tenzí), ordinary kriging (s využitím pěti typů teoretických semivariogramů) a metoda natural neighbours. U každé metody byly postupně zadány různé kombinace dostupných parametrů majících vliv na interpolovaný model terénu. Digitální model terénu byl generován v podobě pravidelného gridu s rozlišením 5 m. Porovnáním predikovaných výšek s výškami měřeniými (ve vzorku bodů, které se nepodílely na interpolaci) byla provedena verifikace predikovaných DTM a od každé interpolační metody byl vybrán model s nejnižší hodnotou chyby RMSE. Na těchto modelech byly následně aplikovány vybrané hydrologické algoritmy, jejichž výsledkem jsou vyhodnocené směry odtoku, sklonitost a expozice terénu, přispívající plochy a rozvodnice. Výsledky ukázaly, že všechny použité interpolační metody poskytly srovnatelné výsledky. Prokázal se jev, že v případě kvalitních vstupních dat poskytuje většina interpolačních metod podobné výsledky. Podle RMSE se nejúspěšnější metodou stal spline (RMSE = 0,39 m). Vymezení rozvodnice se liší pouze v detailech a jejich složením lze získat výslednou rozvodnici povodí.

### Úvod

Digitální model terénu (DTM) představuje numerickou reprezentaci terénu, avšak lze jej definovat různými způsoby. Studie [17] jej definuje jako statistickou reprezentaci spojitého povrchu země prostřednictvím velkého počtu vybraných bodů se známými souřadnicemi  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  v libovolné souřadnicové soustavě. Hodnoty digitálního modelu terénu jsou potom funkcí veličiny, kterou daný model popisuje [6]. Podle studie [22] je digitální model terénu definován jako uspořádané pole číselných hodnot, které kvantifikují sledovanou charakteristiku terénu v libovolných bodech geografického povrchu. Digitální model terénu lze charakterizovat také jako matematický (nebo digitální) model, v němž jedna či více matematických funkcí reprezentuje povrch terénu na základě měřených bodových dat – tyto matematické funkce značíme jako funkce interpolační [15]. Sledovaná veličina – např. výška  $z$  – je funkcí polohy. Z pojmu digitální model terénu se vyčleňuje termín digitální elevační model (DEM). Jde o speciální případ DTM, kdy číselné hodnoty představují výšky daných bodů [22]. Výška je funkcí geografické polohy [23]. DEM je základem pro veškeré analýzy topografických charakteristik na povodí. V souvislosti s DTM a DEM je dále zmiňován také termín digitální analýza terénu (DTA), jež zahrnuje veškeré procesy, které kvantitativně popisují terén prostřednictvím DTM či DEM [9].

Prostřednictvím digitální analýzy terénu závisí na DTM mnoho aplikací na bázi geografických informačních systémů (GIS), např. analýzy půdy, intenzity slunečního záření, mapování hloubky podzemní vody či mocnosti sněhové pokrývky a samozřejmě hydrologické modelování [22]. Výsledky těchto aplikací jsou tzv. charakteristiky (atributy) terénu. Mezi primární terénní charakteristiky patří především přímé deriváty nadmožské výšky (sklonitost terénu, křivost, expozice apod.), mezi sekundární řadíme např. albedo.

K reprezentaci povrchu terénu se běžně užívají tři metody: izolinie, trojúhelníková nepravidelná síť (TIN) a nejčastěji využívaná gridová struktura.

Grid představuje maticovou strukturu, která implicitně definuje topologické vztahy mezi datovými body [7]. Pravidelný grid je složen z dvourozměrné matice hodnot výšek v bodech, jejichž vzdálenosti mezi sebou jsou v obou směrech  $x$  a  $y$  konstantní [6]. Kvalita a přesnost takového modelu je silně závislá na hustotě bodů; z hlediska snadné algoritmicizace, příznivé doby trvání výpočtů a snadné implementace pro aplikace environmentálního modelování je však jeho využití výhodné [4] a bylo využito i v této studii.

Kvalita DTM závisí především na dvou faktorech: (1) na kvalitě měřených dat vstupujících do modelu a (2) na použité metodě tvorby DTM z těchto dat [9]. Kvalitu měřených dat lze ovlivnit výběrem metody měření; optimální metoda se volí podle povahy modelu a účelu jeho aplikace [22, 10, 12]. Zatímco pro nejpodrobnější mapování velkých měřtek se využívá laser scan, pro běžné modely terénu postačí tachymetrická měření laserovými teodolity či referenčními GPS s centimetrovou přesností a pro mapování rozsáhlých ploch malých měřtek se využívá stereoskopická fotogrammetrie, satelitní snímky nebo digitalizace vrstevnicových map [12, 9]. Od zvolené metody měření se odvíjí mj. hustota zaznamenaných bodů modelu, na čemž plně závisí další aplikace – např. nízká hustota bodů DTM může vést k nadhodnocení sekundárních terénních charakteristik [24] a podhodnocení gradientu sklonitosti terénu [26, 7]. Další, neméně významný vliv na výsledný model terénu má také prostorová struktura vstupních referenčních bodů [12, 10].

Stejně tak záleží na způsobu tvorby DTM, což je proces predikce hodnot sledované veličiny v predikovaném bodě z hodnot změřených v referenčních (vzorových) bodech situovaných ve specifikovaném okolí predikovaného bodu. Tento proces je označován jako interpolace [6]. Existuje řada interpolačních technik. Klíčová otázka zní, jaká technika podává dostatečně přesné výsledky a zároveň je univerzálně aplikovatelná. Mnoho dosavadních studií se zabývá srovnáváním různých technik a výběrem té optimální. Některé z nich – např. [3, 26] ukazují, že mezi existujícími interpolačními technikami podávají lepší výsledky geostatistické metody (kriging). Totéž dokazuje i studie [25], jež srovnává geostatistické metody s metodami deterministickými (IDW, spline) pro účely odhadu prostorové variability odtokové odezvy. Jiné práce ale dokazují, že naopak deterministické metody poskytují lepší výsledky [19, 20, 21].

Tato studie si klade za cíl stanovení primárních terénních charakteristik a zmapování rozvodnice na experimentálním povodí Modrava 2 využitím vybraných interpolačních technik v prostředí komerčního software ArcGIS 9.2 firmy ESRI.

### Metodika

#### Zájmová lokalita

Zájmová oblast je experimentálním povodím katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování FŽP ČZU v Praze s pracovním názvem Modrava 2. Jde o velmi malé horské povodí potoka Mokruvka (rozloha 17 ha, nadmožská výška 1 188 až 1 330 m n. m.) s uzavřeným profilem s osazenou ostrohrannou přelivnou stěnou typu Thomson, které leží v centrální části NP Šumava, 5 km na jih od obce Modrava. Rozkládá se na severovýchodním svahu Malé Mokruvky (1 330 m n. m.) a severozápadním svahu Mrtvého vrchu (1 254 m n. m.). Provádí se zde nepřetržitý monitoring srážek, průtoků, teploty vzduchu a konduktivity vody. Průtok uzavřeným profilem má průměrné hodnoty kolem 1 l/s, v době tání sněhu obvykle 2 až 3 l/s. Z hydrologického hlediska jde o oblast s nadprůměrné vdatnou srážkovou činností.

Území je budováno moldanubikem silně metamorfovaných hornin, moldanubický pluton místy vystupuje až k povrchu v podobě granitových sutí, které přímo ovlivňují povrchový odtok. Význačnou geologickou lokalitou je nivační mísa v severozápadním svahu Malé Mokruvky, pozůstatek z doby místního zalednění. Vegetační pokryv tvoří převážně travní společenstva (*calamagrostis*, *avenella*, *luzula*), druhy rodu *vaccinium*, druhy z čeledi *polyodiaceae* a mechorosty, ze stromového patra pak převážně shluky mladých smrků vysázených po kúrovcové kalamitě, která zde proběhla v druhé polovině devadesátých let minulého století.

#### Data

Sběr dat byl proveden tachymetrickou metodou prostřednictvím totální stanice Topcon v roce 2007 a 2009. Totální stanice umožňuje docílení špičkové přesnosti naměřených dat, v nejlepším případě až  $10^{-3}$  m [9].

Výsledkem měření je dataset 3 240 bodů nepravidelné prostorové struktury na území 20 ha (obr. 1). Každý bod nese kromě informace o své poloze a nadmožské výšce také údaj o třídě vegetačního pokryvu daného místa (s ohledem na využití při analýze vlivu povahy pokryvu na povrchový odtok). Spon zaměřených bodů se pohybuje nejčastěji v intervalu od 2 do 20 m (s ohledem na morfologickou členitost terénu). Průměrná hustota

bodů činí 160 bodů na 1 ha. Přesnost zaměřené polohy jednotlivých bodů činí řádově mm až jednotky cm – kvalita dat plně dostačuje pro účely modelování terénních charakteristik a povrchového odtoku ve zvoleném měřítku.

Součástí zaměření zájmové lokality bylo vytyčení stálého polygonového pořadu pro účely lokalizace dalších experimentů.

### Interpolace DTM

Aplikovaná interpolace provede transformaci nepravidelného gridu zaměřených bodů do gridu pravidelného, snadno využitelného pro hydrologické aplikace. Předpoklady úspěšné prostorové interpolace jsou: (1) existence dostatečně reprezentativního vzorku měřených dat, (2) teoretické i empirické znalosti o povaze prostorové diferenciace studovaného jevu, (3) vhodné vlastnosti měřené veličiny a vhodný typ dat (např. ordinální grid), (4) znalost podstaty použitelných interpolačních metod a (5) znalost způsobu výběru nejhodnější metody [14]. V případě kvalitních vstupních dat dává většina interpolačních technik podobné výsledky [3].

Vybrány byly čtyři interpolační techniky z portfolia funkcí výpočetního nástroje *Spatial Analyst Tool* programu ArcGIS: IDW, splinové funkce, kriging a metoda přirozeného souseda. Výsledné rastry DTM byly generovány v podobě ortogonální sítě bodů s rozlišením 5 x 5 m.

### IDW

Metoda inverzních vzdáleností (inverse distance weighting) je zástupcem deterministických metod. Je relativně rychlá a snadná z hlediska aplikace i výpočtu, proto se stala alternativou geostatistické metody kriging – zejména u modelů, kde z dostupného vzorku dat nelze sestavit vyhovující variogram [16].

Metoda je založena na předpokladu, že hodnota veličiny v predikovaném bodě je váženým průměrem hodnot okolních měřených bodů; váhy jsou určeny jako inverzní vzdálenost referenčního bodu od bodu interpolovaného. Jde o metodu exaktní, lokální, deterministickou [1]. Odhadovaná hodnota je vypočtena jako lineární kombinace vstupních hodnot: je-li mezi predikovaným a referenčním bodem vzdálenost  $d_i$ , potom platí:

$$\hat{z} = \sum_{i=1}^n d_i^{-r} z_i / \sum_{i=1}^n d_i^{-r} \quad (1),$$

kde  $r$  je parametr metody IDW definovaný uživatelem, který ovlivňuje, v jakém poměru klesá váha referenčního bodu s rostoucí vzdáleností od bodu interpolovaného.

Metoda IDW často produkuje povrch, který je charakteristický koncentrickými strukturami kolem interpolovaných bodů (tzv. bulls eyes) [14], což dokazují i výsledky této studie.

V této studii byla technika IDW testována pro parametr  $r = \{2; 3\}$  a pro lineární kombinace tří až dvaceti měřených referenčních bodů v okolí bodu predikovaného.

### Spline

Spline představuje rovněž exaktní deterministickou metodu interpolace. Jde o sadu polynomů nízkého stupně, které jsou na sebe hladce navázány. Splinové funkce tak tvoří křivky, které po částech prokládají jednotlivé body povrchu a přitom zachovávají podmínku minimální křivosti (analogie přetažení gumové membrány přes body v prostoru) [14]. Funkce interpolované splinem jsou proto značně shlazené a jsou vhodné pro interpolaci jevů, které se mění spojitě, nikoli skokově. Technika splinů umožňuje provést i odhady, jejichž hodnoty se pohybují mimo rozpětí vstupních hodnot a někdy se stává, že splinová funkce produkuje falešná lokální minima a maxima [14].

Mezi spliny užívané pro interpolaci terénu řadíme mj. funkce: regularizované spliny [18, 19, 20, 21] a spliny s tenzí [18, 19, 20, 11, 21].

V prostředí ArcGIS jsou tyto metody interpolace označovány jako radiální bazové funkce. Tyto postupy k interpolaci využívají mj. umělých neuronových sítí za podmínky minimalizování křivosti povrchu [13].

Odhad pomocí splinů je lineární kombinací  $n$  bazových funkcí stanovených pro každý z měřených referenčních bodů a obecná rovnice pro odhad výšky v predikovaném bodě má tvar:

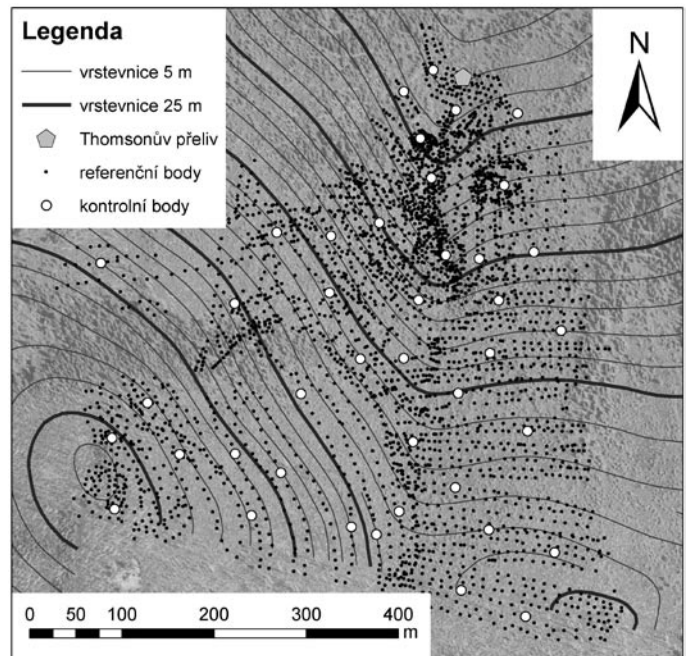
$$\hat{z} = \sum_{i=1}^n k_i \phi(r_i) + k_{n+1} \quad (2),$$

kde  $\phi(r_i)$  je radiální bazová funkce s argumentem  $r$ , jehož podoba závisí na typu splinu a jehož hodnoty lze v ArcGIS ovlivňovat zadáním parametru  $w$ ;  $k_i$  jsou váhy, které přiřazují každé bazové funkci relativní důležitost.

V této studii byl testován regularizovaný spline a spline s tenzí pro lineární kombinace pěti až třiceti referenčních bodů a pro parametr  $w = \{0; 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2; 5\}$  v případě regularizovaného splinu a  $w = \{0; 0,1; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100\}$  v případě splinu s tenzí.

### Kriging

Jde o metodu geostatistickou. Obecným konceptem této metody je prostorová závislost – autokorelace jevů. Prostorová korelovanost veličiny je charakterizována teoretickým semivariogramem, který se odvodí proložením



**Obr. 1.** Zaměřené území experimentálního povodí Modrava 2; vrstevnice převzaty z podkladů ZABAGED

empiricky sestaveného semivariogramu matematickou funkcí vybranou na základě naměřených dat a předpokladů o chování sledované veličiny  $z(x)$ .

Obecná rovnice krigingu pro nestranný lineární regresní odhad hodnoty v predikovaném bodě  $x$  je [8]:

$$\hat{z}(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) [z(x_i) - m(x_i)] \quad (3),$$

kde  $z(x)$  jsou změřené výšky v referenčních bodech  $x$ ,  $w_i$  představují váhy a  $m(x)$ , resp.  $m(x_i)$  jsou předpokládané hodnoty náhodné veličiny  $z(x)$ , resp.  $z(x) - m(x)$  – trend. Predikovaná hodnota je získána minimalizací rozptylu chyby odhadu, a to za předpokladu stacionarity modelu (pravděpodobnostní struktura modelu je nezávislá na posunutí).

V této studii byla testována technika ordinárního krigingu s pěti typy teoretických semivariogramů (lineární, kruhový, sférický, exponenciální a gaussovský) pro lineární kombinace pěti až třiceti referenčních bodů.

### Metoda přirozeného souseda

Nejjednodušší interpolační technika, kterou ArcGIS poskytuje bez možnosti ovlivnění parametrů, využívá k predikci neznámé hodnoty pouze nejbližší sousední referenční body. Jde tedy o lokální deterministickou metodu rychlé interpolace.

### Přesnost interpolace

Úspěšnost vstupních parametrů interpolačních technik využitých pro generování DTM byla testována ve vybraných bodech pomocí odchylky RMSE (root mean square error). Z naměřených dat byl nejprve náhodným výběrem vybrán vzorek 41 kontrolních bodů, které se neúčastnily procesu interpolace. Na nich bylo provedeno porovnání skutečné (měřené) nadmořské výšky s hodnotou, kterou pro dané místo predikovala užitá interpolační technika, a to podle vztahu:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{z} - z)^2} \quad (4).$$

### Odvození terénních charakteristik

Postup od vygenerovaného DTM k vyhodnoceným terénním charakteristikám zahrnuje v ArcGIS aplikaci níže uvedených algoritmů, které jsou rovněž součástí výpočetního nástroje *Spatial Analyst Tool*.

Nejprve je aplikován algoritmus pro vyplnění bezodtokých prohlubní, které by jinak činily problémy při vyhodnocování směrů povrchového odtoku.

Následně je aplikován odtokový algoritmus. ArcGIS nabízí algoritmus D8, který je představen ve studii [23]. Jde o nejjednodušší způsob distribuce povrchového odtoku z bodu, proto je tato metoda velmi užívaná. Každá buňka gridu DTM generuje odtok právě do jedné z osmi sousedních buněk ve směru největšího spádu. Vyžaduje pravidelný grid DTM. Velkou výhodou tohoto algoritmu je jednoduchá implementace a nízká výpočtová složitost. Nedostatkem je (1) diskretizace směrů toku do osmi možných, (2) absence divergence toků, což vede k paralelizaci toků (několik toků vedle sebe bez vzájemných interakcí), (3) podhodnocování odvodňovaných ploch – parametru, který využívá TOPMODEL [2]. Protože toky nemohou divergovat, každý



tok je reprezentován pouze jednou linií tvořenou na sebe navazujícími buňkami – jde proto o 1D reprezentaci toků [22, 5]. Vylepšením algoritmu D8 je algoritmus Rho8 popsán ve studii [7].

Vedlejším produktem odtokového algoritmu je v ArcGIS rastr sklonitosti terénu a jeho expozice (aspektu).

Na základě vyhodnocených směrů odtoku je následně aplikován algoritmus pro vyhodnocení akumulace povrchového odtoku, jehož výsledkem je síť preferenčních cest povrchového odtoku.

Po definování polohy uzavěrového profilu je aplikován poslední algoritmus pro určení rozvodnice, který vychází z předešlé analýzy akumulace povrchového odtoku.

## Výsledky

### Přesnost modelu

Grafy na obr. 2 specifikují hodnoty RMSE vyhodnocené pro jednotlivé interpolační techniky a jejich parametry (počet referenčních bodů použitých při interpolaci predikované hodnoty a argument interpolace). Pro každý druh interpolační techniky byl vybrán model terénu, jenž vykazoval nejnižší hodnotu RMSE. Na takto vybraných DTM byly následně aplikovány hydrologické algoritmy popsané v sekci *odvození terénních charakteristik*.

Zcela nejnižší hodnoty RMSE (0,39 m) dosáhla interpolace splinovou regularizovanou funkcí pro parametr  $w = 0,8$  a 10 referenčních bodů. Je však patrné, že druhá splinová technika (RMSE > 0,42 m) a kriging (RMSE > 0,45 m) podávají poměrně srovnatelné výsledky, stejně tak i metoda přirozeného souseda (RMSE = 0,46 m). Metoda IDW vykazuje prokazatelně horší výsledky (RMSE > 0,63 m).

K největším vertikálním chybám dochází zejména (1) v místech s řidším pokrytím referenčními body – východní svah Malé Mokrůvky; (2) v místech, kde dochází k terénním zlomům – např. linie břehových svahů potoka Mokrůvka a lokalita nivační mísy zařídlé pod úroveň okolního terénu.

### Sklonitost a expozice terénu, akumulace povrchového odtoku

Sklonitost terénu je zobrazena na obr. 3. Je patrné, že model terénu generovaný metodou IDW se do značné míry liší od zbylých, které spojuje vzájemná podobnost. Je to dáno povahou techniky IDW, takto vygenerovaný povrch terénu je nehomogenizovaný (extrémní gradienty sklonu svahu, nerealistické střídání nízkých a vysokých gradientů).

Modely terénu generované splinovými funkcemi či krigingem jsou naproti tomu homogenizovanější, a tedy i vyhlazenější, což dokazuje úbytek extrémních hodnot a nižší gradienty sklonitosti. Modely interpolované krigingem podle různých teoretických semivariogramů podávají téměř totožné výsledky. Vzájemné rozdíly mezi oběma typy splinových funkcí jsou rovněž srovnatelné.

Průměrná sklonitost vyhodnocená z dosavadních interpolací činí 21 %.

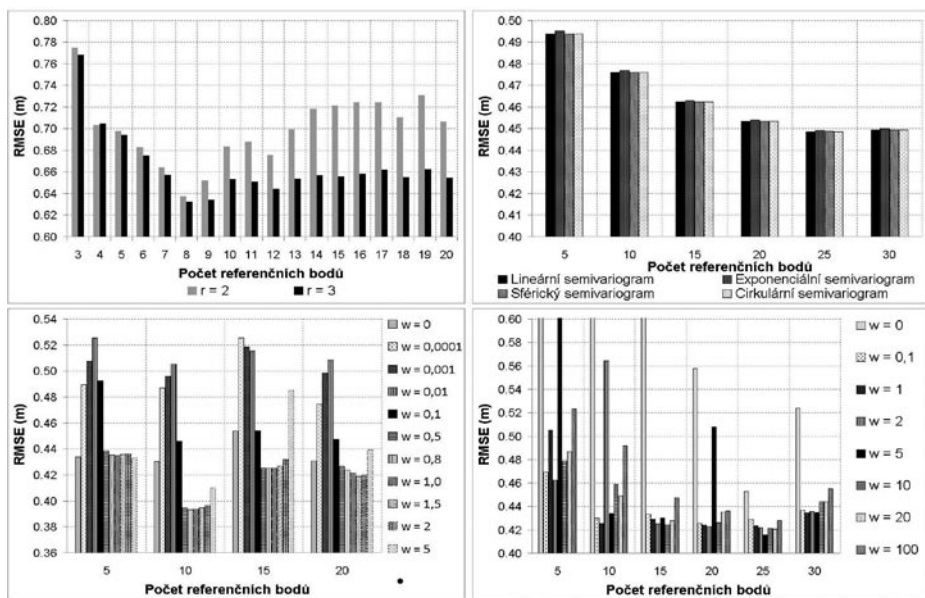
Expozice terénu je rozdělena do osmi tříd – což vyplývá z aplikovaného odtokového algoritmu D8, kde každá třída charakterizuje jeden ze čtyř kardinálních nebo čtyř diagonálních směrů. Expozice terénu zároveň vyjadřuje směr povrchového odtoku.

Výsledky expozice terénu (obr. 4) zcela korespondují s tím, co bylo popsáno u sklonitosti. Při srovnání modelů se ukazuje nehomogenita terénu modelovaného technikou IDW, která je nejvíce v kontrastu s modelem generovaným metodou přirozeného souseda.

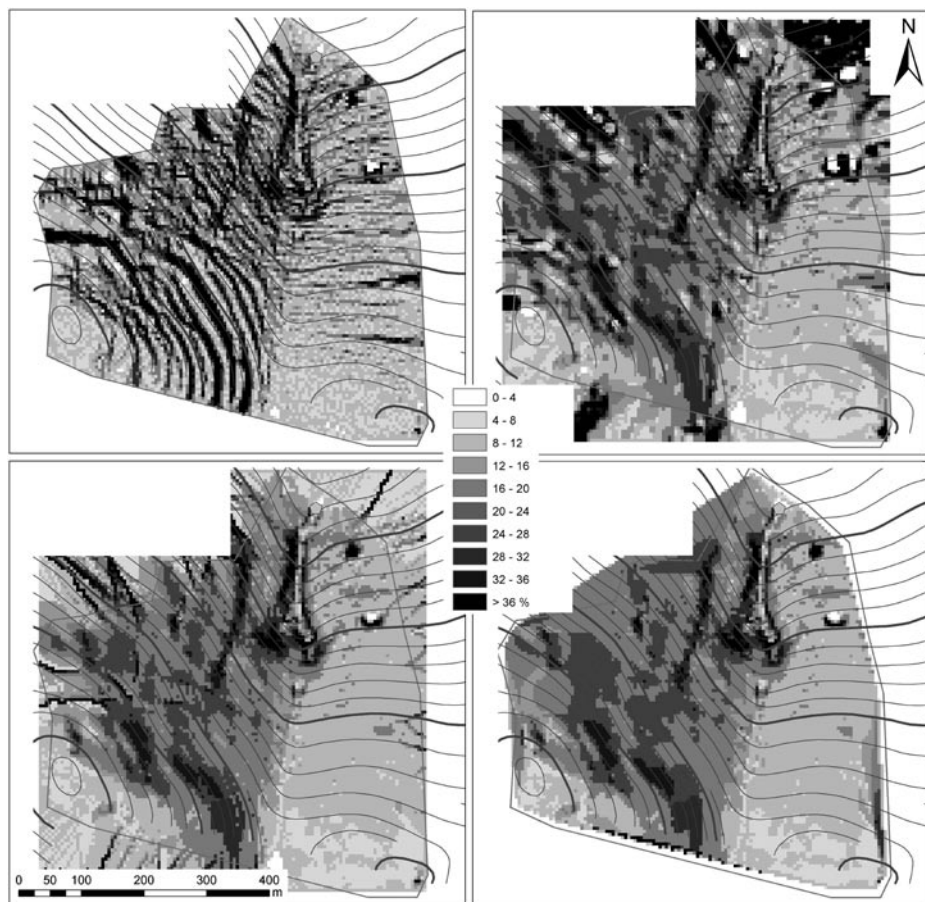
Algoritmus pro vyhodnocení akumulace povrchového odtoku vybere oblasti, do kterých je podle odtokového algoritmu sveden povrchový odtok. Algoritmus je tedy schopen nalézt linii údolnice. Výsledky všech použitých interpolačních technik se ve vedení hlavní linie údolnice shodují (obr. 5).

### Rozvodnice

Na obr. 6 je vidět konečný produkt studie – rozvodnici, jejímž určením musely předcházet všechny uvedené postupy a výstupy. Modely rozvodnice vytvořené na základě interpolace DTM splinovými funkcemi a krigingem poukazují na přesah rozvodnice za okraj zaměřeného území na jižní straně povodí (státní hranice se Spolkovou republikou Německo), díky rekognos-



Obr. 2. Vyhodnocení chyby RMSE pro DTM generované interpolačními technikami IDW (vlevo nahoře), kriging (vpravo nahoře), regularizovaný spline (vlevo dole), spline s tenzí (vpravo dole)



Obr. 3. Sklonitost terénu pro DTM generované interpolačními technikami IDW (vlevo nahoře), regularizovaný spline (vpravo nahoře), kriging (vlevo dole), přirozený soused (vpravo dole)

kaci území však víme, že jde v tomto případě pouze o tzv. okrajový efekt interpolačních technik.

## Diskuse

Výsledky studie ukazují, že kromě modelů terénu a modelů primárních terénních charakteristik založených na interpolační technice IDW se jednotlivé modely vzájemně výrazně neliší.

Nejnižší hodnoty RMSE poskytly splinové funkce. Domníváme se, že je to proto, že spline generuje povrch o minimální křivosti, což odpovídá povaze terénu na zájmovém povodí – kromě nivační mísy, která připomíná menší rokli, není terén příliš rozbrzděný, gradient svažitosti vykazuje celkovou homogenitu.

Kriging rovněž podal dobře validované výsledky. Rozdíly mezi technikami krigování založenými na odlišných teoretických semivariogramech nejsou téměř pozorovatelné.

Verifikaci úspěšně prošla a realistické výsledky podala také metoda přirozeného souseda, jež poskytla výsledky srovnatelné se splinovými funkcemi a technikami krígingu. Tato interpolační metoda bere pro odhad hodnoty v predikovaném bodě pouze referenční body z nejbližšího okolí a její povaha navíc odpovídá lokální deterministické metodě IDW; proto nebyla její úspěšnost očekávána.

Horší výsledky interpolační techniky IDW jsou způsobeny povahou této deterministické metody odhadu ve spojení s nehomogenní hustotou zaměřených bodů. K největším extrémním hodnotám sklonitosti zde totiž docházelo především ve svahu Malé Mokrůvky (oblast odpovídající třetímu kvadrantu zájmového území), kde je hustota bodů nejnižší a hodnoty RMSE v této oblasti dosahují nejvyšších hodnot (řádově metry). Efekt bulls eyes je nejcitelnější právě zde.

To je způsobeno faktem, že výsledek procesu interpolace je mimo použité interpolační techniky přímo závislý také na hustotě a prostorové struktuře vstupních referenčních bodů [10]. A naopak, výběr interpolační metody částečně závisí na povaze interpolovaného terénu [12]. To potvrdila i tato studie. Na hustotu a rozmístění referenčních bodů se ukázala být citlivá především interpolační technika IDW, ostatní použité metody méně. Pro rovinné a pozvolně se měnící povrchy terénu je výhodné použít splinové funkce, které svou matematickou povahou tomuto typu morfologie terénu odpovídají nejvíce.

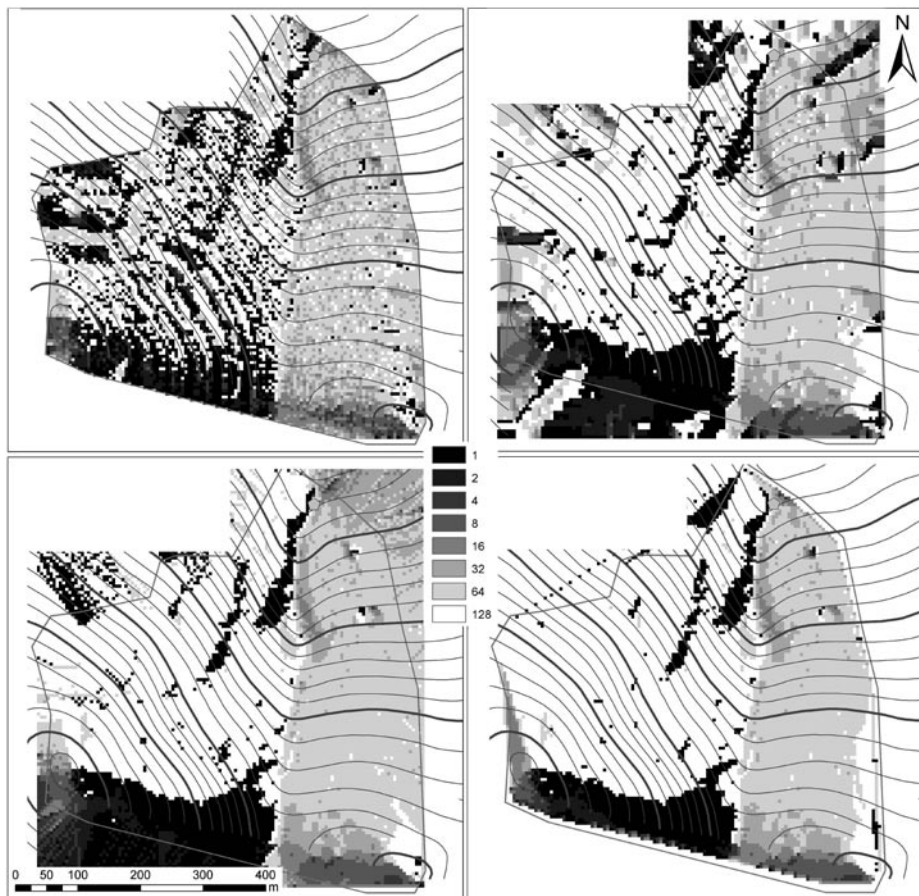
Ve všech případech interpolace DTM však došlo k největším vertikálním odchýlkám (1) v místech, kde byla nízká hustota pokrytí terénu referenčními body, (2) v místech, kde byla zaznamenána nehomogenita v prostorovém rozložení referenčních bodů – např. ostré přechody mezi oblastmi s vysokou hustotou referenčních bodů a oblastmi s hustotou, která je nedostatečná (v případě měření totální stanicí šlo o důsledek vegetace znemožňující přístup laserového paprsku k odraznému hranolu), (3) v místech s větší členitostí terénu – v těchto případech dochází k nadhodnocování nadmořské výšky v terénních prohlubních a podhodnocování v jejich bezprostředním okolí. Splinové funkce mají navíc tendenci vyhladit ostré terénní zlomy.

Důležité je proto zvolit vhodnou strategii mapování povrchu terénu. Při měření výšky referenčních bodů totální stanicí se pro účely hydrologického modelování povrchového odtoku osvědčilo postupovat systematicky v přibližně pravidelném ortogonálním gridu s intervalem deseti metrů mezi jednotlivými body v oblastech s homogenní morfologií terénu a s větší hustotou pak v morfologicky členitých lokalitách. Z důvodu velmi špatné dostupnosti některých míst vlivem vegetace nebylo možné tuto zásadu dodržet po celé ploše povodí, což vedlo v inkriminovaných lokalitách k chybám v interpolovaných DTM, a tedy i v terénních charakteristikách z DTM odvozených.

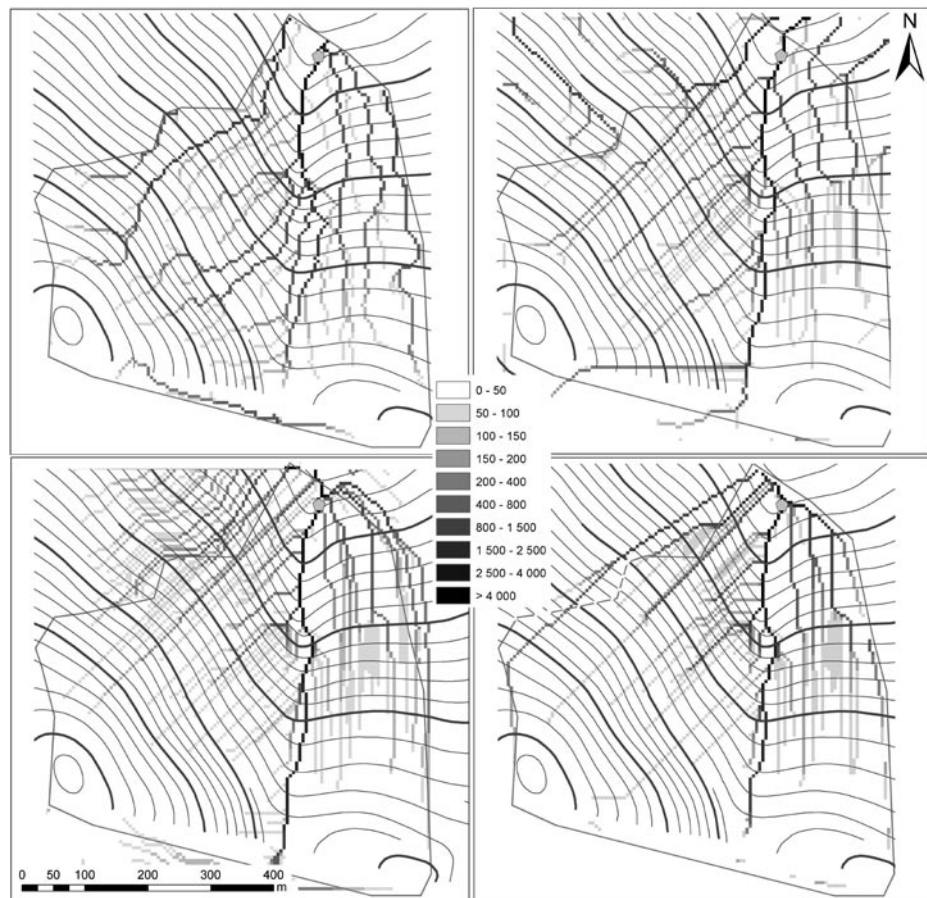
Výsledné modely rozvodnic povodí Modrava 2 se ve většině shodují, vyjma již zmíněného jižního okraje zájmového území, kde lze považovat vystoupení rozvodnice mimo zaměřené území zcela jistě za důsledek vlivu okrajového efektu použitých interpolačních technik.

## Závěr

Studie prezentuje obecný a jednoduchý postup určení primárních terénních charakteristik a vymezení rozvodnice na experimentálním povodí Modrava 2. Tento postup lze aplikovat na jakoukoli oblast pokrytou bodovým měřením topografie terénu. Závěry z procesu interpolace digitálního modelu terénu a odvození charakteristik terénu lze shrnout do následujících bodů:



Obr. 4. Expozice terénu pro DTM generované interpolačními technikami IDW (vlevo nahoře), regularizovaný spline (vpravo nahoře), kríging (vlevo dole), přirozený soused (vpravo dole)



Obr. 5. Akumulace povrchového odtoku z povodí pro DTM generované interpolačními technikami IDW (vlevo nahoře), regularizovaný spline (vpravo nahoře), kríging (vlevo dole), přirozený soused (vpravo dole)

- (1) model vykazující nejnižší chybu RMSE byl vygenerován technikou regularizovaného splinu, následuje spline s tenzí, kriging a metoda přirozeného souseda,
- (2) největší chybu RMSE vykazují modely vygenerované interpolační technikou IDW,
- (3) vliv na výsledné modely terénu a z nich odvozené terénní charakteristiky má kromě interpolační techniky také prostorová struktura vstupních referenčních bodů ve vztahu k morfologii terénu; vhodný je pravidelný ortogonální grid s dostatečnou hustotou bodů, která je závislá na členitosti terénu,
- (4) při zaměřování terénu v morfologicky členitějších lokalitách je třeba navýšit hustotu referenčních bodů oproti normálu, avšak v rámci celého měřeného území je pro potřeby interpolace DTM vhodné zachovávat řádově stejnou hustotu referenčních bodů,
- (5) použité splinové funkce, kriging a metoda přirozeného souseda poskytují srovnatelné výsledky primárních terénních charakteristik, zásadně se odlišují pouze výsledky získané metodou IDW,
- (6) splinové funkce se ukázaly jako velmi vhodné pro takové typy terénu, u nichž převažuje homogenní ráz jejich morfologie a terén se tedy mění spojitě,
- (7) metoda IDW vykazuje poměrně velkou citlivost na prostorové uspořádání referenčních bodů a v členitém terénu v kombinaci s rostoucí hodnotou parametru  $r$  navíc roste pravděpodobnost výskytu nežádoucího efektu *bull's eyes*,
- (8) linie rozvodnic odvozených na modelech terénu generovaných odlišnými interpolačními technikami mají srovnatelné průběhy – výjma oblasti jižního okraje povodí, kde se v případě splinů a krigingu projevuje okrajový efekt.

Ani teď si nemůžeme být jisti, že známe přesnou polohu rozvodnice experimentálního povodí, avšak čím více modelů vytvoříme, tím více je minimalizována možná chyba modelu.

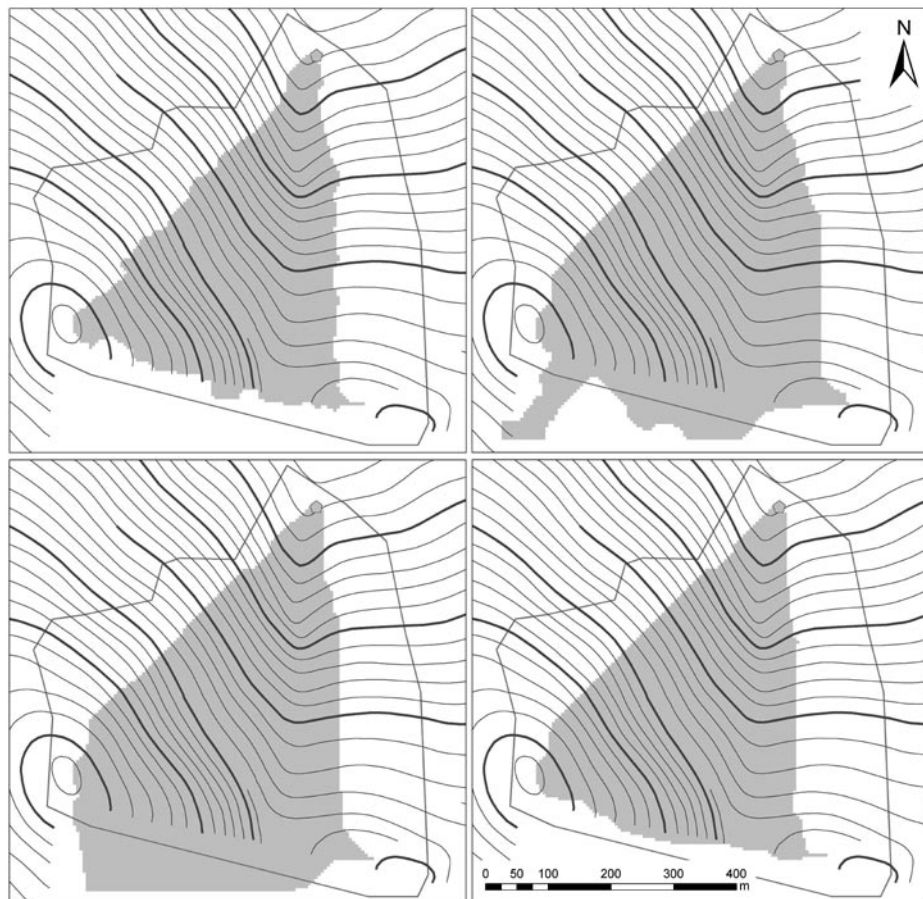
Dále je plánováno tento postup aplikovat:

- (1) na jiném povodí,
  - (2) v jiném měřítku,
  - (3) s odlišnou hustotou vstupních referenčních bodů, z nichž je digitální model terénu interpolován,
- a následně analyzovat:
- (4) vliv hustoty referenčních bodů vstupujících do interpolace DTM na kvalitu výsledného modelu,
  - (5) vliv výsledného rozlišení DTM na jeho kvalitu – s ohledem na účel využití generovaného modelu.

Děkují všem členům měřického týmu, který se podílel na zaměření terénu experimentálního povodí Modrava 2, a katedře biotechnických úprav krajiny Fakulty životního prostředí ČZU v Praze za laskavé zapůjčení totální stanice.

## Literatura

- [1] Bartier, PM. and Keller, CP. (1996) Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). *Computers & Geosciences*, 22 (7), 795–799.
- [2] Beven, KJ. (1997) Topmodel: A Critique. *Hydrological Processes*, 11, 1069–1085.
- [3] Burrough, P. and McDonnell, R. (1998) Principles of Geographical Information Systems. New York (USA) : Oxford Univ. Press, 336 p., ISBN 0-19-823365-5.
- [4] Collins, SH. and Moon, GC. (1981) Algorithms for dense digital terrain models. *Photogram. Engineering and Remote Sensing*, 47, 71–76.
- [5] CostaCabral, MC. and Burges, SJ. (1994) Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30 (6), 1681–1692.
- [6] El-Sheimy, N., Valeo, C., and Habib, A. (2005) Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and application. Artech House remote sensing library. Norwood : Artech House. ISBN 1-58053-921-1.
- [7] Fairfield, J. and Leymarie, P. (1991) Drainage network from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27 (5), 709–717.
- [8] Goovaerts, P. (1997) Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics. New York (USA) : Oxford University Press. ISBN 978-0-19-511538-3.
- [9] Hengl, T., Gruber, S., and Shrestha, DP. (2003) Digital terrain analysis in ILWIS: lecture notes and user guide. Department of Earth Systems Analysis, Internat. Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), Enschede, Netherlands.



**Obr. 6.** Modely rozvodnice pro DTM generované interpolačními technikami IDW (vlevo nahoře), regularizovaný spline (vpravo nahoře), kriging (vlevo dole), přirozený soused (vpravo dole)

- [10] Heritage, GL., Milan, DJ., Large, ARL., and Fuller, IC. (2009) Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology*, 112, 334–344.
- [11] Hofierka, J., Parajka, J., Mitášová, H., and Mitáš, L. (2002) Multivariate interpolation using regularized spline with tension. *Transactions in GIS*, 6 (2), 135–150.
- [12] Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédou, S., Silvera, N., and Phachomphon, K. (2006) Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77, 126–141.
- [13] Ježek, J. (2002) Výuka statistiky pro nestatistiky: Využití programu MATLAB při výuce geostatistiky. UK AMVT, PŘF UK. Praha : Matfyzpress, s. 48–56.
- [14] Ježek, J. et al. (2008) Geostatistika: metody prostorových interpolací, Kriging. UAMVT, PŘF UK Praha, učební texty, nepublikováno.
- [15] Li, Z., Zhu, Q., and Gold, C. (2005) Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. Boca Raton (USA) : CRC Press. ISBN: 0-415-32462-9.
- [16] Lu, GY. and Wong, DW. (2008) An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, 34, 1044–1055.
- [17] Miller, C. and LaFlamme, RA. (1958) The digital terrain modeling – theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24 (3), 433–442.
- [18] Mitáš, L. and Mitášová, H. (1988) General variational approach to the interpolation problem. *Comput. Math. Applic.* 16 (12), 983–992.
- [19] Mitášová, H. and Hofierka, J. (1993) Interpolation by regularized spline with tension I. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25 (6), 641–655.
- [20] Mitášová, H. and Mitáš, L. (1993) Interpolation by regularized spline with tension. I. Theory and implementation. *Mathematical Geology*, 25 (6), 657–669.
- [21] Mitášová, H., Mitáš, L., and Harmon, RS. (2005) Simultaneous spline approximation and topographic analysis for LIDAR elevation data in open source gis. *Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- [22] Moore, ID., Grayson, RB., and Ladson, AR. (1991) Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and ecological applications. *Hydrological Processes*, 5, 3–30.
- [23] O'Callaghan, JF. and Mark, DM. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 323–344.
- [24] Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5, 59–79.
- [25] Sarangi, A., Madramootoo, CA., and Enright, P. (2006) Comparison of spatial variability techniques for runoff estimation from a Canadian watershed. *Biosystems Engineering*, 95 (2), 295–308.

Ing. Petr Bašta  
KVHEM FŽP ČZU  
bastap@fzp.czu.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

Watershed and Primary Terrain Characteristics Modelling of the Experimental Modrava 2 river basin (Bašta, P.)

#### Keywords

digital terrain model – interpolation – inverse distance weighting – spline – ordinary kriging – flow direction algorithm – primary terrain characteristics – watershed

The study describes a digital terrain model (DTM) creation via four interpolation methods, the success analysis of these methods, the primary terrain characteristics estimation, and the watershed delineation of the small mountain basin Modrava 2 using ESRI software product ArcGIS 9.2. The basin is located in the central part of the Bohemian

Forest. Its area is only 17 ha, the average altitude is 1260 m above sea level and the local relief is not too bumpy. The data collection took place between 2007 and 2009, resulting in a dataset of more than 3100 irregularly spaced reference points with a recorded height. Regular grids, representing a terrain model, were generated using four interpolation methods: inverse distance weighting (IDW), spline functions (regularized spline and spline with tension), ordinary kriging (using five types of theoretical semivariograms) and natural neighbor. Each method was applied with various combinations of available parameters affecting the interpolated terrain model. DTM was generated in the form of a regular grid with a resolution of 5 m. The verification of predicted DTM was carried out by comparing the predicted values with measured values (in a sample of points that were not involved in the interpolation process) and the model with the lowest error RMSE was chosen for each interpolation method. Selected hydrological algorithms were applied to these models, resulting in maps of slope, flow directions and aspect, contributing areas, and finally, watersheds. Results showed that all the interpolation methods provide comparable results. It was shown that in case of high-quality input data similar results are provided by most interpolation methods. Rated according to RMSE values, the most successful method was regularized spline (RMSE = 0.39 m). Watersheds differ only in detail, and the final watershed line can be obtained by their composition.

## ŘEŠENÍ NEUSTÁLENÉHO PROUDĚNÍ VODY V NASYČENÉ PŮDNÍ ZÓNĚ POMOCÍ SEPARACE ČASOVÝCH A PROSTOROVÝCH PROMĚNNÝCH

Jiří Pavlásek

#### Klíčová slova

drenáž – hladina podzemní vody – faktor tvaru hladiny

#### Souhrn

V článku jsou prezentovány možné úpravy rovnic pro neustálené proudění vody v nasyceném půdním prostředí odvozené pro Darcyovské proudění na horizontální nepropustné rovině za předpokladu platnosti Dupuitových postulátů. Úprava rovnic je provedena pro proudění mezi dvěma odvodňovacími příkopy se shodnou úrovní hladiny v izotropním homogenním prostředí. Základem řešení je separace časových a prostorových proměnných, při které se předpokládá konstantní tvar depresní křivky podzemní vody při zadané maximální výšce hladiny v polovině vzdálenosti mezi odvodňovacími příkopy. Pokles hladiny podzemní vody a výpočet odtoku z drenážní soustavy pomocí odvozených rovnic je porovnán s rovnicemi odvozenými pro situace, kdy drény leží na nepropustném podloží, i pro situace, kdy je nepropustné podloží pod úrovní drénů.

#### Úvod

Pro řešení proudění podzemní vody jsou často používány diferenciální rovnice získané kombinací Darcyho zákona a rovnice kontinuity. Rovnice pro neustálené proudění podzemní vody na horizontálním nepropustném podloží se nazývá Boussinesqova rovnice a lze ji psát ve tvaru:

$$K_x \frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + K_y \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial}{\partial z} \left( h \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1).$$

Při úpravách těchto rovnic jsou využívány Dupuitovy postuláty, které vycházejí z předpokladu, že sklon hladiny podzemní vody je velice malý a proudnice jsou téměř rovnoběžné s horizontálním nepropustným podložím (Koopmans, 2000). Rovnice upravené pro řešení proudění podzemní vody na základě Dupuitových postulátů jsou využívány pro navrhování drenážních soustav, rozchodu drénů nebo odvodňovacích příkopů.

Aplikace rovnic pro neustálené proudění vody byly původně odvozeny pro půdy, kde nepropustná vrstva leží hluboko pod úrovní drénů a lze zanedbat změny hladiny podzemní vody vzhledem k mocnosti nasycené zóny. Do vzorců se dosazuje pouze střední výška hladiny nebo výška drénů nad nepropustným podložím. Jednoduchý vztah pro výpočet poklesu hladiny podzemní vody mezi drény pro půdy, kde nepropustná vrstva leží hluboko pod úrovní drénů, odvodil Dumm (1960) ve tvaru:

$$H_t = 1,16 H_0 e^{-\alpha t} \quad (2),$$

kde  $H_t$  je maximální výška hladiny mezi drény, která je funkcí času,  $H_0$  – počáteční výška hladiny mezi drény,  $t$  – čas od počátku drenáže (konce srážkové události nebo zavlažování) a  $\alpha$  – reakční faktor:

$$\alpha = \frac{\pi^2 K d}{\mu L^2} \quad (3),$$

kde  $K$  je nasycená hydraulická vodivost,  $d$  – ekvivalentní hloubka půdy pod úrovní drénů,  $\mu$  – aktivní pórovitost a  $L$  – vzdálenost nebo rozchod drénů.

De Zeeuw a Hellinga (1958) uvádějí jednoduchý vzorec pro výpočet fluktuace maximální výšky hladiny mezi drény pro konstantní hodnotu přítoku na hladinu  $R$  v daném intervalu, ve tvaru:

$$H_t = H_{t-1} e^{-\alpha \Delta t} + \frac{R}{0,8 \mu \alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (4).$$

Tento vzorec byl odvozen opět pro půdy, kde je výška hladiny nad drény velice malá v porovnání k hloubce nepropustného podloží pod úrovní drénů.

Při odvození vztahů pro půdy, kdy leží recipient na nepropustném podloží, je nutné vzít v úvahu fluktuaci hladiny. Glover (1973) odvodil vzorec poklesu hladiny pro případ, kdy drény leží na nepropustné vrstvě, ve tvaru:

$$H_t = \frac{H_0 \mu L^2}{4,46 K H_0 t + \mu L^2} \quad (5).$$

Guyon (1980) použil pro řešení předpoklad, který nastínil Boussinesq, že tvar depresní křivky pro horizontální proudění je konstantní, a lze tedy provést separaci proměnných ve tvaru:

$$h(x, t) = H(t) W(X) \quad (6),$$

kde  $h$  je výška hladiny podzemní vody v bodě  $x$ ,  $H$  – maximální výška hladiny podzemní vody,  $W$  – bezrozměrná funkce tvaru hladiny,  $X$  – bezrozměrná osa  $x$  ( $X = x/L$ ).

Tento předpoklad dále využili Lesaffre a Zimmer (1988) při sestavování modelu SIDRA, který použili pro modelování fluktuace hladiny podzemní vody a změny odtoku z drenážní soustavy na půdách, kde drény leží na nepropustném podloží. Vzhledem k symetrii půdního prostředí mezi dvěma paralelními drény řeší model pouze jeho polovinu. Předpokladem pro odvození rovnic bylo uložení drénů v úrovni nepropustného podloží. Úpravou rovnic (1) získali rovnici pro výpočet fluktuace maximální výšky hladiny podzemní vody ve tvaru:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{R(t) - K \left[ \frac{H^2}{(L/2)^2} \right]}{\mu C} \quad (7),$$

kde  $C$  je druhý faktor tvaru hladiny, a dále rovnicí pro průtok na jednotku plochy hydraulického systému ve tvaru:

$$Q(t) = \frac{B}{C} K \frac{H^2}{(L/2)^2} + \left( 1 - \frac{B}{C} \right) R(t) \quad (8),$$

kde  $Q$  je průtok na jednotku plochy hydraulického systému a  $B$  – první faktor tvaru hladiny.

Hodnoty faktorů tvaru hladiny odvozené Guyonem (1980) jsou  $B = 7/9$  a  $C = 8/9$ . Hartani, Zimmer a Lesaffre (2001) uvádějí hodnoty faktorů odvozených na základě integrace vypočtených hodnot hladiny podzemní vody jako  $B = 0,7853$  a  $C = 0,9041$ .

V tomto článku je představena možná úprava Boussinesqovy rovnice (1) pomocí separace časových a prostorových proměnných pro odvození

zvodnělého prostředí ležícího na horizontální nepropustné vrstvě pomocí odvodňovacího příkopu nebo vodního toku, kde výška hladiny v odvodňovacím příkopu není shodná s úrovní nepropustného podloží.

### Odvození rovnic pro proudění mezi příkopy

Výše uvedené vzorce byly odvozeny pro případy proudění mezi drény. Vzorce (7) a (8) byly odvozeny pro případ, kdy drény leží na nepropustné vrstvě a funkce tvaru hladiny  $W(X)$  z rovnice (6) je konstantní.

Pokud je ale odvodnění prováděno pomocí odvodňovacích příkopů nebo se na konci nasycené zóny nachází vodní tok s určitou výškou hladiny nad nepropustným podložím, nelze funkci tvaru hladiny  $W(X)$  pokládat za konstantní. Při odvození vztahů pro neustálené proudění na horizontální nepropustné rovině v hydraulickém systému, znázorněném na obr. 1, byly předpokládány tyto charakteristiky hydraulického systému:

1) Hydraulický potenciál  $\varphi$  je konstantní v rovině kolmé na nepropustné podloží a je závislý pouze na výšce hladiny podzemní vody (platí Dupuitovy postuláty):

$$\varphi(x, z, t) = h(x, t) \quad (9).$$

2) Tvar depresní křivky podzemní vody je konstantní pro definovanou maximální výšku hladiny podzemní vody. Lze tedy provést následující separaci proměnných:

$$h(x, t) = H(t)W(X, H) \quad (10),$$

kde  $h$  je výška hladiny v bodě  $x$  v čase  $t$ ,  $H$  – maximální výška hladiny v  $x = 0$  v čase  $t$ ,  $W$  – bezrozměrná funkce tvaru hladiny,  $X$  – bezrozměrná osa  $x$  ( $X = x/S$ ).

3) Půdní materiál je homogenní.

Rovnici kontinuity pro průtok na jednotku šířky drenážního systému  $q_x$  můžeme napsat ve tvaru:

$$\frac{\partial q_x(x, t)}{\partial x} = R(t) - \mu \frac{\partial h(x, t)}{\partial t} \quad (11).$$

Rovnici kontinuity (11) můžeme upravit – za předpokladu 2, že lze provést separaci proměnných (10), na následující tvar:

$$dq_x(x) = R(t)dx - \mu \frac{dH(t)}{dt} S \left[ W(X, H) + H(t) \frac{dW(X, H)}{dH} \right] dX \quad (12),$$

kde  $q$  je specifický průtok,  $R$  – přítok na hladinu,  $\mu$  – aktivní pórovitost,  $H$  – maximální výška hladiny v  $x = 0$ ,  $S$  – délka systému nebo polovina vzdálenosti mezi příkopy při symetrické drenážní soustavě,  $W$  – bezrozměrná funkce tvaru hladiny,  $X$  – bezrozměrná osa  $x$  ( $X = x/L$ ).

Při integraci rovnice (12) od  $x = 0$  do  $x = x_1$  získáme tvar:

$$q_x(x_1) = R(t)x_1 - \mu \frac{dH(t)}{dt} S \int_0^{x_1} \left[ W(X, H) + H(t) \frac{dW(X, H)}{dH} \right] dX \quad (13).$$

Úpravou této rovnice pro podmínku  $x_1 = S$  získáme rovnici pro průtok na jednotku plochy hydraulického systému, kterou můžeme psát:

$$Q(t) = R(t) - \mu \frac{dH(t)}{dt} B(H) \quad (14),$$

kde  $Q$  je průtok na jednotku plochy  $Q = q_x/S$  a  $B(H)$  – první faktor tvaru hladiny:

$$B(H) = \int_0^1 \left[ W(X, H) + H(t) \frac{dW(X, H)}{dH} \right] dX \quad (15).$$

Druhou integrací rovnice kontinuity – integrací rovnice (13) od  $x = 0$  do  $x = S$  získáme tuto rovnici:

$$\int_0^S q_x(x) dx = R(t) \frac{S^2}{2} - \mu \frac{dH(t)}{dt} \frac{S^2}{2} C(H) \quad (16),$$

kde  $C(H)$  je druhý faktor tvaru hladiny:

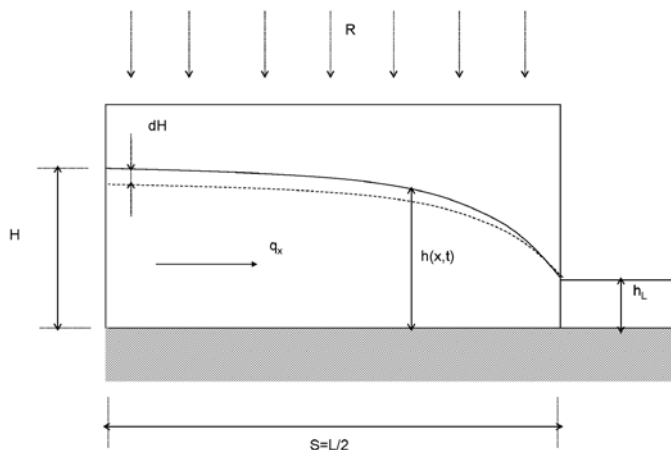
$$C(H) = 2 \int_0^1 (1-X) \left[ W(X, H) + H(t) \frac{dW(X, H)}{dH} \right] dX \quad (17).$$

Rovnici pro specifický průtok na jednotku šířky drenážního systému lze – za předpokladu 1 rovnice (9), že hydraulický potenciál  $\varphi$  je konstantní v rovině kolmé na nepropustné podloží a je závislý pouze na výšce hladiny podzemní vody, upravit na tvar:

$$q_x(x) = -Kh \frac{dh}{dx} \quad (18).$$

Integrací rovnice (18) od  $x = 0$  do  $x = S$  dostaneme vztah:

$$\int_0^S q_x(x) dx = - \int_H^{h_L} Kh dh \quad (19).$$



Obr. 1. Hydraulický systém pro odvození rovnic neustáleného proudění na horizontální nepropustné vrstvě

Kombinací rovnic (16) a (19) získáme rovnici pro výpočet fluktuace maximální výšky hladiny podzemní vody ve tvaru:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{R(t)S^2 - K(H^2 - h_s^2)}{\mu S^2 C(H)} \quad (20).$$

Rovnice pro průtok na jednotku plochy hydraulického systému má tvar:

$$Q(t) = R(t) - \frac{B(H)}{C(H)} \left[ R(t) - K \frac{(H^2 - h_s^2)}{S^2} \right] \quad (21).$$

Hodnoty prvního a druhého faktoru tvaru hladiny je zapotřebí stanovit pro každou hodnotu maximální výšky z rovnic pro ustálené proudění podzemní vody. Pro případ, že výška hladiny v příkopu se blíží nulové hodnotě, blíží se hodnoty faktorů tvaru hladiny  $B$  a  $C$  hodnotám, které vypočetli Hartani, Zimmer a Lesaffre (2001).

### Metodika

Rovnice (20) byla řešena pomocí metody Runge-Kutta čtvrtého řádu. Výpočet byl proveden v programu Scilab 4.1.2. Charakteristiky drenážní soustavy pro porovnání rovnic byly následující: vzdálenost mezi drény  $L = 50$  m, počáteční maximální výška hladiny  $H = 1,5$  m, nasycená hydraulická vodivost  $K = 0,001$  m.s<sup>-1</sup>, aktivní pórovitost  $\mu = 0,1$ . Simulace byla prováděna pro časový úsek 200 hodin v časovém kroku 1 hodina.

Pro výpočet parametrů tvaru hladiny  $B$  a  $C$  byl modelován tvar hladiny při ustáleném proudění pro danou maximální výšku hladiny  $H$  na modelovém území, kdy hodnoty výšky hladiny byly vypočítávány ve sto uzlech pravidelně rozmístěných na ose  $x$  a pro výpočet změny hladiny se změnou maximální výšky v rovnicích (15) a (17) byl měněn vstupní parametr přítoku na hladinu podzemní vody  $R$  v řádu  $1 \cdot 10^5$  m.s<sup>-1</sup>.

Pro porovnání výsledků simulace poklesu hladiny podzemní vody byly provedeny výpočty také pomocí rovnic (2), (4), (5) a (7) pro shodnou drenážní soustavu, kdy byla pro všechny výpočty uvažována nulová výška hladiny nad nepropustným podložím v úrovni drénů. U rovnic (2) a (4) byla pro výpočet parametru  $\alpha$  dosazena také výška drénů nad nepropustným podložím  $d$ . Pro výpočet byly postupně dosazeny hodnoty  $d = 0,2$  m,  $0,5$  m a  $1$  m. Výsledky simulací byly porovnány pomocí průměrné odchylky (ME), odmocniny střední kvadratické chyby (RMSE) a koeficientu determinace – Nash-Sutcliffe (NSKD). Jako základ pro tyto výpočty byly brány výsledky simulace pomocí odvozené rovnice (20). Dále byly simulovány poklesy hladiny pro různou úroveň hladiny v odvodňovacím příkopu  $h_L$ .

Pro výpočet změn maximální výšky hladiny jako reakce na přítok na hladinu podzemní vody byla použita srážková data v hodinovém časovém kroku s celkovou dobou trvání 68 h, srážkovým úhrnem 27,4 mm a průměrnou intenzitou 0,4 mm.h<sup>-1</sup>. Pro porovnání byly použity simulace změn hladiny vypočtených pomocí rovnic (4) a (7), které byly opět porovnány pomocí kritérií ME, RMSE, NSKD. Simulace pomocí odvozených rovnic byly dále prováděny také pro podmínky, kdy výška hladiny na konci drenážní soustavy – v úrovni odvodňovacího příkopu není nulová, tedy situace, pro kterou byly speciálně odvozeny rovnice (20) a (21). Do výpočtů byly postupně dosazeny hodnoty  $h_L = 0,5$  m a  $1$  m.

### Výsledky

Výsledky porovnání simulace poklesu hladiny modelové drenážní soustavy rovnicemi (5), (7) a (20) jsou uvedeny v tabulce 1. Při simulaci byla ověřena platnost odvozených rovnic pro podmínky, kdy úroveň hladiny na konci drenážní soustavy  $h_L$  je minimální. Z porovnání je patrné, že

**Tabulka 1.** Výsledky porovnání simulací pomocí rovnice (20) s rovnicemi Glovera (1973) a Lesaffre a Zimmera (1988) pomocí srovnávacích kritérií průměrné odchylky (ME), odmocniny střední kvadratické chyby (RMSE) a koeficientu determinace – Nash-Sutcliffe (NSKD)

	Glover	Lesaffre a Zimmer
ME	0,003	0,002
RMSE	0,004	0,002
NSKD	1,000	1,000

**Tabulka 3.** Výsledky porovnání simulací pomocí rovnice (20) s rovnicí De Zeeuwa a Hellingy (1958) pomocí srovnávacích kritérií průměrné odchylky (ME), odmocniny střední kvadratické chyby (RMSE) a koeficientu determinace – Nash-Sutcliffe (NSKD); při simulacích byly voleny různé výšky drénů nad nepropustným podložím  $d$

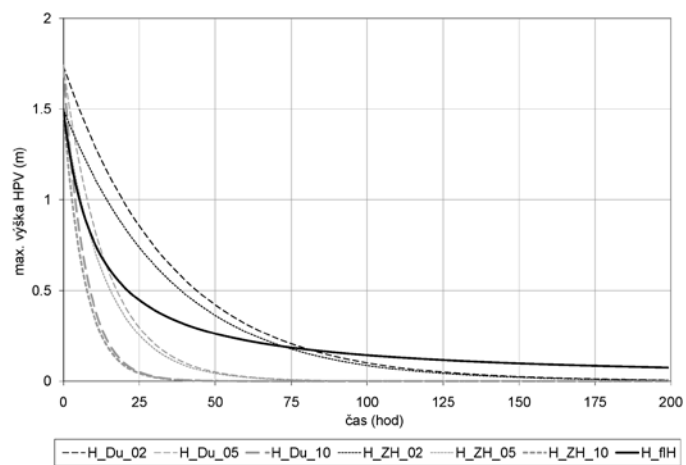
	Zeeuw a Hellinga ( $d = 0,1$ )	Zeeuw a Hellinga ( $d = 0,2$ m)	Zeeuw a Hellinga ( $d = 0,5$ m)	Zeeuw a Hellinga ( $d = 1$ m)
ME	-0,260	-0,026	0,132	0,184
RMSE	0,326	0,143	0,145	0,215
NSKD	0,288	0,846	0,713	-0,091

**Tabulka 2.** Výsledky porovnání simulací pomocí rovnice (20) s rovnicí Dumma (1960) pomocí srovnávacích kritérií průměrné odchylky (ME), odmocniny střední kvadratické chyby (RMSE) a koeficientu determinace – Nash-Sutcliffe (NSKD); při simulacích byly voleny různé výšky drénů nad nepropustným podložím  $d$

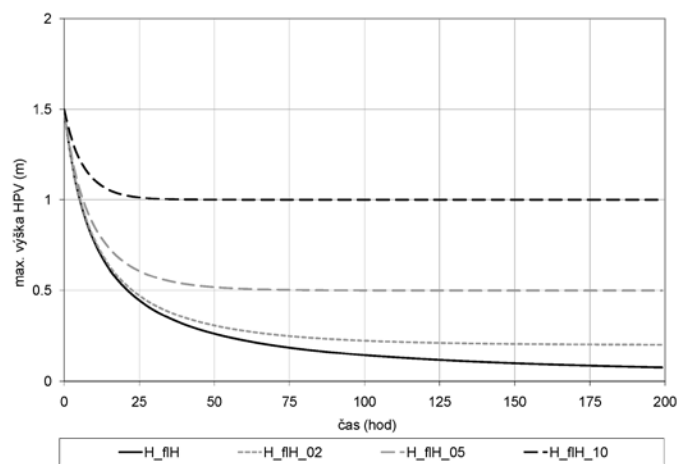
	Dumm ( $d = 0,1$ )	Dumm ( $d = 0,2$ m)	Dumm ( $d = 0,5$ m)	Dumm ( $d = 1$ m)
ME	-0,340	-0,068	0,114	0,175
RMSE	0,423	0,206	0,145	0,207
NSKD	0,112	0,762	0,786	0,246

**Tabulka 4.** Výsledky porovnání simulace změn hladiny podzemní vody pomocí rovnic (20), (4) a (7) pomocí srovnávacích kritérií průměrné odchylky (ME), odmocniny střední kvadratické chyby (RMSE) a koeficientu determinace – Nash-Sutcliffe (NSKD)

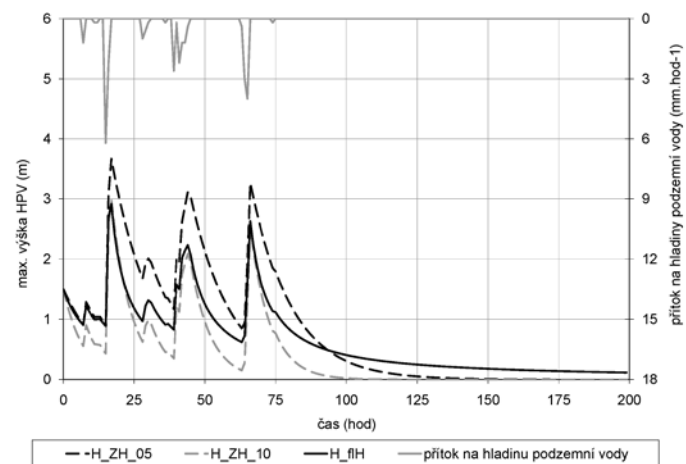
	Zeeuw a Hellinga ( $d = 0,5$ m)	Zeeuw a Hellinga ( $d = 1$ m)	Lesaffre a Zimmer
ME	-0,153	0,261	0,002
RMSE	0,033	0,007	0,000
NSKD	0,807	0,784	1,000



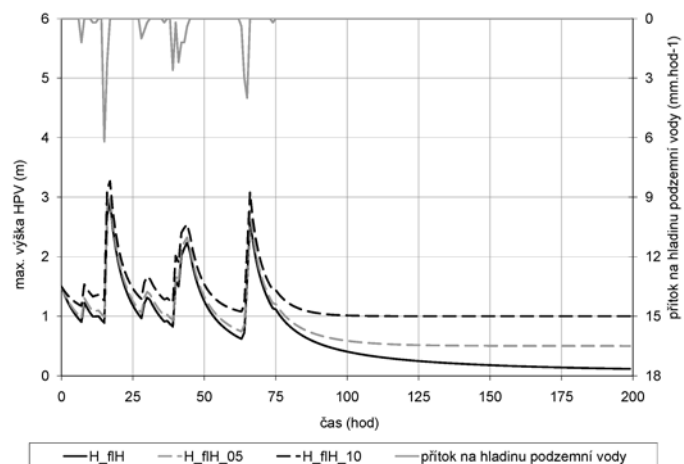
**Obr. 2.** Výsledky simulace poklesu hladiny podzemní vody pomocí rovnic (20), (2) a (4): H\_Du – simulace podle Dumma (1960), H\_ZH simulace podle De Zeeuwa a Hellingy (1958), poslední dvojčíslí vyjadřuje výšku drénů nad nepropustným podložím v decimetrech (např. H\_ZH\_05 znamená simulace podle De Zeeuwa a Hellingy pro výšku drénů nad nepropustným podložím  $d = 50$  cm)



**Obr. 3.** Simulace poklesu hladiny podzemní vody pomocí rovnice (20) pro různé výšky hladiny v odvodňovacím příkopu (např. H\_fIH\_05 znamená simulace pro výšku vody v odvodňovacím příkopu  $h_L = 50$  cm)



**Obr. 4.** Simulace změn hladiny podzemní vody pomocí rovnic (20) – H\_fIH a (7) – H\_ZH; u rovnice (7) byly simulace prováděny pro dvě různé úrovně umístění drénů nad nepropustným podložím (H\_ZH\_05 – výška drénů nad nepropustným podložím je 50 cm, H\_ZH\_10 je 1 m)



**Obr. 5.** Simulace změn hladiny podzemní vody pomocí rovnice (20) pro různé výšky hladiny v odvodňovacím příkopu  $h_L$  (H\_fIH –  $h_L = 0$  cm, H\_fIH\_05 –  $h_L = 50$  cm, H\_fIH\_10 –  $h_L = 100$  cm)

výsledky jsou téměř shodné v porovnání s dosud používanými rovnicemi pro drenážní soustavy.

Výsledky porovnání poklesu hladiny vypočtené podle rovnice (20) a rovnice (2) pro různé výšky drénů nad nepropustným podložím jsou uvedeny v tabulce 2. V tabulce 3 jsou uvedena porovnání s rovnicí (4). Z výsledků je patrná nižší shoda v simulovaných výsledcích. Tyto rozdíly jsou způsobeny především použitím rovnic pro jiný charakter drenážní soustavy, kdy drény neleží na nepropustném podloží. Grafické znázornění poklesu hladiny simulované podle rovnic (20), (2) a (4) je zobrazeno na obr. 2.

Grafické znázornění výsledků simulace poklesu hladiny podzemní vody při různých úrovních hladiny v odvodňovacím příkopu je znázorněno na obr. 3.

Výsledky simulace fluktuační hladiny podzemní vody, jako reakce na zadanou srážkovou událost pomocí rovnice (20), byly porovnány s výsledky z rovnic (4) a (7). Hodnoty srovnávacích kritérií jsou uvedeny v tabulce 4.

Grafické zobrazení simulací změn hladiny pomocí rovnic (4) pro dvě různé úrovně umístění drénů nad nepropustným podložím (0,5 a 1 m) a rovnice (20) je uvedeno na obr. 4.

Změny hladiny jako reakce na změny přítoku vody na hladinu podzemní vody byly následně prováděny pro různé výšky hladiny v odvodňovacích příkopech (obr. 5).

## Závěr

Pomocí separace časových a prostorových proměnných byla řešena Boussinesqova rovnice. Výsledkem jsou rovnice pro výpočet fluktuační hladiny podzemní vody a jejího odtoku mezi odvodňovacími příkopy, kde lze zahrnout vliv výšky hladiny v odvodňovacím příkopu. Tyto rovnice lze také použít pro modelování hladiny podzemní vody v blízkosti vodního toku. Platnost rovnic byla ověřena na modelové drenážní soustavě, kdy byly výsledky porovnány s běžně užívanými rovnicemi pro drenážní soustavy.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení grantového projektu Ministerstva zemědělství ČR – NAZV Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulací schopnosti v povodí Rakovnického potoka (pilotní projekt) (QH91247).

## Literatura

De Zeeuw, J.W., Hellinga, F. (1958) Neerslag en afvoer. *Landbouwkundig Tijdschrift*, 70, p. 405–422.

# VYUŽITÍ STOUPACÍCH ZKOUŠEK K VYHODNOCENÍ ÚČINKU REGENERACE VRTŮ

Pavel Pech

## Klíčová slova

vrt – stoupací zkoušky – dodatečné odpory – regenerace – skin faktor

## Souhrn

V příspěvku je ukázána možnost využití stoupacích zkoušek (počáteční částí) pro vyhodnocování účinku regeneračního zásahu na reálném vrtu. V úvodu je probrána teorie vyhodnocování hydraulických parametrů pomocí stoupacích zkoušek prováděných na ideálních vrtech ve zvodnělé vrstvě s volnou i napjatou hladinou. Při vyhodnocování stoupací zkoušky je uvažována předchozí čerpací zkouška, včetně stupňovité čerpací zkoušky s různými velikostmi odčerpávaného množství. V druhé části příspěvku je uvedeno rozšíření na reálné vrty, tj. případ, kdy uvažujeme na vrtu a jeho blízkém okolí existenci dodatečných odporů. Pojem dodatečné odpory (skin effect) poprvé zavedl v roce 1953 van Everdingen [15] a Hurst [7] v oblasti vyhodnocování naftových vrtů. K určení vlivu dodatečných odporů je použit sumární koeficient dodatečných odporů – tzv. skin faktor,  $W$ .

Popsaný postup určení efektu regeneračního zásahu je aplikován na vyhodnocení efektu regenerace spouštěné studny S3 v prameništi Pracejovice, která byla provedena Vodními zdroji Praha v roce 1982 [6].

## Teorie

### Stoupací zkoušky

Jestliže je čerpání na vrtu přerušeno, teoreticky platí, že hladina ve zvodnělé vrstvě (kolektoru) se vrací na úroveň před začátkem čerpání. Přítok vody ze zvodnělé vrstvy během stoupací zkoušky můžeme simulovat pomocí imaginárního vsakovacího vrtu do zvodnělé vrstvy (se vsakováním množstvím vody stejné velikosti, jako bylo odčerpávané množství, ale se záporným znaménkem). Zbytkové snížení během stoupací zkoušky lze určit použitím principu superpozice, jako součet snížení při pokračování

Dumm, LD. (1960) Validity and use of the transient flow concept in subsurface drainage. Paper presented at ASAE meeting, Memphis, December, p. 4–7.

Glover, RE. (1973) Ground-Water Movement. Washington : Government Printing Office, p. 76, SN 2403-00083.

Guyon, G. (1980) Transient State Equations of Watertable Recession in Heterogeneous and Anisotropic Soils. *Transactions of the ASAE*, Vol. 23, No. 3, p. 653–656.

Hartani, T., Zimmer, D., and Lesaffre, B. (2001) Drainage of Sloping Lands with Variable Recharge: Analytical Formulas and Model Development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 127, No. 1, p. 8–15.

Koopmans, RWR. (2000) Fluidmechanics and groundwater flow. Department of Water Resources, Wageningen University, p. 234.

Lesaffre, B. and Zimmer, D. (1988) Subsurface Drainage Peak Flows in Shallow Soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 114, No. 3, p. 387–406.

Ing. Jiří Pavlášek, Ph.D.

KVHEM, FZP, ČZU

tel.: 224 382 134, pavlasek@fzp.czu.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Solution of unsteady groundwater flow with help of separation time and space variables (Pavlášek, J.)*

## Key words

drainage – groundwater table – factors of groundwater tables

In the article, possible modifications of equations for unsteady groundwater flow derived for Darcian flow on horizontal impermeable layer with acceptance of Dupuit's assumptions are presented. Modification of equations was realized for flow between two parallel drain ditches with the same groundwater level in isotropic homogenous soils. Solution was based on separation of time and space variables, when it is possible to assume constant shape of groundwater depression for given maximal level of groundwater table in the middle of the ditches. Results of groundwater drawdown and its fluctuation with help of derived equations were compared with the equations derived for conditions when drains are situated on an impermeable layer and for conditions when impermeable layer is below the drains.

čerpání a negativního snížení ze zavedeného imaginárního vsakovacího vrtu [8] (obr. 1).

Zbytkové snížení během stoupací zkoušky pro zvodnělou vrstvu s napjatou hladinou můžeme vyjádřit použitím Theisovy rovnice [10]

$$s^* = s + s_{st} \quad (1)$$

kde  $s^*$  (m) je výsledné snížení naměřené ve vrtu během stoupací zkoušky;  $s$  (m) – snížení z „pokračující čerpací zkoušky“;  $s_{st}$  (m) – zvýšení hladiny ve vrtu v průběhu stoupací zkoušky.

Pro výsledné snížení ve vrtu můžeme psát [6]

$$s^* = \frac{+Q}{4\pi T} W(u) + \frac{-Q}{4\pi T} W(u_{st}) \quad (2)$$

kde parametr Theisovy studňové funkce  $u$  pro čerpací zkoušku je dán např. v [10]

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (3)$$

kde  $r$  (m) je radiální vzdálenost od osy odčerpávaného vrtu;  $S$  (-) – koeficient storativity;  $T$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) – koeficient transmisivity (průtočnosti);  $t$  (s) – čas měřený od počátku čerpání

a pro imaginární vsakovací vrt

$$u_{st} = \frac{r^2 S}{4Tt^*} \quad (4)$$

kde  $u_{st}$  je parametr Theisovy studňové funkce pro stoupací zkoušku;  $t^*$  (s) – čas měřený od okamžiku zastavení čerpání.

Pro parametr Theisovy studňové funkce  $u$ , resp.  $u_{st}$  menší než 0,05 se Theisova rovnice (2) může zjednodušit podle [2]

$$s^* = \frac{Q}{4\pi T} \left( \ln \frac{2,246Tt}{r^2 S} - \ln \frac{2,246Tt^*}{r^2 S} \right) \quad (5)$$

Po úpravě dostáváme pro výsledné snížení během stoupací zkoušky vztah

$$s^* = \frac{Q}{4\pi T} \left( \ln \frac{t}{t^*} \right) \quad (6)$$

V případě, že stoupací zkoušce předcházelo čerpání z vrtu s různou velikostí odčerpávaného množství vody  $Q_i$  (obr. 2), nemůžeme u stoupací zkoušky použít aritmetický průměr všech čerpacích množství vody před stoupací zkouškou, ale musí se použít poslední čerpané množství před ukončením čerpání a zároveň je nutné provést korekci času [10]

$$t_{ps}^* = \frac{\sum_{i=1}^k Q_i (t_i - t_{i-1})}{Q_k} \quad (7),$$

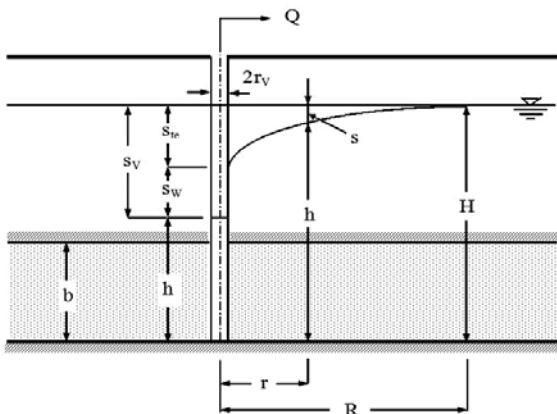
kde  $t_{ps}^*$  (s) je celkový korigovaný čas;  $t_i$  (s) – čas čerpání daného  $Q_i$ ;  $Q_k$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) – poslední čerpané množství před ukončením čerpání.

### Dodatečné odpory

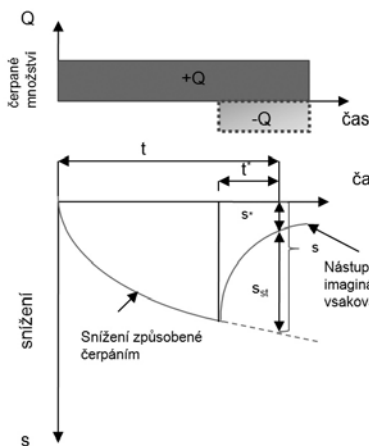
Teorii a aplikaci vyhodnocování dodatečných odporů na odčerpávaných vrtech se věnovala celá řada příspěvků, zejména v naftové oblasti, např. [1, 5, 9, 11, 13]. Snížení hladiny vody ve „skutečném“ vrtu (tj. případ, kdy uvažujeme existenci dodatečných odporů na odčerpávaném vrtu a jeho blízkém okolí) závisí na odporu porézního prostředí nasyceného vodou, viskozitě a na tzv. dodatečných ztrátách vznikajících ve vrtu, na jeho stěnách a blízkém okolí. Pod pojmem dodatečné odpory rozumíme souhrn jevů, jejichž vlivem dochází k odchýlení naměřených hodnot snížení vody na „skutečném“ vrtu, oproti teoretickému snížení získanému za předpokladu „ideálního“ modelu proudění vody k úplnému vrtu. Snížení hladiny vody (resp. zvýšení) naměřené na odběrovém vrtu (resp. nálevovém) je potom větší než výpočtové snížení (resp. zvýšení) hladiny vody ve vrtu, které by vyvolal daný hydraulický zásah prostřednictvím hydrodynamicky dokonalého vrtu bez těchto dodatečných odporů. Některé druhy dodatečných odporů mohou vzniknout již při zhotovování vrtu a jejich zdrojem jsou nedostatky a nedokonalosti techniky a technologie hloubení a zejména vystrojení odběrových vrtů (například snížení propustnosti v bezprostředním okolí vrtu vlivem vniknutí výplachu do porézního prostředí nasyceného vodou při rotačním způsobu vrtání, důsledkem čehož je vznik tzv. „kalové kúry“, nebo při nárazovém vrtání, kdy dochází ke ztuhnutí porézního prostředí v blízkosti vrtu, a tím ke snížení propustnosti). Dalšími příčinami vzniku dodatečných odporů na vrtu jsou různé hydromechanické, chemické, biologické aj. jevy, které se mohou vyskytnout na vrtu a jeho okolí v průběhu využívání vrtu. Znalost velikosti dodatečných odporů, resp. dodatečného snížení připadajícího na působnost dodatečných odporů, je nezbytná při stanovení storativity z údajů o snížení hladiny naměřených na odběrovém vrtu za nestacionárního režimu proudění při stanovení koeficientu hydraulické vodivosti za stacionárního režimu.

Část snížení připadající na působení dodatečných odporů je možné rozdělit na část snížení způsobenou

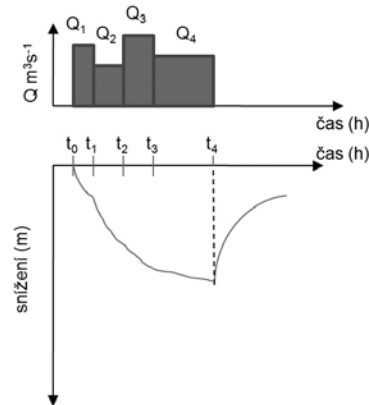
- **kolmatací vrtu** ( $s_k$ ) – tj. ucpáváním pórů např. jemným materiálem, čímž dochází ke snížení průtočnosti porézního prostředí, nebo narušením původní vnitřní struktury porézního prostředí v těsném okolí odběrového vrtu při jeho hloubení a vystrojování (jde o snížení propustnosti porézního prostředí vlivem vniknutí výplachu do zvodnělé vrstvy – při rotačním způsobu vrtání, jehož důsledkem je tzv. kalová kúra, nebo případ, kdy při nárazovém vrtání dojde ke ztuhnutí porézního prostředí, a tím ke snížení propustnosti),
- **zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu** pro přítok vody ( $s_v$ ) tam, kde je stěna vrtu tvořena filtrem, perforovanou pažnicí apod.,
- **neúplným průnikem** ( $s_p$ ) – neúplným otevřením mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem (tzv. neúplné vrtu),



Obr. 3. Proudění k úplnému vrtu s napjatou hladinou (nenulové dodatečné odpory)



Obr. 1. Princip superpozice použitý pro simulování stoupací zkoušky



Obr. 2. Schéma průběhu snížení při stoupací zkoušce, která následuje po stupňovité čerpací zkoušce

- **ucpáváním** ( $s_k$ ) – zachycováním částic horniny nebo obsypu v otvorech filtru, kam přiřazujeme také chemickou inkrustaci a ucpávání otvorů filtru působením mikroorganismů a bakterií,
- **třením** ( $s_v$ ) vody o stěny vrtu a jejím vnitřním třením (do této skupiny zařazujeme i dodatečné odpory vznikající turbulencí uvnitř vrtu),
- **turbulentním režimem proudění** ( $s_{tp}$ ) ve zvodnělé vrstvě, zejména v blízkosti odběrového vrtu,
- **dalšími druhy dodatečných odporů** ( $s_o$ ).

Celkové snížení připadající na působení dodatečných odporů vyjádříme

$$s_W = s_K + s_F + s_P + s_I + s_T + s_{TP} + s_O \quad (8),$$

kde  $s_w$  je snížení ve vrtu způsobené dodatečnými odpory.

Separace jednotlivých složek dodatečných odporů je velmi problematická, a proto je k charakteristice dodatečných odporů užito sumárního bezrozměrného koeficientu dodatečných odporů,  $W$  (v anglosaské literatuře označovaném jako skin faktor) – podle van Everdingena [15].

Celkové snížení hladiny vody naměřené v odběrovém vrtu během přítočkové zkoušky lze vyjádřit vztahem (obr. 3)

$$s_V = s_{TE} + s_W \quad (9),$$

kde  $s_V$  (m) je celkové snížení na čerpaném vrtu;  $s_{TE}$  (m) – teoretické snížení hladiny vody na „ideálním“ vrtu (nulové dodatečné odpory);  $s_W$  (m) – dodatečné snížení vody ve vrtu způsobené vlivem dodatečných odporů.

Při zanedbání části snížení, které připadá na působení nelineárních odporů  $s_k$  a  $s_{tp}$  je velikost dodatečného snížení závislá na odebrané vydatnosti  $Q$  podle lineárního vztahu [15]

$$s_W = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (10),$$

kde  $W$  je bezrozměrný koeficient dodatečných odporů (skin faktor).

Vliv dodatečných odporů zahrneme do celkového snížení na „skutečném“ vrtu při proudění s napjatou hladinou následovně:

- při stacionárním režimu proudění

$$s_V = \frac{Q}{2\pi T} \left( \ln \frac{R}{r_v} + W \right) \quad (11),$$

kde  $r_v$  (m) je poloměr čerpaného vrtu;  $R$  (m) – dosah depresního kuželu;

- při nestacionárním režimu proudění
  - a) dosazením do Theisovy rovnice

$$s_V = \frac{Q}{4\pi T} (W(u) + 2W) \quad (12),$$

- b) pro bezrozměrný čas  $t_D > 25$  podle Jacobovy aproximace [3] se rovnice (12) zjednoduší na tvar

$$s_V = \frac{Q}{4\pi T} \left( \ln \frac{2,246Tt}{r_v^2 S} + 2W \right) \quad (13).$$

Koeficient dodatečných odporů vyjádříme z rovnice (13)

$$W = \frac{2\pi T s_V}{Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{2,246Tt}{r_v^2 S} \quad (14).$$

A po úpravě dostaneme

$$W = \frac{2\pi T s_V}{Q} - \frac{1}{2} \left( \ln t + \ln \frac{T}{r_v^2 S} + 0,8091 \right) \quad (15).$$



Dále upravíme rovnici (15) pro čas počátku stoupací zkoušky, tj. v čase  $t^* = 0$ , jestliže stoupací zkoušce předcházela stupňovitá čerpací zkouška. Po dosažení za  $t = t_{pc}$  a  $Q = Q_k$  dostaneme rovnici pro skin faktor ve tvaru

$$W = \frac{2\pi T s_v}{Q_k} - \frac{1}{2} \left( \ln t_{ps}^* + \ln \frac{T}{r_w^2 S} + 0,8091 \right) \quad (16),$$

kde  $Q_k$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je poslední čerpané množství před zastavením čerpání;  $t_{ps}^*$  (s) – korekce celkového času čerpání podle (7).

### Regenerace vrtu S3 v prameništi Pracejovice

Spouštěná studna S3 byla vyhloubena v roce 1961. Studna má průměr 4 m a celková hloubka od krycí desky byla po vybudování 17,3 m. Mezi 1,6–11,0 m je plášť studny perforován 432 vtokovými otvory s průměrem 80 mm. V průběhu exploatace studny docházelo k zanášení studny při nadměrném snížení hladiny ve studni. V důsledku vysokých vtokových rychlostí docházelo k vplavování jemných částic do studny a zároveň ke kolmataci vtokových otvorů i horninového prostředí v nejbližším okolí studny. Před regenerací byla celková hloubka studny od krycí desky 13,3 m. Ve studni bylo cca 4 m nánosů.

V rámci regenerace bylo vybudováno sedm vibrátorových vrtů vystrojených ocelovými zárubnicemi o průměru 89 mm s celkovou hloubkou 11 m. Čerpací zkouška před regenerací trvala 15 hodin. Následná stoupací zkouška trvala 8 hodin. Nejprve byla provedena regenerace tlakovým vzduchem pozorovacími vrty, které byly umístěny v blízkém okolí studny, následovalo mechanické čištění vtokových otvorů a odkalení dna. Čerpací zkouška po regeneraci trvala 15 hodin a následná stoupací zkouška 24 hodin.

Ze studny S3 bylo kalovým čerpadlem KDFU-125 čerpáno  $0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Podařilo se snížit hladinu na 10 m od krycí vrstvy. V této úrovni bylo postaveno lešení. Z lešení bylo následně provedeno ruční čištění vtokových otvorů studny S3. Většina vtokových otvorů byla zaplněna písčitým jílem. K čištění byl použit nástroj z ocelové kulatiny průměru 12 mm a ocelové trubky Js  $1/2''$ , s délkou 2 m, do kterého byl přiváděn tlakový vzduch. Podařilo se vyčistit vtokové otvory i blízké okolí studny tak, že voda vtékala do studny plným profilem otvorů. Následovalo odkalení dna mamutkou. Ze dna bylo odčerpáno přibližně  $38 \text{ m}^3$  nánosů.

### Vyhodnocení efektu regenerace na vrtu S3

Pro vyhodnocení efektu regeneračního zásahu na vrtu S3 byly provedeny čerpací i stoupací zkoušky před regenerací a po provedené regeneraci. Z hydrodynamických zkoušek na vrtu S3 byly pomocí Jacobovy semilogaritmické aproximace [3] vypočteny hodnoty koeficientu storativity  $S = 0,11$  a koeficientu transmisivity  $T = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Čerpání probíhalo při dvou konstantních vydatnostech před i po provedené regeneraci (tabulka 1).

Vyhodnocení účinku regenerace bylo provedeno pro začátek stoupací zkoušky stanovením skinového faktoru podle van Everdingena [15]. Z rovnice (7) byl pro dvě deprese určen korigovaný čas:

$$t_{ps}^* = \frac{\sum_{i=1}^2 Q_i (t_i - t_{i-1})}{Q_2}$$

Dosažením do rovnice (16) byl určen koeficient dodatečných odporů

$$W = \frac{2\pi T s_v}{Q_k} - \frac{1}{2} \left( \ln t_{ps}^* + \ln \frac{T}{r_w^2 S} + 0,8091 \right)$$

Snížení způsobené dodatečnými odpory bylo určeno pomocí rovnice (10)

$$s_w = \frac{Q_2}{2\pi T} W$$

Výsledky provedených výpočtů jsou uvedeny v tabulce 2.

**Tabulka 1.** Čerpaná množství a časy stupňovité čerpací zkoušky před a po regeneraci

Před regenerací		Po regeneraci	
$Q_1 = 0,0095 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$t_1 = 22\,500 \text{ s}$	$Q_1 = 0,011 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$t_1 = 21\,600 \text{ s}$
$Q_2 = 0,0122 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$t_2 = 54\,800 \text{ s}$	$Q_2 = 0,0172 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$t_2 = 54\,000 \text{ s}$

**Tabulka 2.** Výsledky výpočtů před a po regeneraci

Parametr	Před regenerací	Po regeneraci
$t_{ps}^*$ (s)	72 320	67 940
$W$ (-)	1,91	0,79
$s_w$ (m)	0,60	0,33
$s_v$ (m)	1,77	2,00

### Závěr

K vyhodnocení regeneračního zásahu na spouštěné studni S3 v prameništi Pracejovice v Českých Budějovicích byly použity stoupací zkoušky před a po regeneračním zásahu. Výpočtem bylo zjištěno, že velikost skinového faktoru se snížila z hodnoty 1,91 před regenerací na 0,79 po provedené regeneraci, což odpovídá zlepšení o cca 140 %. Velikost snížení způsobeného dodatečnými odpory na studni S3 před regenerací při celkovém snížení 1,77 m byla 0,79 m a po regeneraci při snížení na studni S3 2,0 m činilo toto snížení způsobené dodatečnými odpory 0,33 m. Vyhodnocení regenerace na studni S3 ukazuje, že postup vyhodnocení regenerace pomocí stoupací zkoušky při srovnání s vyhodnocením regenerace pomocí čerpacích zkoušek [6] vykazuje rozdíl ve vypočtených hodnotách cca do 10 %, což je velmi dobrý výsledek. Lze konstatovat, že využití stoupacích zkoušek k vyhodnocení regeneračního zásahu na vrtu je adekvátní vyhodnocení z čerpacích zkoušek.

V příspěvku uvedený postup vyhodnocení regenerace je vhodný pro použití tam, kde máme k dispozici čerpací zkoušky s krátkou dobou čerpání (nebylo dosaženo přímkového úseku vyhodnotitelného Jacobovou semilogaritmickou aproximací) nebo pokud je prováděna stupňovitá čerpací zkouška před stoupací zkouškou.

### Literatura

- [1] Agarwal, RG., Al-Hussainy, R., and Ramey, HJ. Jr. (1970) An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. *Trans. Soc. Petroleum Eng. AIME*, 249, p. 279–290, Trans AIME.
- [2] Bear, J. (1979) *Hydraulics of ground water*. New York.
- [3] Batu, J. (1999) *Aquifer hydraulics: A comprehensive Guide to hydrogeologic data analysis*, New York : John Wiley & Sons, 727 p.
- [4] Cooper, HH. Jr. and Jacob, CE. (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions American Geophysical Union*, 27, p. 526–534.
- [5] Earlougher, RC. Jr. (1977) *Advances in well test analysis*. Monograph series. SPE of AIME. Dallas.
- [6] Fousek, M., Hampel, J., Hlaváček, V. a Pech, P. (1982) Regenerace spouštěné studny S3 v prameništi Pracejovice. ZČ 86/82, Vodní zdroje, Praha.
- [7] Hurst, W. (1953) Establishments of the skin effect and its impediment to fluid flow to a wellbore. *Petr. Eng. Inst.* 25. Dallas.
- [8] Charbeneau, RJ. (2006) *Groundwater hydraulics and pollutant transport*. Waveland Press, INC. Long Grove, Illinois, 593 p.
- [9] Jetel, J. (1985) *Metody regionálního hodnocení hydraulických vlastností hornin*. ÚÚG, Praha.
- [10] Kresic, N. (2006) *Hydrogeology and groundwater modeling*. CrC Press, 807 p.
- [11] Moench, AF. (1995) Convergent radial dispersion on a double-porosity aquifer with fracture skin – Analytical solution and application for a field experiment in fracture chalk. *Water Resour. Res.*, 31, p. 1823–1835.
- [12] Pech, P. (2003) Determination of the skin factor in the early portion of an aquifer test. *J. Environ. Hydrology*, vol. 11, p. 1–9.
- [13] Ramey, HJ. Jr. (1970) Short-time well test data interpretation in the presence of skin effect and wellbore storage. *J. Pet. Tech. Jan.*, 97.
- [14] Theis, CV. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 16, p. 519–524.
- [15] van Everdingen, AF. (1953) The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. *Trans AIME*, vol. 198, p. 171–176.

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.  
KVHEM, FŽP, ČZU Praha  
tel.: 224 382 132, e-mail: pech@fzp.czu.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Evaluation of the Well Rehabilitation from the Recovery Tests (Pech, P.)*

### Key words

well – recovery test – additional resistance – rehabilitation – skin factor

The paper deals with application of recovery (build-up) tests on evaluation of the well rehabilitation. First of all the theory for evaluation of hydraulic parameters of porous media at an ideal well is described (recovery test is taken into account). For “real” well, the effect of additional resistances is significant. The additional resistance and finite volume of a wellbore are the two main factors which influence pumping test data measured at a well. The drawdown caused by additional resistance (the skin effect) was noted for the first time by van Everdingen [15] and Hurst [7]. The recovery analysis at the real well can be used to calculate „skin factor“ with reasonable accuracy when the pumping rate was not kept constant during the test. Application of this procedure is presented on a practical evaluation of the well S3 rehabilitation at Pracejovice spring area (near České Budejovice). This rehabilitation was done by Water Resources company, Prague in 1982.

# VYUŽITÍ MATEMATICKÉHO MODELU PRO POSOUZENÍ NAVRŽENÝCH PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ V LUKÁCH U PŘÍCHOVIC

Marie Lávičková, Radek Roub

## Klíčová slova

povodně – protipovodňová ochrana – matematický model – Hec-Ras

## Souhrn

Zájmové území se nachází na části vodního toku Úhlavy v lukách u Příchovic v blízkosti města Přeštice. Návrh protipovodňových opatření je součástí dokumentace k územnímu řízení: Přeštice – Inundační průlehové koryto v lukách u Příchovic. Posuzovaná dokumentace byla zhotovena na základě hydrotechnických výpočtů a zkušeností z povodně v srpnu 2002.

Matematický model je prakticky využit ve studii posouzení navržených protipovodňových opatření na vodním toku Úhlavy ve městě Přeštice. Posouzení je založeno na matematickém modelování odtokového a hladinového režimu na vodním toku Úhlavy. K vlastní simulaci je použit nekomerční software Hec-Ras, verze 3.1.1. Z provedeného posouzení navržených protipovodňových opatření by mělo být zřejmé, zda jsou navržena efektivně. Matematický model připravený pomocí uvedeného softwaru je možné využít jako podklad pro poskytnutí podpory při realizaci navržených protipovodňových opatření na vodním toku Úhlavy v lukách u Příchovic v rámci dotačního programu „Podpora prevence před povodněmi II“ v gesci Ministerstva zemědělství.

## Úvod

Město Přeštice se nachází v Plzeňském kraji asi 15 km jižně od Plzně v údolní nivě vodního toku Úhlavy. Řeka zde protéká asi 600 m širokým údolím, které je tvořeno převážně lučními pozemky a pastvinami.

Vodní tok Úhlavy v Přeštích způsobuje záplavy již při dvouleté povodni. Protipovodňová opatření byla navržena s ohledem na realizované úpravy v letech 2005 a 2006 u silničního mostu na Nepomuk přes Úhlavu v ř. km 31,336. Úpravy byly provedeny za účelem zkapacitnění inundačních polí níže pod mostem. Jednalo se o snížení terénu na nejvyšší možnou výšku světlosti mostních otvorů.

## Návrh protipovodňových opatření

Navrhovaná opatření jsou situována v úseku ř. km cca 31,3–33,3. Cílem navržených protipovodňových opatření by měla být ochrana spodní části Přeštic před účinky velkých vod. Návrh protipovodňových opatření je založen na odvedení hlavního proudu aktivní inundace mimo město do luk, což by mělo zmírnit následky při zvýšení hladiny za povodně. Efekt spočívá v rozdělení průtoků za povodně, která protéká v inundaci luk [1]. Návrh protipovodňových opatření se skládá ze čtyř stavebních objektů, jak je znázorněno na obr. 1.

### Objekt SO-01 Inundační koryto I

Koryto I bude vytvořeno v délce 502 m v úseku od chodníku pro pěší do Příchovic až do konklávního břehu prvního meandru v lukách. Koryto bude mít šířku 60–75 m a bude ploché, s hloubkou do 40 cm. Ploché tvar bude opevněn ohumusováním a podloženou protierozní rohoží. Koryto bude ústít do toku v rozvinutí do šířky 60 cm, kde se provede opevnění nátoka a břehů kamennou patkou a rovininou z lomového kamene.

### Objekt SO-02 Inundační koryto II

Koryto II bude vytvořeno v délce 75 m na již existujícím meandru toku nad korytem objektu SO-01. Koryto bude mít šířku 50–20 m. Dno koryta bude ploché, s hloubkou do 40 cm. Koryto bude ústít do toku v rozvinutí do šířky 60 cm, kde se také provede opevnění nátoka a břehů kamennou patkou a rovininou z lomového kamene.

### Objekt SO-03 Ponořený prah v ř. km 33,133

Ponořený prah bude umístěn napříč tokem v jeho směrovém ohybu do úrovně 60 cm pod současnou hladinu danou výší koruny jezu. Jeho konstrukce v toku, která bude plně zatopena, bude z těžkého záhozu z lomového kamene. Celý objekt bude mít zúženou vstupní šířku ze současné šířky vodní hladiny 19 m na 15 m. Ohraničení bude provedeno ocelovými štetovými stěnami, které budou dostatečně zavázány do ochranných hrázek

na levém i pravém břehu. Pro opevnění celé konstrukce bude použito těžkého kamenného záhozu a kamenné rovinaniny. Současně budou zpevněny břehy toku pod i nad ponořeným prahem.

### Objekt SO-04 Ochranná hráz

Ochranná hráz se vybuduje v určené poloze v parametrech lichoběžníkového profilu v km 0,0–0,5, kde bude sloužit jako příjezd do zahrádkářské kolonie a současně plnit funkci cyklostezky. Bude mít šířku v koruně 4 m a průměrná výška bude nad 0,7 m. Sklony svahů budou do luk 1 : 3 a směrem k zahrádkám 12 % pro sjezd. V km 0,5–1,215 na pravém břehu bude mít hráz šířku v koruně 2,5 m a sklony obou svahů budou ploché 1 : 4,5–5. Výška hráze bude 1,2–1,5 m.

Svahy budou osety s ohumusováním na vrstvě ornice. Těleso hráze bude tvořeno hutněnými násypy výkopové zeminy získané při budování inundačních koryt, popř. při prohlubování koryta Úhlavy. Čelo hráze v km 1,195–1,215 bude v celém obvodu líce opevněno kamennou rovininou na sucho.

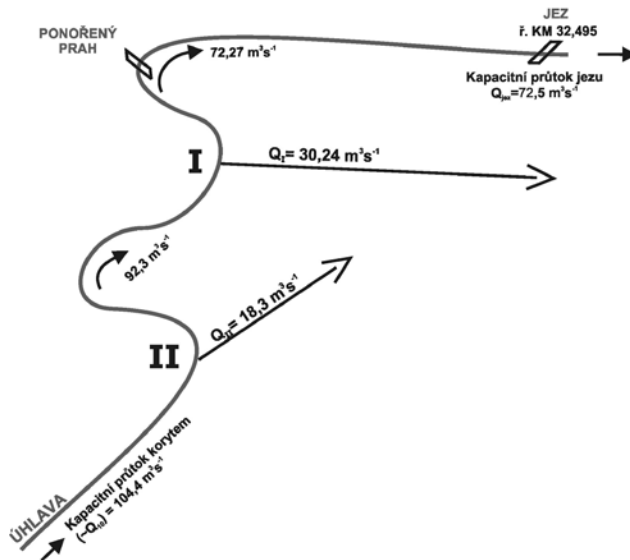
## Hydrotechnické posouzení návrhu

Software HEC-RAS (River Analysis System) je jedním z produktů, které v oblasti hydrologie a hydrauliky vyvinul Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers. Jde o jednorozměrný model (1D), který umožňuje řešení proudění v otevřených korytech včetně analýzy vlivu nejrůznějších typů objektů (jezy, mosty, propustky, splavy). Modelované území je popsáno soustavou příčných profilů a popřípadě objektů, přičemž se předpokládá, že proudění se děje ve směru spojnic mezi jednotlivými profily [2].

Matematický model byl využit pro posouzení návrhu protipovodňových opatření v zájmovém území. Pomocí modelu bylo stanoveno, jak ovlivní danou lokalitu vybudování protipovodňových opatření při průchodu jednotlivých N-letých průtoků ( $Q_{1'}$ ,  $Q_{2'}$ ,  $Q_{5'}$ ,  $Q_{10'}$ ,  $Q_{20'}$ ,  $Q_{50'}$ ,  $Q_{100}$  a návrhové  $Q$ ) posuzovaným



Obr. 1. Návrh protipovodňových opatření



Obr. 2. Grafické znázornění rozdělení průtoků v Úhlavě pro variantu A

územím. Pro posouzení návrhu protipovodňových opatření byly vypočítány dvě varianty.

Varianta A je založena na rozdělení průtoků v zájmovém území (obr. 2 a 3). Průtoky do inundačních koryt byly zadány podle návrhu, který předpokládá, že průtok do inundačního koryta SO-01 by měl být  $30,24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a průtok do inundačního koryta SO-02 by měl být  $18,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Uvedené průtoky do inundačních koryt jsou předpokládány při průchodu kapacitního průtoku korytem.

Varianta B je odlišná ve způsobu schematizace zájmového území, zadávání geometrických dat a okrajových podmínek, především co se týká rozdělení průtoků.

V modelu varianty B byla provedena schematizace pouze hlavního toku Úhlavy. Okolní posuzovaná oblast nebyla přímo rozdělena na jednotlivé objekty (obr. 4). Nadmořské výšky okolní oblasti podél Úhlavy zůstaly zachované podle návrhu, to znamená, že geometrická data byla shodná s variantou A.

Okrajové podmínky varianty B byly opět nastaveny pro osm různých N-letých průtoků. V tomto řešení, kde byla provedena zjednodušená schematizace návrhu, již nebylo uvažováno rozdělení průtoků do inundačních koryt v posuzované lokalitě, a proto byl volen jen počáteční průtok na toku Úhlavy pro jednotlivé N-leté průtoky. V tomto řešení také došlo k rozšíření posuzované přílehlé oblasti podél vodního toku Úhlavy.

### Výsledky a diskuse

Hydrotechnické posouzení navržených protipovodňových opatření bylo provedeno při průchodu N-letých průtoků (tabulka 1) zájmovým územím vodního toku Úhlavy v lukách u Přířovic.

Výsledkem posouzení jsou záplavové čáry pro realizaci protipovodňových opatření, a tím vymezení záplavových území pro jednotlivé N-leté průtoky.

### Výstupy varianty A

Výstupem řešení varianty A je znázornění celkového pohledu rozlivu při průchodu povodní posuzovaným územím (obr. 5).

Výsledky matematického modelu ukázaly, že v případě průběhu jednotlivých N-letých průtoků posuzovaným územím a za předpokladu rozdělení průtoků podle návrhu by protipovodňová opatření byla účinná. Voda by byla zadržena v inundačním území prostřednictvím koryt a ochrannou hrází. K rozlivu vody do území by docházelo v přílehlé oblasti koryta Úhlavy. Za této situace by nedošlo po celé délce ochranné hráže k přelití vody zpět do vodního toku Úhlavy.

Dalším ukazatelem účinnosti protipovodňových opatření je stav a výška hladiny vody při průběhu N-letých povodní na objektu SO-04, na ponořeném prahu. Kóta koruny hráže ponořeného prahu je navrhována ve výšce  $353,00 \text{ m n.m.}$  Tímto profilem je možné propustit při hladině průtoku N-leté povodně do koryta pod tento prah pouze množství cca  $72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Toto množství vody je schopen převést přes pevnou korunu jez v ř. km  $32,495$  bez následků pro vlastní město.

Z výstupu modelu je patrné, že dojde k překročení maximálního možného průtočného množství na objektu při  $Q_{100}$  a vyšším, a tím dojde pravděpodobně k vylití vody z břehů na dolním jezu v ř. km  $32,495$  a k ohrožení nejbližší okolní části města.

### Výstupy varianty B

Výsledky z modelu varianty B mají upřesnit a doplnit výsledky z varianty A. Jde především o výšky hladin vody při průchodu jednotlivých povodňových vln posuzovaným územím. Tato varianta dává přesnější údaje o stavu a výšce hladiny vody při povodni. Je to způsobeno tím, že řešení povodní není založeno na přímém rozdělení průtoků do inundačních koryt.

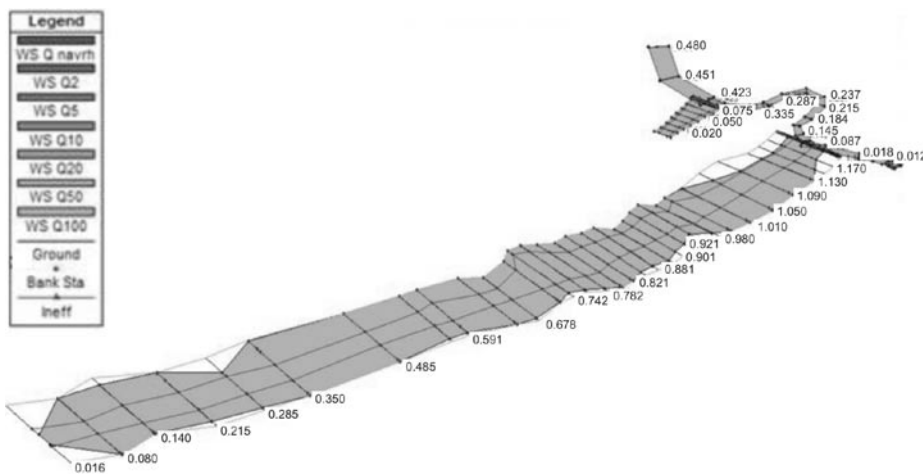
Z výstupů této varianty vyplývá, že v případě průchodu průtočného objemu  $Q_1, Q_2, Q_5$  a  $Q_{10}$  by nemělo dojít k vylití vody z břehů inundačních koryt. V případě průběhu průtočného množství  $Q_{20}$  by mělo dojít k vylití vody



Obr. 3. Varianta A – znázornění příčných profilů v zájmovém území



Obr. 4. Varianta B – znázornění příčných profilů v zájmovém území



Obr. 5. Rozliv povodně po realizaci protipovodňových opatření

Tabulka 1. Hodnoty průtočných objemů odpovídající N-letým průtokům a pro návrhové Q

N-leté průtoky [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]								
N	1	2	5	10	20	50	100	návrh
Průtok	38,3	57,1	86,6	112	141	183	219	250

z břehů inundačních koryt do přilehlé oblasti, ale neměla by nastat situace zpětného přelití vody přes ochrannou hráz do vodního toku Úhlavy po celé její délce. Během průběhu vyšších průtočných množství, než je  $Q_{20}$ , dojde v zájmovém území k vylití vody z břehů inundačních koryt a nastane i přelití přes ochrannou hráz zpět do toku Úhlavy, což způsobí zaplavení okolní přilehlé oblasti a ohrožení města.

Varianta B též poskytla údaje o stavu a výšce hladiny vody při průběhu N-letých povodní na ponořeném prahu na vodním toku Úhlavy. Z výstupu modelu je patrné, že dojde k překročení maximálního možného průtočného množství na objektu při  $Q_{20}$  a vyšším, a tím dojde pravděpodobně k vylití vody z břehů na dolním jezu v ř. km 32,495 a k ohrožení nejbližší okolní části města. Stav hladiny při průběhu průtočného množství  $Q_{100}$  bude překročen téměř o 1,2 m, než je navrhovaná kóta koruny hráze objektu. Výška hladiny na ponořeném prahu s předchozí variantou výsledku se liší o 1,1 m.

### Shrnutí

Na základě výsledků matematických modelů v programu HEC-RAS byly vytvořeny mapy záplavového území pro jednotlivé N-leté průtoky (obr. 6).

Podle výsledků lze konstatovat, že navržená protipovodňová opatření by měla být účinná proti  $Q_{20}$ . Povodně většího průtočného objemu vody než  $Q_{20}$  budou způsobovat záplavy a povodňové škody v přilehlých oblastech toku Úhlavy a v dolní okrajové části města Přeštice. Dále záplavové čáry, především pro  $Q_{50}$  a  $Q_{100}$ , by po realizaci navržených protipovodňových opatření byly posunuty blíže k vodnímu toku Úhlavy, a tím by došlo ke zmenšení záplavových území.

### Závěr

Současný stav ochrany před povodněmi je do jisté míry v České republice ovlivněn skutečností, že před rokem 1997 nebylo naše území poměrně dlouho postiženo povodní se skutečně katastrofálními následky na větší části území republiky. Tím došlo k podcenění nebezpečí vyplývajícího z možných povodní a toto podvědomí vedlo jednak ke zvýšení rizika škod při využívání území v údolních nivách a jednak k oslabení významu budování dalších preventivních opatření na ochranu před povodněmi. Prakticky úplně byly potlačeny možnosti využít netechnická preventivní opatření.

K největším nedostatkům v preventivní ochraně před povodněmi patří skutečnost, že záplavová území byla stanovena pouze podél malé části délky významných vodních toků. Podobně i komplexní systémový přístup k návrhům a realizaci preventivních technických a netechnických opatření nebyl prakticky uplatňován. Z tohoto důvodu jsou od roku 1998 za výrazné zahraniční spolupráce a pomoci zaváděny moderní metody matematického modelování povodňových vln a jejich průběhu s možností ověřovat nejen rozsah záplav, ale rovněž posuzovat účinnost uvažovaných opatření na ochranu.

S ohledem na zavádění moderních metod v hydrologii bylo potřeba provést posouzení navržených protipovodňových opatření také matematickým modelem.

Pomocí matematických modelů lze provádět řadu simulací proudící vody v průběhu povodní s kulminačními průtoky odpovídajícími N-letým vodám. Dále dokážou vyladit odtokové a hladinové poměry posuzované oblasti, např. průběh hladin, hloubek a velikost rychlostí proudící vody. Modely poskytují přehledné informace o charakteristickém proudění v libovolném místě modelové oblasti a umožňují provedení kvalifikované analýzy hydrologických poměrů v inundačním území při povodňových situacích.

Na základě výsledků je možné doporučit matematický model jako vhodný nástroj pro posouzení protipovodňových opatření na vodních tocích. Protipovodňová opatření jsou navržena podle posouzení proti průtočnému objemu vody  $Q_{20}$ .

Stupeň povodňové ochrany navržených protipovodňových opatření podle hydraulického posouzení je v souladu s Koncepcí ochrany vod Plzeňského kraje vzhledem k tomu, že navržená protipovodňová opatření v lukách u Příchovic mají za cíl ochránit spodní část města Přeštice, kde se nachází rozptýlená zástavba a zahrádkářská kolonie určená pro rekreační účely.

Dalším důvodem pro realizaci navržených protipovodňových opatření je zařazení města Přeštice a obce Příchovice do I. kategorie priorit realizace protipovodňových opatření v rámci Plzeňského kraje [3].

Zvýšení stupně protipovodňové ochrany je převážně veřejným zájmem. Zvolená míra zabezpečení nebude nikdy absolutní a souvisí nejen s technicko-ekonomickým hodnocením navržených opatření, ale i přípustnou mírou ovlivnění životního prostředí.

### Literatura

- [1] Studie proveditelnosti. Přeštice, inundační průlehy koryto v lukách u Příchovic a úpravy koryta Úhlavy ve městě Přeštice. Město Přeštice, 2008.



Obr. 6. Záplavové území po realizaci protipovodňových opatření

- [2] US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydrologic Engineering Center: HEC-RAS User's Manual [online]. USA. [cit. 17. 12. 2008]. Dostupné z: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-document.html>.
- [3] Koncepce ochrany vod – Studie protipovodňových opatření Plzeňského kraje. Plzeň, Portál Plzeňského kraje [cit. 19. 7. 2004]. Dostupné z <http://www.plzensky-kraj.cz/article.asp?itm=13712>.

Ing. Marie Lávičková, Ing. Radek Roub, Ph.D.  
KVHEM, FZP, ČZU

tel.: 224 382 153, e-mail: [roub@fzp.czu.cz](mailto:roub@fzp.czu.cz)

Příspěvek prošel lektorským řízením.

*The use of mathematical model for analysis of proposed flood-protection measures in meadows by Příchovice (Lávičková, M.; Roub, R.)*

### Keywords

*flood – flood-protection measures – mathematical model – Hec-Ras*

**The place of interest is situated on the Úhlava River in meadows by Příchovice near the town Přeštice. The proposal of flood-protection measures is contained in Territorial control documentation. The documentation was elaborated on the basis of hydraulic calculations and experiences from the flood in August 2002.**

**The mathematical model is practically used in the study of analysis of proposed flood-protection measures. The analysis is based on mathematical simulation of water outflow and water level on the Úhlava River. It is possible to use the non-commercial software Hec-Ras, version 3.1.1., for the simulation itself. One of the points of view of the possibility of using proposed flood-protection measures is total efficiency. The mathematical model is possible to use as a basis of support for realization of proposed flood-protection measures on the Úhlava River in meadows by Příchovice within the grant programme "Program prevence před povodněmi II" under the control of the Ministry of Agriculture.**

# POROVNÁNÍ CHEMISMU SRÁŽEK NA VOLNÉ PLOŠE A POD KORUNAMI STROMŮ

Petra Kubínová

## Klíčová slova

atmosférická depozice – chemismus – železo – mangan – rubidium – síra – throughfall

## Souhrn

V experimentálním povodí Lesního potoka ve středních Čechách byl sledován obsah vybraných prvků ve vzorcích srážek na volné ploše a pod korunami stromů (throughfall). Oba tyto typy atmosférické depozice se významně liší, neboť po kontaktu s nadzemní částí vegetace dochází zpravidla k obohacování chemického složení dopadajících srážek. Koncentrace většiny chemických komponent ve vzorcích srážek odebraných pod korunami stromů je tedy zpravidla vyšší než ve srážkách na volné ploše. Ovšem záleží i na chemickém charakteru daného prvku a na jeho roli v metabolismu dřevin. Pro studii tohoto vlivu vegetace na chemické složení atmosférické depozice byly vybrány prvky železo, mangan, rubidium a síra. Podle očekávání bylo potvrzeno zvýšení koncentrace Mn, Rb i S ve vzorcích srážek pod korunami stromů, zatímco látkové toky Fe se v jednotlivých druzích atmosférické depozice významně neliší. Mangan a rubidium jsou součástí metabolické výměny vegetace. Vyšší látkové toky síry ve throughfallu jsou způsobeny intenzivnější depozicí plyných forem. Na druhou stranu, původ železa v terigenním prachu ovlivňuje jeho obsah i ve srážkách na volné ploše.

## Úvod

Atmosférická depozice představuje hlavní vstup látek do ekosystému. V rámci monitorovacích projektů jsou obvykle rozlišovány dva typy padajících kapalných depozic – jednak srážky na volné ploše a jednak srážky odebrané pod korunami stromů (throughfall), přičemž chemismus obou těchto typů je výrazně odlišný. Vzorky throughfallu jsou obohacovány po kontaktu vertikální depozice s nadzemní částí vegetace. Obecně lze říct, že dochází především k intenzifikaci depozičních procesů v lesním porostu – a to jednak aktivně, kdy dochází k vyluhování rozpustných metabolitů, a jednak pasivně, kdy se projevuje mechanický vliv koruny (Fišák et al., 2006). Dále jsou vzorky podkorunových srážek zahušťovány procesem evapotranspirace (Skřivan et al., 2004). Na druhou stranu však může docházet i k ochuzování vzorků podkorunových srážek o některé prvky, jež jsou přijímány asimilačními orgány a následně translokovány do dalších částí dřevin (Hagemeyer and Lohrie, 1995).

Lesní vegetace tedy významným způsobem ovlivňuje chemické složení atmosférických srážek. Způsob a míra interakcí závisí i na chemickém charakteru prvku a na jeho roli v metabolismu dřevin. Podle charakteru prvku lze rozlišit čtyři následující skupiny:

- prvky biogenní či esenciální (např. Ca, K, Mg, Mn), jež jsou důležité pro některé metabolické funkce dřeviny (Skřivan et al., 2004);
- prvky neesenciální a přesto rostlinami přijímané a metabolizované (např. Ba, Rb, Sr), což je pravděpodobně způsobeno substitucí esenciálních prvků těmito jejich chemickými homology (Kabata-Pendias and Pendias, 2000);
- prvky vyskytující se převážně v plynné formě (např. Cl, F,  $N_{tot}$ ,  $SO_4$ ), adsorbované na povrchu asimilačních orgánů dřevin, srážkou smyté (Rea et al., 2001);
- prvky vyskytující se ve formách málo rozpustných a prvky toxické (např. Al, Be, Cd, Fe, Pb, Zn), rovněž jsou zachyceny na povrchu asimilačních orgánů, ovšem na zem se dostávají až s opadem (Fišák et al., 2006).

První tři skupiny prvků obohacují vzorky srážek pod korunami stromů aktivními či pasivními pochody, tedy loužením produktů metabolismu, resp. procesem rozpouštění zachycených plyných látek. Naopak skupina chemických prvků vyskytující se převážně v málo rozpustné formě vzorky throughfallu neobohacuje.

Je však nutné si uvědomit, že chemismus podkorunových srážek je dále ovlivněn i typem porostu. Jehličnaté porosty obvykle vykazují vyšší obohacení zejména biogenními, resp. esenciálními prvky. Na druhé straně listnaté porosty vykazují mírně nižší úroveň obohacení atmosférické depozice, jelikož relativní povrch jejich asimilačních orgánů je nižší než u jehličnatých stromů a jde

o opadavé dřeviny (tedy jejich asimilační orgány pokrývají korunu dřeviny jen přibližně 7–8 měsíců v roce).

Cílem této práce je vyhodnocení vlivu lesní vegetace na koloběh vybraných prvků v experimentálním povodí Lesního potoka ve středních Čechách. Byly vybrány prvky s rozdílným chemickým charakterem – Fe, Mn, Rb, S ( $S-SO_4^{2-}$ ), které zastupují všechny čtyři výše uvedené skupiny prvků, a porovnávají jejich látkové toky ve srážkách na volné ploše a pod korunami buku, resp. smrku za účelem ověření předpokládaného chování v různých typech atmosférické depozice.

## Metodika

Vzorky atmosférické depozice byly odebrány na experimentálních lokalitách ve středních Čechách, přibližně 30 km jihovýchodně od Prahy. Vzorky srážek pod korunami stromů byly odebrány přímo v experimentálním povodí Lesního potoka, které leží v NPR Voděradské bučiny. Jelikož je povodí zcela zalesněno, byly vzorky srážek na volné ploše odebrány cca 6 km SV směrem od povodí, na experimentální stanici FLD ČZU Truba a v arboretu ČZU.

Experimentální povodí má rozlohu 0,765 km<sup>2</sup>, jeho jižní hranice leží ve výšce 500 m n.m. a uzávěrný profil v severní části povodí se nachází ve výšce 406 m n.m. Průměrný roční úhrn srážek je 696 mm (Navrátil et al., 2003), přičemž průměrný úhrn podkorunových srážek na sledovaných lokalitách pro období let 1997–2009 je 409 mm v porostu buku a 437 mm v porostu smrku. Průměrná roční teplota je +9 °C (Navrátil et al., 2007).

Vzorky srážek byly odebrány v pravidelných měsíčních intervalech, a zahrnují tedy jak kapalnou, tak tuhou složku depozice. Podrobný popis odběru a zpracování vzorků popisuje Skřivan et al. (2000). Vzorky srážek byly analyzovány v laboratořích Geologického ústavu AV ČR metodou atomové absorpční spektrometrie (Varian SpectraAA 300), s plamennou atomizací (Mn) a elektrotermickou atomizací (Rb). Koncentrace Fe a S byly stanovovány metodou emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem ICP-OES (Thermo Elemental, Intrepid Duo).

Pro porovnání chemismu srážek na volné ploše a srážek pod korunami stromů byly na místo koncentrací jednotlivých prvků ve vzorku porovnávány jejich látkové toky (vyjádřené v  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$ ), jelikož tím je omezen vliv evapotranspirace. Pro korelační analýzu byla použita data od roku 1997 (v případě Fe a Mn), resp. od roku 2005 (v případě Rb, S).

## Výsledky a diskuse

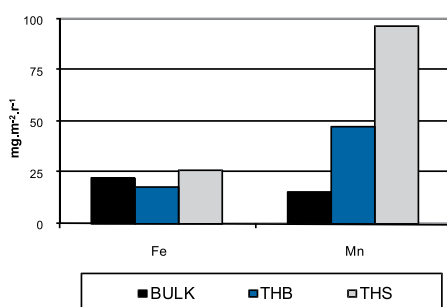
### Látkové toky ve sledovaných typech atmosférické depozice

Mangan je významným esenciálním prvkem, a je tedy důležitou součástí vnitřního koloběhu látek v dřevinách. Látkový tok Mn smrkovým throughfallem je přibližně 7x vyšší než jeho látkový tok srážkami na volné ploše (obr. 1). Tato zjištění již dříve popisovali Heinrichs a Mayer (1980). Pravděpodobně jde o souvislost s rolí Mn v metabolismu uhlovlíků a fotolýze vody (Fišák et al., 2006).

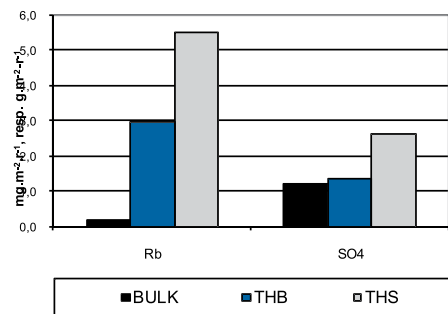
Naopak látkový tok Fe ve smrkovém throughfallu a ve srážkách na volné ploše není výrazně odlišný (obr. 1). Vzorky srážek na volné ploše obsahují více Fe než Mn, protože velké množství železa se vyskytuje i v terigenním prachu – ve formách jen málo rozpustných (Berg and Steinnes, 1997). Nižší hodnoty obsahu Fe ve vzorcích throughfallu jsou způsobeny zachytáváním prašných částic Fe na povrchu asimilačních orgánů. Tato nemetabolická část Fe je následně usazována s opadem asimilačních orgánů.

Za povšimnutí stojí i to, že obsah Fe v bukovém throughfallu je výrazně nižší než jeho obsah ve smrkovém throughfallu. Toto zjištění potvrzuje fakt, že Fe je rovněž do určité míry metabolického původu. Patrně může být rozdíl látkových toků Fe způsoben i rozdílnou mírou vyčesávání tuhého aerosolu oběma typy porostu.

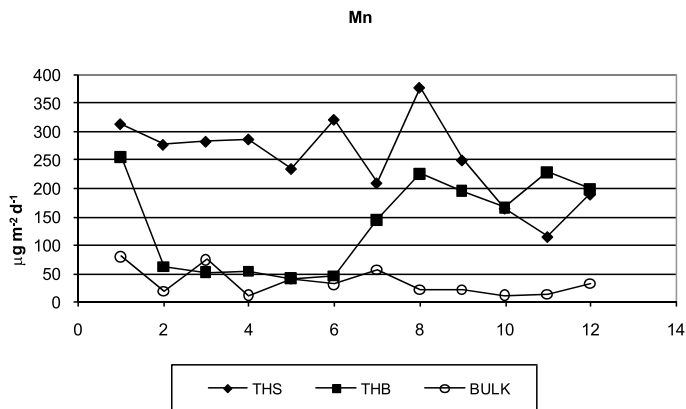
Podobně jako v případě Mn, i Rb a  $SO_4^{2-}$  vykazují vyšší látkové toky v podkorunových srážkách (obr. 2). Rubidium jakožto chemický homolog K je vegetací současně s ním přijímán (Kabata-Pendias and Pendias, 2000) a následně s dalšími produkty metabolismu přednostně vylučován, čímž dochází k výraznému obohacování srážek pod korunami dřevin.



Obr. 1. Průměrné roční látkové toky ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{r}^{-1}$ ) Mn a Fe ve vzorcích různých typů atmosférické depozice



Obr. 2. Průměrné roční látkové toky Rb ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{r}^{-1}$ ) a  $SO_4^{2-}$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{r}^{-1}$ ) ve vzorcích různých typů atmosférické depozice



**Obr. 3.** Sezonní trend látkových toků Mn v experimentálním povodí LP (průměrná data z období let 1997–2009)

Síra (vyjádřená jako S-SO<sub>4</sub>) vykazuje rovněž obohacení ve vzorcích throughfallu (obr. 2). To je dáno převažujícím výskytem S v ovzduší ve formě plynného SO<sub>2</sub>, jenž v prostředí relativně snadno oxiduje na SO<sub>3</sub>, resp. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Plynný SO<sub>2</sub> se preferenčně sorbuje na povrch asimilačních orgánů dřevin. Látkový tok S pod korunami smrku je téměř dvojnásobný v porovnání s látkovým tokem srážek pod korunami buku. Tento rozdíl je pravděpodobně způsobený větším specifickým povrchem asimilačních orgánů smrku anebo rozdílnou mírou vyčesávání korunami různých druhů porostů (jako je tomu v případě Fe).

#### Korelační analýza

Předpoklady o signifikantním rozdílu v chemismu srážek na volné ploše a pod korunami dřevin byly rovněž testovány korelační analýzou časových řad, porovnávacími jednotlivě srážky na volné ploše (BULK), srážky pod korunami smrku (THS) a srážky pod korunami buku (THB). Pro vyhodnocení závislosti jednotlivých látkových toků byla použita pouze data z vegetačního období. Data ze zimního období byla vyloučena, aby byl eliminován rozdíl v chemismu throughfallu opadavých a stálezelených dřevin.

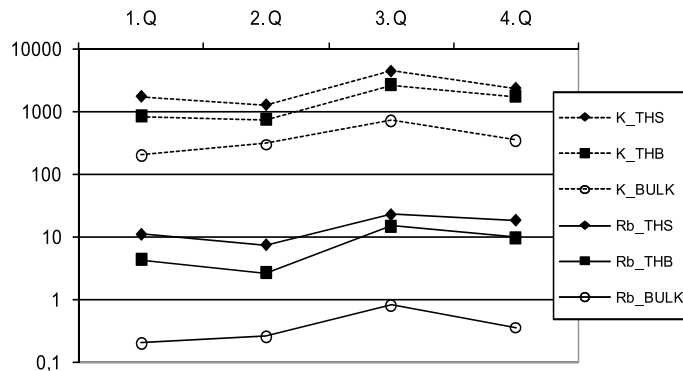
V případě Mn nebyl nalezen žádný vztah nebo souvislost mezi látkovými toky jednotlivých typů atmosférické depozice (tabulka 1). Toto zjištění naznačuje výrazný vliv metabolismu stromů na depozici Mn. Příjem Mn rostlinami je metabolicky kontrolovaný a jeho obsah v rostlinných tkáních je druhově specifický. Obecně lze říct, že vyšší koncentrace Mn vykazují mladé asimilační orgány než starší tkáně (Kabata-Pendias and Pendias, 2000). Mechanismus vyluhování metabolitů Mn u jehličnatých porostů je v průběhu roku více monotónní, zatímco příjem a vylučování Mn u opadavých porostů se v průběhu vegetačního období výrazně mění (obr. 3).

Rozdílný stupeň obohacení látkových toků Mn popisuje řada autorů (Navrátil et al., 2007; Heinrichs and Mayer, 1980). Navrátil et al. (2007) navíc konstatuje, že ve smrkovém porostu dochází v průběhu roku k výraznému zvýšení látkových toků Mn pod korunami smrku v období březnového nárůstu nových asimilačních orgánů a v červnu, kdy jehličnany kvetou. V průběhu vegetačního období je pak ve zmíněné studii patrný souvislý vzestupný trend látkových toků Mn v bukovém throughfallu.

Korelační analýza jednotlivých depozičních toků Rb naopak vypovídá o závislosti látkového toku srážek na volné ploše a pod korunami smrku i buku. Závislost mezi těmito dvěma typy atmosférické depozice je pravděpodobně dána velmi podobnými sezonními trendy v obsahu Rb v různých typech atmosférické depozice, kdy s nadcházejícím vegetačním obdobím vzrůstá obdobně koncentrace ve všech typech srážek (obr. 4). V grafu je na ose y (hodnoty látkového toku) použito logaritmického měřítka pro výstižnější postihnouti podobností mezi jednotlivými látkovými toky Rb a K.

Rubidium v atmosférické depozici je terigenního původu (výskyt převážně v K-živcích), většinou přirozeného charakteru (Atteia, 1994), ovšem obsah Rb je výrazně ovlivňován aerosolem organického původu (pyl, organická rezidua, gutace), resp. vyššími rostlinami, jež K ve velké míře metabolizují (Berg and Steinnes, 1997), což potvrzuje i vzestup obsahu Rb ve vzorcích atmosférické depozice s nástupem vegetačního období. Uvedená zjištění odpovídají i obdobným výsledkům pozorovaným u K (nepublikovaná data). Draslík je jedním ze základních nutrientů a stejně jako jeho homolog Rb je významně metabolizován vegetací a jako součást polétavého organického materiálu se pravděpodobně relativně snadno dostává i do vzorků srážek na volné ploše.

Relativně silná závislost byla nalezena rovněž mezi jednotlivými typy atmosférické depozice v případě SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (tabulka 1). Hlavním zdrojem síry je antropogenní činnost (Migliavacca et al., 2004). V blízkosti experimentálního území se nevyskytuje



**Obr. 4.** Sezonní trend látkových toků K (plná linka) a Rb (čárkovaná linka) v experimentálním povodí LP (průměrná data z období let 2000–2009)

žádný významný zdroj S (Vach et al., 2009), v oblasti se vyskytuje jen menší množství drobných zdrojů emitujících znečišťující látky (včetně S), bez převažujícího směru původu. Tento fakt může vysvětlovat podobnost depozičních látkových toků S v experimentálním povodí Lesního potoka. Zjištěná souvislost mezi látkovými toky S na volné ploše a pod korunami lesního porostu je velmi pravděpodobně ovlivněna charakterem receptorů plynných forem S. Jak již bylo řečeno, síra se v ovzduší vyskytuje převážně v plynné formě, jež má schopnost sorpce na pevný materiál. Srážky v lesním porostu jsou tedy smýváním těchto forem obohacovány, avšak pozitivní korelace naznačuje, že sezonní trendy látkových toků S jsou v obou typech atmosférické depozice srovnatelné. Je však nutné dodat, že s ohledem na nízký počet korelovaných párů by bylo vhodnější posuzovat souvislost látkových toků korelováním většího množství dat.

Dále byla nalezena silná korelace mezi látkovými toky Fe obou typů throughfallu. Toto zjištění potvrzuje předpoklad, že Fe přítomné v tuhém aerosolu je do jisté míry srovnatelně zachycováno různými druhy porostu. Vztah mezi látkovými toky Fe srážkami na volné ploše a oběma typy throughfallu je rovněž evidentní. Je to pravděpodobně způsobeno již zmíněným terigenním původem Fe ve vzorcích srážek. Je tedy zřejmé, že atmosférická depozice Fe je metabolismem dřevin ovlivněna jen nepatrně.

#### Závěr

Na základě porovnání chemického složení srážek na volné ploše a pod korunami lesního porostu bylo ověřeno předpokládané obohacení vzorků throughfallu v případě látkových toků Mn, Rb a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Mangan jakožto esenciální prvek je vegetací hojně využíván. Látkové toky Mn ve vzorcích podkorunových srážek jsou tedy významným způsobem obohaceny. Mezi jednotlivými typy atmosférické depozice Mn nebyla nalezena žádná závislost, což je velice pravděpodobně způsobeno odlišným načasováním fenologických fází v porostech buku a smrku.

V případě Rb je rovněž patrné významné obohacení podkorunových srážek, ovšem mezi jednotlivými látkovými toky různých druhů atmosférické depozice byla nalezena závislost. To je dáno preferenčním vylučováním Rb dřevinami a jeho výskytem v aerosolu organického původu, který může ovlivnit chemismus srážek i na volné ploše. Různá organická rezidua včetně pylu se totiž snadno dostávají i do větších vzdáleností od porostu a mohou tak ovlivnit chemismus srážek na volné ploše.

Obohacení ve vzorcích throughfallu vykazují rovněž látkové toky S, poněvadž se vyskytuje v ovzduší převážně v plynné formě jako SO<sub>2</sub>, který se adsorbuje na povrch asimilačních orgánů dřevin. Zjištěná souvislost mezi jednotlivými typy atmosférické depozice je zapříčiněna směrově nespecifickým charakterem zdroje S ve sledovaném území.

Naopak v případě Fe bylo potvrzeno, že loužení metabolitů není tím nejdůležitějším faktorem, jenž by ovlivňoval chemismus atmosférické depozice. Dominance terigenního charakteru zdroje Fe velmi podobně ovlivňuje chemické složení jak srážek na volné ploše, tak i srážek pod korunami lesních porostů.

**Tabulka 1.** Korelační analýza různých druhů atmosférické depozice pro Mn, Rb, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a Fe (*n* – počet korelovaných párů)

Mn	THB	THS	Rb	THB	THS	SO <sub>4</sub>	THB	THS	Fe	THB	THS
BULK	-0,21	0,17	BULK	0,72	0,64	BULK	0,85	0,84	BULK	0,51	0,55
	<i>n</i> = 38	<i>n</i> = 38		<i>n</i> = 18	<i>n</i> = 18		<i>n</i> = 10	<i>n</i> = 10		<i>n</i> = 38	<i>n</i> = 38
THB	1	0,06	THB	1	<b>0,95</b>	THB	1	0,76	THB	1	<b>0,93</b>
		<i>n</i> = 38			<i>n</i> = 18		<i>n</i> = 10	<i>n</i> = 10			<i>n</i> = 38

## Literatura

- Atteia, O. (1994) Major and trace elements in precipitation on western Switzerland. *Atmospheric Environment*, 28: 3617–3624.
- Berg, T. and Steinnes, E. (1997) Recent trends in atmospheric deposition of trace elements in Norway as evident from the 1995 moss survey. *The Science of the Total Environment*, 208: 197–206.
- Fišák, J., Skřivan, P., Tesař, M., Fottová, D., Dobešová, I., and Navrátil, T. (2006) Forest vegetation affecting the deposition of atmospheric elements to soils. Int. Conf. Biohydrology 2006 (Impact of biological factors on soil hydrology), Prague, 20–22. 9. 2006. *Biologia* (Bratislava), 61: 255–260.
- Hagemeyer, J. and Lohrie, K. (1995) Distribution of Cd and Zn in annual xylem rings of young spruce trees [*Picea abies* (L.) Karst.] grown in contaminated soils. *Trees*, 9: 195–199.
- Heinrich, H. and Mayer, R. (1980) The role of forest vegetation in the biogeochemical cycle of heavy metals. *Journal of Environmental Quality*, 9: 111–118.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2000) Trace elements in soils and plants. CRC Press, 413.
- Migliavacca, D., Teixeira, EC., Pires, M., and Fachel, J. (2004) Study of chemical elements in atmospheric precipitation in South Brazil. *Atmospheric Environment*, 38: 1641–1656.
- Navrátil, T., Shanley, JB., Skřivan, P., Krám, P., Mihaljevič, M., and Drahota, P. (2007) Manganese biogeochemistry in a central Czech Republic catchment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 186: 149–165.
- Navrátil, T., Vach, M., Norton, SA., Skřivan, P., Hruška, J., and Maggini, L. (2003) The response of a small stream in the Lesní potok forested catchment, central Czech Republic, to a short-term in-stream acidification. *Hydrology and Earth System Science*, 7: 411–422.
- Rea, AV., Lindberg, SE., and Keeler, GJ. (2001) Dry deposition and foliar leaching of mercury and selected trace elements in deciduous forest throughfall. *Atmospheric Environment*, 35: 3453–3462.
- Skřivan, P., Navrátil, T., Vach, M., Špičková, J. a Fottová, D. (2004) Vliv metabolitů lesní vegetace na chemismus throughfallu. Proceedings z konf. (eds Šír, M. a Tesař, M.) *Atmosférická depozice 2004*, 29. 6.–30. 6. 04, Tejmlov u Stach, s. 69–74.
- Skřivan, P., Minařík, L., Burian, M., Martinek, J., Žigová, A., Dobešová, I., Kvidová, O., Navrátil, T., and Fottová, D. (2000) Biogeochemistry of beryllium in an experimental forested landscape of the Lesní potok catchment in central Bohemia, CR. *Geolines* (Occasional Papers in Earth Sciences of the GLÚ AV ČR), 12: 41–62.

Vach, M., Skřivan, P., Rohovec, J., Fišák, J., Kubínová, P., and Burian, M. (2009) Inorganic pollutants in wet atmospheric deposition and the trajectories of their possible transport. *Water, Air, and Soil Pollution*, 196: 369–383.

Ing. Petra Kubínová, Ph.D.  
KVHEM, FŽP, ČZU  
kubinova@fzp.czu.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

*The comparison of bulk precipitation and throughfall chemistry (Kubínová, P.)*

### Keywords

atmospheric deposition – chemistry – iron – manganese – rubidium – sulfur – throughfall

**Monitoring of the element content in the samples of bulk precipitation and below tree canopies (throughfall) was carried out in an experimental catchment in central Bohemia. The chemistry of these two types of atmospheric deposition significantly differs, whereas contact with the above-ground parts of the forest stand generally enriches the falling precipitation. Content of the chemical components in the throughfall samples is usually higher than their content in the samples of bulk precipitation. However, important determining agent is also chemical character of the element and its role in the metabolism of woody plants. The presented study is focused on the comparison of the element fluxes of Fe, Mn, Rb and S. As was expected, enriched throughfall element fluxes were found in the case of Mn, Rb and also S. Manganese and Rb are the components of vegetation metabolic exchange. Higher element fluxes of S in throughfall are caused by more intense deposition of its gaseous forms. On the other hand, origin of Fe in terrigenous dust influences its content in bulk precipitation. The difference among individual types of atmospheric deposition is therefore not so evident in the case of Fe.**

## Konference HYDROMODE 2010

Ve dnech 14. a 15. září pořádala katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování FŽP ČZU studentskou konferenci HYDROMODE 2010. Konference se konala v prostorách vinařského střediska ČZU v Chloumku u Mělníka. Odborným garantem konference byl prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Účastníky konference byli studenti doktorských studijních programů a mladí vědeckí pracovníci. Na konferenci měla zastoupení Fakulta životního prostředí a Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze, Ústav nových technologií a aplikované informatiky TU v Liberci a Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy.

Odborná náplň konferenčních příspěvků přednesených první den byla věnována monitoringu hydrologických a hydraulických procesů v měřítku malých povodí, modelování proudění v půdním a horninovém prostředí. Hlavním řečníkem prvního dne konání byl Ing. Jiří Pavlášek, Ph.D., který vedl přednášku na téma „Monitoring hydrologických procesů v malých povodích“.

Druhý den byl tematicky věnován modelování atmosférických a hydrologických procesů a jejich regionalizaci. Hlavním řečníkem tohoto dne byl s přednáškou „Ensemble“ a predikce hydrologických procesů“ Ing. Petr Máca, Ph.D.

Vzhledem k projevenému zájmu si dovoluujeme upozornit na další ročník konference, který se bude konat na podzim roku 2011. Podrobnější informace bude možné nalézt na webových stránkách [www.kvhem.cz](http://www.kvhem.cz).

Na závěr uvádíme několik vybraných souhrnů příspěvků, které byly prezentovány účastníky.

### Změny srážkových extrémů na území ČR podle ensmbly regionálních klimatických modelů

Martin Hanel

V posledních letech byla publikována řada studií zabývajících se změnami srážkového režimu v důsledku změn klimatu. Bylo to umožněno zejména obecně dobrou dostupností výstupů regionálních klimatických modelů. Většina těchto studií se zabývala změnami průměrných srážek, nicméně v současnosti existuje i řada analýz vyhodnocujících změny srážkových extrémů, jež jsou často relevantnější pro plánování v oblasti vodního hospodářství. Publikované studie naznačují, že změny srážkových extrémů by mohly být značně odlišné od změn průměrných srážkových úhrnů, navíc jsou změny různé v různých ročních obdobích a pro různé doby trvání. Je rovněž známo, že modelování klimatu je zatíženo značnou nejistotou, z toho důvodu je nezbytné uvažovat větší množství regionálních klimatických modelů.

V této studii je prezentována systematická analýza změn sezonních a ročních srážkových extrémů o době trvání od jednoho do třiceti dní na základě výstupů řádově desítky regionálních klimatických modelů pro ČR pro období 1961–2099. Srážkové extrémy jsou modelovány pomocí zobecněného rozdělení extrémních hodnot s časově proměnnými parametry. Pravděpodobnost detekce změn srážkových extrémů v případě jednotlivých grid boxů je malá, proto je využito regionální analýzy, jež předpokládá, že nejméně nejisté parametry rozdělení extrémů jsou v určité oblasti prostorově konstantní. Podobně předpokládáme, že změny jednotlivých parametrů jsou v dané oblasti konstantní. Nejistoty jsou odhadovány pomocí resamplingu metodou bootstrap.

Kromě dlouhých dob trvání v kombinaci s krátkými dobami opakování v letním období srážkové extrémy rostou mezi obdobími let 1961–1990 a 2070–2099 pro všechna roční období. V létě a v zimě je nárůst nižší pro delší doby opakování. Pro jaro a podzim jsou změny komplexnější. Nejistoty odhadů změn srážkových extrémů jsou nicméně značné.

### Fractured network fluid flow – the influence of mechanical stress on the hydraulic properties

Jiří Havlíček, Milan Hokr

The paper deals with issues including the effect of mechanical stress in the calculation of the flow in fractured rock. Calculations are performed on a model 2D discrete fracture network defined in the framework of the international project Decovalex-2011. This task is in hydraulic point of view very inhomogeneous and dominant fractures provide the vast majority of the flow. Under the hypothesis the active stress on a fracture will reduce its aperture and the hydraulic conductivity drop. In suitably oriented fractures due to external stress the aperture along with hydraulic conductivity increases. This gives rise to even greater inhomogeneity in the hydraulic characteristics of the task.

The method used is based on analytical calculation of stress and strain for individual fractures, including the influence of the geometric location of fractures to external stress, non-linear stress-deformation relation for fractures and mechanical properties of the surrounding rock. In the normal direction it means a nonlinear hyperbolic dependence of aperture changes on the pressure. In the tangential direction it is the elasto-perfectly plastic model with Mohr-Coulomb strength condition, causing the aperture opening in the normal direction (dilation) due to plastic tangential displacement.

Influence of stress is evaluated in terms of equivalent hydraulic conductivity of rock blocks in the form of flux distribution along the border. The results for different variations of material parameters and defined

a number of external mechanical stress are compared. The results provided clear confirmation of the increase in hydraulic conductivity in the direction of stronger mechanical loads. Moreover, it appears that the method of calculating the mechanical load we used in the calculation of flow gives results comparable with more complex methods.

## Porovnání laboratorních metod měření retenčních křivek půdy

**Martina Vičková, Veronika Benešová, Jiří Pavlásek, Pavel Pražák**

Hydraulické charakteristiky půdy, jako jsou retenční křivky, jsou velmi důležitými veličinami pro informaci o přístupnosti vody pro rostliny a jsou rovněž důležitými vstupními hodnotami pro modelování pohybu vody v půdě. Dosud nejznámější a nejvíce používanou laboratorní metodou měření retenčních křivek je gravimetrická odtoková metoda podle Richardse a Weavera, která je rovněž součástí mezinárodní normy ISO 11274 Soil quality – Determination of the water retention characteristic – Laboratory methods. Tato metoda se doposud považuje za nejpřesnější, její nevýhodou je však celkem zdlouhavé získávání rovnovážných vlhkostí půd při daném sacím tlaku. Takové měření při dostatečném počtu tlakových kroků může trvat půl roku i více. V roce 1968 byla vyvinuta další metoda měření retenčních křivek, a to výparná.

Výparná metoda oproti odtokové vyžaduje pro získání výsledků mnohem kratší čas, řádově týdny, nevýhodou je však omezení sacích tlaků do max. 5 bar, bod vadnutí se pak dopočítává např. podle rovnice van Genuchtena. V naší práci jsme porovnali výsledky obou těchto metod při použití pískových boxů a přetlakových extraktorů pro odtokovou metodu, a ku-pF přístroje od firmy UGT GmbH z Münchebergu pro metodu výparnou. Výsledky měření byly porovnány u 80 vzorků půdy ze 4 lokalit ČR.

## Vývoj Chimery, prostředí pro konceptuální hydrologické modelování

**Stanislav Horáček**

Hydrologické modely jsou pro použití přichystány ve formě softwarových aplikací, které však zpravidla zahrnují pouze určitý model (případně jeho varianty). Porovnání různých modelů pomocí více aplikací je nejen pracné, ale kvůli nejednotnosti použitých postupů (numerické řešení, optimalizační algoritmus) také problematické. Efektivními nástroji pro vzájemné srovnání jsou proto prostředí pro hydrologické modelování, která umožňují provést výpočty různými modely v rámci jedné aplikace a za použití jednotných postupů.

Mezi prostředí zaměřená na konceptuální hydrologické modelování patří Chimera, ucelený koncept vytvořený Paulem Torfsem z Wageningen University v Nizozemsku. V tomto prostředí je model určen konfigurací a vlastnostmi prvků, z nichž základními jsou toky a nádrže. Na definici výrazů charakterizujících jednotlivé prvky jsou kladena minimální omezení, proto je možno sestavit široké spektrum modelů zahrnující většinu tradičně používaných. Dále Chimera odlišuje od ostatních prostředí ryze analytický způsob výpočtu citlivosti výstupů na parametry modelu.

Příspěvek se zabývá převodem konceptu Chimery do podoby softwarové aplikace. Chimera byla napsána v programovacím jazyku C++ s využitím standardních knihoven. Nízkoúrovňové vlastnosti tohoto jazyka zajišťují dostatečnou výpočetní efektivitu, zatímco objektově orientovaný přístup je vhodný z hlediska reprezentace dílčích prvků i celých modelů. Klíčovou vlastností je schopnost práce se symbolickými algebraickými výrazy (jejich

vyhodnocování a určování derivací), kterou zajišťuje knihovna GiNaC. Pozornost byla věnována také pozorovaným a modelovaným veličinám, byla navržena vhodná třída pro uchovávání jejich hodnot a efektivní manipulaci s nimi.

Funkčnost Chimery byla průběžně ověřována na teoretických a praktických příkladech, zaměřených na jednotlivé vlastnosti prostředí. Správnost řešení byla ve většině případů kontrolována srovnáním s analytickým řešením, zvláště pak pro zjišťování citlivosti modelu.

Použitelnost prostředí lze výrazně zvýšit rozhraními, která usnadňují zadání vstupů, zpracování výstupů a jejich zobrazení. Proto byla pro Chimera vytvořena rozhraní využívající možnosti jazyků vyšší úrovně – jednak skriptovací konzole pro jazyk Lua, jednak propojení se statistickým prostředím R (s využitím knihovny Rcpp)

Chimera a její rozhraní byly vyvíjeny jako otevřený a multiplatformní software s možností dalšího rozšiřování a úprav. Softwarové balíčky jsou k dispozici na webových stránkách projektu, kde se nachází i podrobný manuál a množství příkladů.

## Comparative analysis of CALPUFF modeling and traditional simulation techniques for air pollution assessment

**Duong Van Minh**

The technical report demonstrates an inter-comparison of three global used atmospheric dispersion simulations, ISCST3, AERMOD, and CALMET/CALPUFF, in order to provide a reasonable evaluation of the model abilities and disadvantages. Initially, the ISC model is applied to estimate the local emission effects, where AERMOD is used for a better determination of potential dispersion in the 20 km scale.

For long-range transport, when the domain is decided to extend at least 100 km from the emission source, CALPUFF is proposed to investigate other significant instantaneous sources. Sensitivity analysis considers the short-term and annual ambient air predictions for NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and PM<sub>10</sub>, providing actual feedback to minimize the pollutant impacts complying the National Ambient Air Quality Standard system. The animation sequence is discussed against conventional illustration of contoured maximum ground level concentrations to provide a more public convincing demonstration.

In further objective, the CALPUFF ability to use input data from CALMET processor in the refined mode, which produces a gridded 3-dimensional flow fields, as well to incorporate with ISCST3 meteorological fields is investigated for a better complex meteorology handling. A comparative analysis in predictions from the different simulation is addressed in order to illustrate the advantages of a puff dispersion approach in the complex condition. The results of CALPUFF have been shown to be similar to AERMOD and better and ISCST3. However, the use of CALPUFF as a single model for dispersion estimating is recommended, regarding to its significant effects, include more realistic dispersion representation, reduce overestimation, and better performance of air pollutant impacts.

**Petra Kubínová, Vojtěch Havlíček**  
KVHEM, FZP, ČZU



**VODOHOSPODÁŘSKÉ  
TECHNICKO-EKONOMICKÉ  
INFORMACE**

**Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti  
vodního hospodářství**

**Redakční rada:** RNDr. Dana Baudišová, Ph.D., Ing. Šárka Blažková, DrSc., Ing. Petr Bouška, Ph.D., prof. Ing. Alexander Grünwald, CSc., doc. Ing. Aleš Havlík, CSc., prof. Ing. Pavel Pitter, DrSc., prof. RNDr. Alena Sládečková, CSc., prof. Ing. Jiří Zezulák, DrSc.  
Ohlasy na články je možno zasílat redakci VÚV T.G.M., v.v.i.

**Ročník 52**

Kontakt: Mgr. S. Garciova  
Tel.: 220 197 282, e-mail: garciova@vuv.cz

**ISSN 0322 - 8916  
MK ČR 6365**



**Výzkumný ústav  
vodohospodářský  
T. G. Masaryka, v.v.i.  
Podbabská 30  
160 00 Praha 6  
IČO 00020711**