

**Aktuální výsledky  
současného  
hydrologického výzkumu**



## VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

### AKTUÁLNÍ VÝSLEDKY SOUČASNÉHO HYDROLOGICKÉHO VÝZKUMU

Výzkumná činnost oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v.v.i., se v posledních letech stále více orientuje na analýzu dopadu klimatické změny na vodní zdroje České republiky. Jde o celý komplex problémů souvisejících se strategickými zájmy státu a společnosti při ochraně obyvatelstva před nežádoucími účinky vod a jejich nedostatku a při zajišťování kvalitních zdrojů pitné vody.

Zaznamenané změny a trendy a také častější výskyty extrémních hydrologických situací vyžadují nové metodické i odborné přístupy pro analýzu hydrologických a klimatologických dat i pro formulaci závěrů důležitých pro společnost, a to při respektování legislativních požadavků českého právního řádu i legislativy Evropské unie. Potřeba řešení navrhovaných oddělením hydrologie VÚV TGM, v.v.i., je dokladována postupně se rozšiřující podporou ústředních orgánů, vedle tradiční podpory Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zemědělství jde nově i o bezpečnostní výzkum Ministerstva vnitra a výzkum podporovaný Technologickou agenturou České republiky. Mnohé závěry probíhajících výzkumů jsou směřovány i k návrhům na úpravu legislativního stavu, především ke zvládnutí důsledků sucha, kterým se platné předpisy zabývají mnohem méně než řešením problematiky povodní.

Nezanedbatelnou součástí výzkumných aktivit je i mezinárodní spolupráce, která vhodně usměrňuje jednotlivé výzkumné aktivity do hlavního proudu mezinárodního výzkumu a konfrontuje dosahované výsledky s obdobnými aktivitami v zahraničí. Lze jmenovat např. expertní skupinu Water Scarcity and Droughts, která je jednou z pracovních skupin Společné implementační strategie Rámcové směrnice pro vodní politiku Evropské unie. Další zahraniční podněty a diskuse na daná témata probíhají uvnitř projektu FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data), na němž se pracovníci oddělení aktivně podílejí. Odrazem vysoké odborné úrovně činnosti oddělení je široká publikační aktivita jeho členů, včetně článků v zahraničních recenzovaných a impaktových časopisech a příspěvků na prestižních mezinárodních konferencích.

V tomto čísle časopisu VTEI jsou prezentovány některé výsledky z aktuálních výzkumů. Největší podporou v minulém období bylo financování výzkumu Ministerstvem životního prostředí prostřednictvím výzkumného záměru MZP0002071101 Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů, který v letošním roce končí. Dále uvedené články souvisejí především s částmi výzkumného záměru „Vývoj matematických modelů hydrologické bilance, identifikace jejich parametrů a ověřování experimentálním výzkumem“ a „Dopady klimatických a antropogenních změn na vodní režim a přírodní prostředí“, zahrnuté do oddílu A (hydrologie), obsahují ale i výsledky z dalších podporovaných výzkumných projektů.

Z článku **Testování indikátorů sucha a nedostatku vody navrhovaných Evropskou komisí na pilotním povodí ČR** vyplývá, že snaha definovat jednotné

indikátory sucha v měřítku Evropské unie není snadno dosažitelný cíl, protože v různých zemích EU je různá úroveň podrobnosti dat o užívání vody v povodích a o hydrologické bilanci, stejně jako jiný charakter klimatu a jeho probíhajících změn. V České republice jsou tyto informace a trendy velmi dobře zmapovány, především díky dlouhé tradici plánování v oblasti vod a platné legislativě. Ukazuje se tak, že ve vodohospodářské praxi budou mnohem lépe využitelné indikátory sucha vyvíjené na národních úrovních.

Příspěvek **Metodika pro stanovení N-letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními** se věnuje důležitému aspektu u povodí, kde se v posledních letech ve větší míře prováděla různá protipovodňová opatření, čímž se částečně změnila hydrologická poměry povodí. Použití neovlivněných N-letých průtoků pro některé účely, například pro zpracování záplavových území, je nelogické. Článek shrnuje vyvinutou metodiku pro stanovení N-letých průtoků ovlivněných účinkem protipovodňových opatření, zejména nádrží s retenčním účinkem, popisuje výběr vhodných průtokových dat, výpočetní postup a způsob interpretace výsledků.

V článku **Rekonstrukce kulminačního průtoku historické povodně z 23. května 1908 na vodním toku Doubrava** je pomocí hydraulického modelu říční sítě HEC-RAS zpracována problematika historicky největší zaznamenané povodně na řece Doubravě. Model ukázal, že kulminační průtok vypočtený těsně po povodni a uváděný v historických dokumentech byl nadhodnocen až o 50 m<sup>3</sup>/s.

Příspěvek nazvaný **Validace generátoru srážek a teploty pro simulaci hydrologické bilance na povodí Chrudimky** se zabývá postupy statistického generování velmi dlouhých časových řad srážek a teploty a validací vybraných charakteristik generovaných srážek, teploty a simulovaných průtoků (simulace hydrologické bilance prováděná pomocí modelu Bilan) vzhledem k reálným pozorovaným datům, a to na modelovém povodí Chrudimky. Výsledky ukazují, že statistický generátor je dále dobře využitelný pro vodohospodářské aplikace.

Autoři článku **Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu BILAN** se zabývají komplikovanou problematikou stanovení potenciální evapotranspirace jako důležité součásti hydrologické bilance území. Na 13 různých povodích srovnávají dvě používané metody, které mají odlišnou náročnost na vstupní data. Jako vhodnější se jeví testovaná metoda, vyžadující pro výpočet potenciální evapotranspirace pouze změřené teploty. Metoda byla začleněna do modelu hydrologické bilance BILAN, obsahem tohoto příspěvku je také popis jeho nové softwarové aplikace.

Zajímavým tématem se zabývá článek **Eliminace ovlivnění průtoků pomocí propojeného modelu hydrologické a vodohospodářské bilance**. Snaží se metodicky podchytit a společně využít různé většinou separátně zpracovávané bilance pro komplexnější analýzu průtoků v povodí, a tak zpřesnit popis zachycených jevů.

RNDr. Josef Datel, Ph.D.  
VÚV TGM, v.v.i.

### TESTOVÁNÍ INDIKÁTORŮ SUCHA A NEDOSTATKU VODY NAVRHOVANÝCH EVROPSKOU KOMISÍ NA PILOTNÍM POVODÍ ČR

Magdalena Mrkvičková, Radek Vlnas, Adam Beran

#### Klíčová slova

meteorologické sucho – hydrologické sucho – agronomické sucho – nedostatek vody – standardized precipitation index – standardized runoff index – water exploitation index

#### Souhrn

V rámci Společné implementační strategie Rámcové směrnice pro vodní politiku je připravována sada indikátorů sucha, která by měla sloužit

např. pro sestavování map ohrožení suchem na celoevropské úrovni, pro přípravu plánů pro zvládnutí sucha, přípravu systémů včasného varování před suchem atd. Vybrané indikátory byly testovány pro podmínky České republiky na pilotním povodí – povodí Moravy. Z výsledků testování vyplynula doporučení směřovaná na zlepšení vypovídací schopnosti zvolených indikátorů. Závěrem testování bylo konstatováno, že díky platné legislativě ve vodním hospodářství v ČR jsou k dispozici data, jež umožňují hodnotit stav sucha a nedostatku vody na našem území podrobněji než indikátory navrhované na evropské úrovni.

#### 1 Úvod

Rozhodujícím dokumentem, který odstartoval aktivity směřující k lepšímu zvládnutí období sucha a nedostatku vody na celoevropské úrovni, je Sdělení Evropské komise Evropskému parlamentu a Radě Evropy o nedostatku vody a sucha v Evropské unii (EK, 2007a), které bylo přijato v roce 2007. Sdělení obsahuje sedm hlavních strategických kroků pro předcházení výskytu nedostatku vody a pro lepší připravenost na období sucha. Tyto kroky

zahrnují zavádění účinné cenové politiky ve vodním hospodářství, rozumné územní plánování ve vztahu k dostupným vodním zdrojům a jejich ochrání, zlepšování managementu rizik spojených se suchem a nedostatkem vody, rozšiřování stávající vodohospodářské infrastruktury v návaznosti na provedená úsporná opatření v oblasti odběrů vody, zavádění technologií a postupů s nízkou spotřebou vody, vytváření návyku šetření vodou a jejího efektivního užívání v Evropě a v neposlední řadě zlepšování dostupných informací o suchu po celé Evropě.

Naplňování posledního ze zmíněných strategických bodů Sdělení je úkolem expertní skupiny „Water Scarcity and Drought“, která je jednou z pracovních skupin Společné implementační strategie Rámcové směrnice pro vodní politiku. Skupina by měla vybrat vhodné indikátory sucha a nedostatku vody, které budou relativně jednoduché a použitelné v celoevropském měřítku. Na jejich základě by mělo být možné např. připravovat plány pro zvládnutí sucha či sestavovat mapy ohrožení suchem a nedostatkem vody. Indikátory by měly sloužit i jako podklad pro systém včasného varování před suchem a nedostatkem vody.

Pojmem sucho se zde rozumí přirozený jev, který nastává při dočasném poklesu průměrně dostupných zdrojů vody. Pro sucho je charakteristický jeho pozvolný začátek, značný plošný rozsah a dlouhé trvání. Nedostatek vody označuje situaci, kdy vodní zdroj není dostatečný pro uspokojení dlouhodobých průměrných požadavků na vodu (EK, 2007b). Podle toho, jaké části hydrologického cyklu jsou suchem zasaženy, je možné rozlišovat sucho meteorologické, agronomické a hydrologické. V případě, že dochází k dopadům sucha na společnost, je tato fáze označována jako sucho socioekonomické. Indikátory sucha a nedostatku vody, které byly vybrány k testování na celoevropské úrovni, jsou popsány v kapitole 2.

Problematika zlepšování managementu rizik spojených se suchem a nedostatkem vody a zlepšování informovanosti veřejnosti o stavu sucha a nedostatku vody je paralelně řešena i na národní úrovni. Indikátory vybrané expertní skupinou byly testovány na pilotním povodí Moravy a výsledky byly porovnávány s výsledky indikátorů vyvíjených na národní úrovni. Data použitá pro testování jsou popsána v kapitole 3. Výsledky testování indikátorů na našem území jsou uvedeny v kapitole 4. Podle výsledků testování byla vypracována doporučení pro expertní skupinu, která jsou shrnuta v kapitole 5.

## 2 Vybrané indikátory sucha a nedostatku vody

### 2.1 Indikátory meteorologického sucha

Pro popis vývoje a výskytu meteorologického sucha byl vybrán indikátor sněhové pokrývky a indikátor SPI (Standardized Precipitation Index). Indikátor sněhové pokrývky vyjadřuje dobu opakování, s jakou se v dlouhodobém průměru vyskytne den s danou vodní hodnotou sněhu. Indikátor sněhové pokrývky byl zvolen především pro svůj předpovědní charakter. Malá sněhová pokrývka v zimním období indikuje vyšší riziko výskytu hydrologického sucha v následující části hydrologického roku. Tato skutečnost však neplatí obecně. Při malé nebo nulové sněhové pokrývce během zimního období nemusí k suché epizodě dojít, pokud se srážky vyskytují ve formě deště. Indikátor sněhové pokrývky pro povodí Moravy nebyl předmětem testování.

Indikátor SPI byl popsán v pracích McKee et al. (1993) nebo Viziny et al. (2010). Jedná se o indikátor, který statistickým přístupem hodnotí odchylku srážek za určité klouzavé období (s délkou od 1 do 48 měsíců) oproti dlouhodobému normálu. Srážkové úhrny jsou transformovány pomocí vhodného teoretického rozdělení pravděpodobnosti na data s normálním rozdělením. Pro stanovení kumulativní pravděpodobnosti překročení srážek

na povodí Moravy bylo využito gamma rozdělení. S využitím inverzní funkce ke kumulativní distribuční funkci normálního rozdělení s průměrem 0 a směrodatnou odchylkou 1 jsou pak hodnoty kumulativní pravděpodobnosti převedeny na normalizované hodnoty SPI. Index SPI tedy vyjadřuje odchylku srážky v daném měsíci od normálu, který odpovídá mediánu řady transformované pomocí gamma rozdělení. Normalizace hodnot SPI umožňuje vzájemně porovnávat různá povodí s odlišnými hydrologickými poměry. Pro hodnoty indikátoru SPI byly navrženy meze jednotlivých stavů sucha od extrémního sucha ( $SPI < -2$ ) až po extrémně vlhké období ( $SPI > 2$ ) (McKee et. al., 1993), které jsou uvedeny v tabulce 1.

Pro sestavování map znázorňujících plošné rozložení deficitu (přebytku) srážek na povodí bylo expertní skupinou doporučeno nejprve stanovit hodnoty indikátoru v jednotlivých stanicích a následně pak provést plošnou interpolaci pomocí metody vážených inverzních vzdáleností „Inverse distance weighting“.

### 2.2 Indikátor agronomického sucha

Přetrvává-li meteorologické sucho dostatečně dlouho, dojde k vyčerpání zásoby vody v půdě a nastává tzv. agronomické sucho. Pro popis agronomického sucha byl expertní skupinou zvolen indikátor vyjadřující podíl fotosynteticky aktivního záření pohlceného vegetací fAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation). Hodnota veličiny je stanovována na základě výsledků dálkového průzkumu Země pro celou Evropu v desetidenním časovém kroku. Hodnoty indikátoru jsou zpracovávány agenturou European Space Agency a jsou publikovány na webovém portálu European Drought Observatory (<http://edo.jrc.ec.europa.eu>), indikátor tedy nebyl předmětem bližšího testování.

### 2.3 Indikátor hydrologického sucha

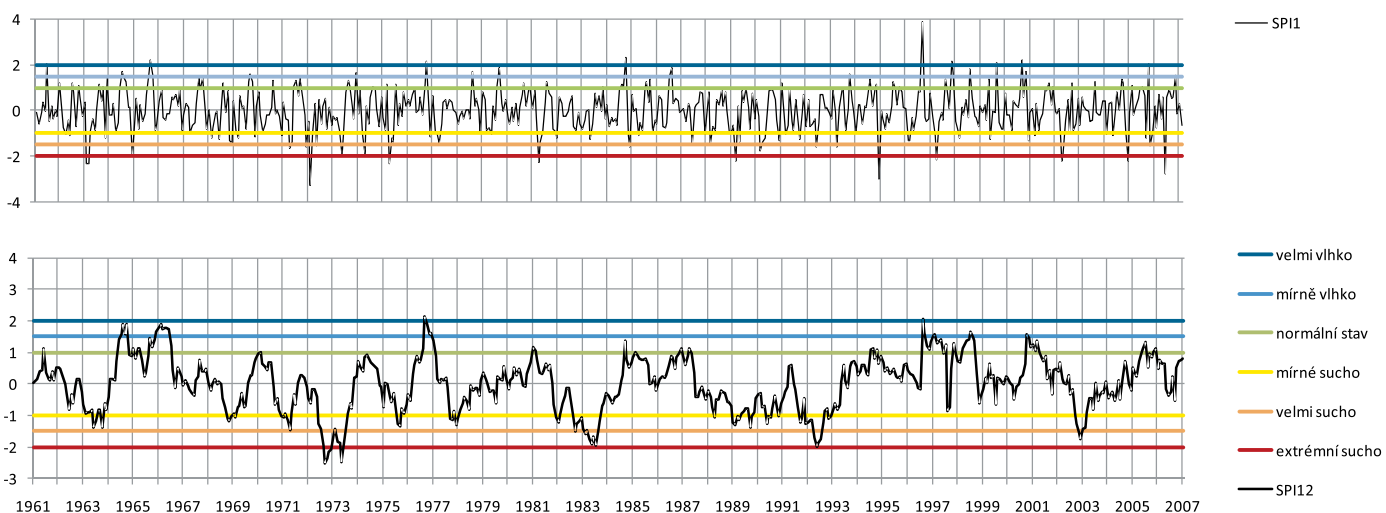
Pro hodnocení hydrologického sucha ve vodních tocích byl zvolen indikátor SRI (Standardized Runoff Index), který se stanovuje analogicky jako indikátor SPI. SRI tedy popisuje míru odchylky pozorovaného průtoku (nebo klouzavých průměrů průtoků) od normálního stavu, jenž odpovídá mediánu řady aproximované vybraným teoretickým rozdělením pravděpodobnosti.

### 2.4 Indikátor nedostatku vody

Pro hodnocení nedostatku vody v povodí nebo dílčím povodí by měl sloužit indikátor WEI+, což je modifikovaná verze indikátoru užívání vody WEI (Water Exploitation Index). WEI+ představuje podíl celkového ročního odběru vody (A) k dlouhodobému průměru dostupných obnovitelných sladkovodních zdrojů (RWA – Renewable Water Availability), viz rovnice 1. Hodnota obnovitelných vodních zdrojů (RWA) je odhadována na základě rovnice 2, kde IF představuje objem vlastního průtoku (Internal Flow), který se stanovuje jako rozdíl objemu srážek spadlých na ploše povodí (P) a objemu územního

**Tabulka 1.** Mezní hodnoty indikátoru SPI (případně SRI) pro vyhodnocení množství vody na povodí

Hodnota SPI, SRI	Stupeň sucha	Pst události [%]
$SPI \geq 2,00$	extrémně vlhko	2,3 %
$1,50 < SPI \leq 2,00$	velmi vlhko	4,4 %
$1,00 < SPI \leq 1,50$	mírně vlhko	9,2 %
$-1,00 < SPI \leq 1,00$	normální stav	68,2 %
$-1,50 < SPI \leq -1,00$	mírně sucho	9,2 %
$-2,00 < SPI \leq -1,50$	velmi sucho	4,4 %
$SPI < -2,00$	extrémně sucho	2,3 %



**Obr. 1.** Průběh hodnot indikátoru SPI v období 12/1961 až 12/2007 pro srážky interpolované na povodí Moravy, horní graf zachycuje hodnoty SPI 1, dolní graf hodnoty SPI 12

výparu (Eta), EF představuje veličinu objemu aktuálního vnějšího přítoku (Actual External Flow), R (Returned Water) představuje objem vody vypuštěné zpět do povrchových nebo podzemních vod a WR (Water Requirements) je minimální objem vody potřebný pro uspokojení požadavků na zajištění ekologických průtoků a naplnění závazků mezinárodních smluv.

$$WEI+ = A/RWA \quad (1)$$

$$RWA = IF + EF + R - WR \quad (2)$$

### 3 Data

Pro testování indikátoru SPI pro povodí Moravy byla využita data interpolovaná ze staniční sítě do sítě s pravidelným gridem 25 x 25 km v denním kroku za období leden 1961–prosinec 2007 (Štěpánek et al., 2011). Pro výpočet indikátoru SRI byly použity hodnoty průtoků v měsíčním kroku za období leden 1971 až prosinec 2002 ve stanici Strážnice a za období leden 1979 až prosinec 2009 ve stanici Lanžhot. Pro testování indikátoru WEI+ byla použita data z hydrologické bilance v měsíčním kroku za období 2005–2009 pro bilanční profil Strážnice. Pro účely prvotního testování vypovídacích schopností indikátorů nebylo požadováno společné testovací období pro všechny indikátory.

## 4 Výsledky

### 4.1 Výsledky testování indikátoru meteorologického sucha SPI na povodí Moravy

Nejprve byly stanoveny hodnoty indikátorů SPI 1, SPI 3, SPI 6 a SPI 12, kdy hodnota 1 až 12 odpovídá délce období v měsících pro výpočet klouzavého průměru srážek. Výsledné hodnoty SPI 1 a SPI 12 získané pro srážky interpolované pro celé povodí Moravy jsou vykresleny na obr. 1. Z průběhu hodnot SPI 12 je patrná určitá periodičita ve výskytu sucha s délkou periody přibližně deset let, kdy extrémní sucho bylo indikováno v letech 1973 a 1974, 1984, 1993 a 2003. Tento jev byl popsán rovněž ve zprávě k projektu VaV č. SP/1a6/125/08 Časová a plošná variabilita sucha v České republice (Novický et al., 2010).

Nejvýraznější periodou sucha v posuzované řadě bylo období let 1972 až 1974. Pro toto období jsou na obr. 2 vykresleny výsledky SPI 1 až SPI 12. Minimální hodnota indikátoru SPI 1 za celé období (-3,3) byla dosažena v prosinci roku 1972. Následoval březen roku 1973 s hodnotou nižší než -1,5. Přestože v dalších měsících ležely hodnoty SPI 1 v mezích normálu, propagoval se vliv sucha v zimě a na jaře dále do hodnot indikátorů SPI 3, SPI 6 i SPI 12. Rok 1974 přinesl další výrazné podnormální srážkový úhrn v březnu. Obrázek 2 ukazuje, že meteorologické sucho ve své podstatě reprezentuje pouze indikátor SPI 1. Ostatní verze indikátoru již popisují spíše sucho agronomické (SPI 3) nebo indikují sucho hydrologické (SPI 6, SPI 12).

Hodnoty SPI 1 stanovené v jednotlivých grid-bodech použité výpočetní sítě byly interpolovány nejprve metodou vážených inverzních vzdáleností (IDW) a dále metodou Topo to Raster, která je součástí nadstavby ArcGIS – Spatial Analyst. Výsledky získané pro měsíc únor v roce 2003 jsou prezentovány na obr. 3. Při aplikaci metody IDW dochází ke vzniku soustředných izoliní kolem stanic, což neodpovídá skutečnému rozložení srážek, a tedy ani rozložení příslušných hodnot indikátoru SPI. Pro interpolaci hodnot SPI by bylo vhodnější použít metody orografické interpolace, která využívá regresních vztahů mezi nadmořskou výškou a srážkovým úhrnem (Šercl, 2008). Metoda však není běžně součástí GIS aplikací. Jako další možnou metodu, která zpravidla vhodně reprezentuje rozložení srážek po povodí, uvádí Šercl metodu Topo to Raster. Ta slouží primárně k vytváření hydrologicky reálných digitálních modelů terénu z bodových hodnot nadmořských výšek nebo vrstevnic se známou nadmořskou výškou. Dané vlastnosti lze rovněž využít při interpolaci srážek (nebo veličin ze srážek odvozených) z bodových hodnot do plochy povodí.

### 4.2 Výsledky testování indikátoru hydrologického sucha SRI na povodí Moravy

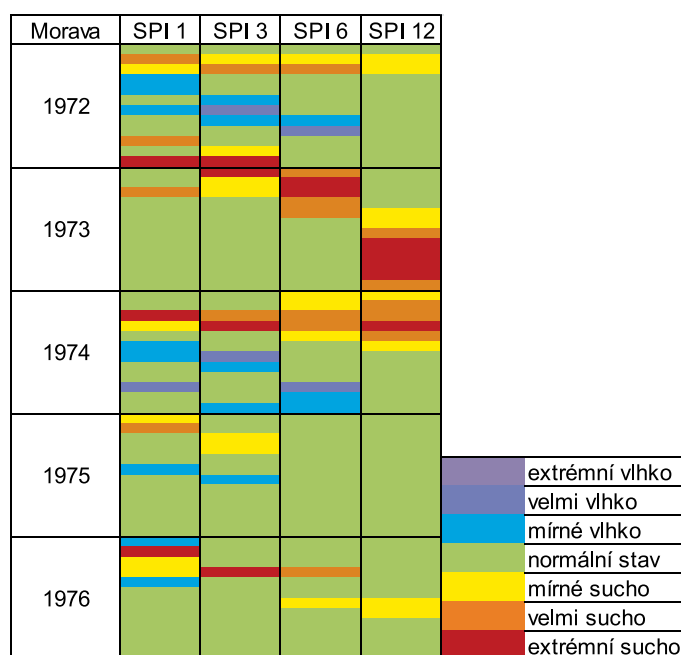
Analogický výpočet indikátoru SRI a SPI umožňuje porovnat oba indikátory a sledovat, jak se propaguje nedostatek srážek do navazující části hydrologického cyklu. Na obr. 4 jsou vykresleny oba indikátory stanovené pro řady srážek a průtoků pro povodí vodoměrné stanice Strážnice vyhlazené dvanáctiměsíčním klouzavým průměrem. Z grafu je patrné zpoždění řady SRI 12 za SPI 12. Odhad délky vzájemného posunu obou řad byl proveden na základě porovnání hodnoty RMSE (root mean square error) spočtené pro soubory indikátorů SRI 12 a SPI 12 posunutých vzájemně o 0 až 5 měsíců. Nejnižší chyba vyšla při posunu

řady SRI 12 o jeden měsíc. Z výsledků vyplývá, že v povodí Moravy oba indikátory přináší velmi podobnou informaci o vodnosti uplynulých let. Tato skutečnost však nemusí platit v povodích s významnou akumulací podzemních vod.

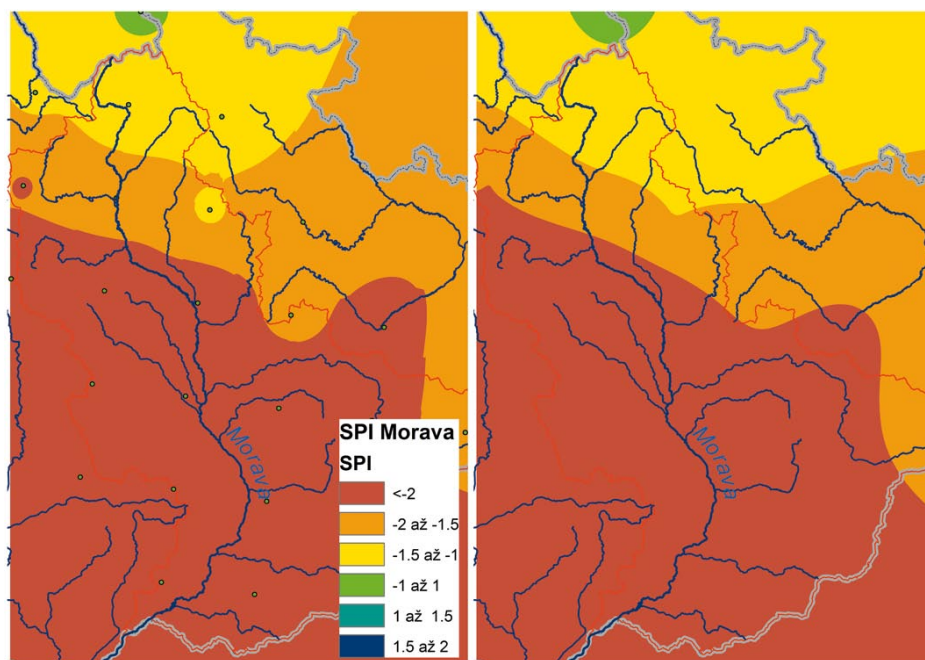
#### 4.2.1 Porovnání SRI s indikátorem hydrologického sucha vyvíjeným v ČR

Problematice hodnocení hydrologického sucha v České republice byl věnován projekt VaV SP/1a6/125/08 Časová a plošná variabilita sucha v České republice. V rámci řešení projektu byl pro hodnocení hydrologického sucha navržen indikátor standardizovaných nedostatkových objemů (SDVI). Za událost hydrologického sucha je považován stav, kdy pozorovaný průtok nedosahuje stanovené limitní hodnoty  $Q_{lim}$ , která se zpravidla stanovuje v rozsahu  $Q_{70}$  až  $Q_{95}$ . Vztah pro výpočet SDVI je popsán rovnicí 3, kde časový krok (jeden měsíc) byl uvažován jako roven jedné.

$$SDVI_t = \begin{cases} \text{if } Q_{obs} < Q_{lim} & SDVI_{t-1} + \left( \frac{Q_{lim} - Q_{obs}}{Q_{lim}} \right) \Delta t \\ \text{else } 0 & \end{cases} \quad (3)$$



Obr. 2. Průběh nedostatku (přebytku) srážek v letech 1972 až 1976 na povodí Moravy stanovený pro období s délkou akumulace srážek 1, 3, 6 a 12 měsíců



Obr. 3. Porovnání výsledků interpolace hodnot SPI 1 pomocí metody IDW a Topo to Raster pro měsíc únor v roce 2003

$SDVI_t$  – standardizovaný nedostatkový objem v čase  $t$  [-],

$Q_{lim}$  – limitní hodnota průtoku v čase  $t$  [ $m^3s^{-1}$ ],

$Q_{obs}$  – pozorovaný průtok v čase  $t$  [ $m^3s^{-1}$ ].

$$Q_{std} = \frac{(Q_{obs} - \bar{Q})}{\sigma} \quad (4)$$

$Q_{std}$  – standardizovaný průtok,

$\bar{Q}$  – průměrný průtok [ $m^3s^{-1}$ ],

$\sigma$  – směrodatná odchylka.

Aby bylo možné provést porovnání výsledků indikátoru SDVI a SRI 1, byla pro výpočet SDVI uvažována limitní hodnota průtoku rovná mediánu průtoků, jenž byl stanoven z dat aproximovaných teoretickým gamma rozdělením. Hodnoty SDVI pak podobně jako SRI 1 udávají míru odchylky pozorovaných průtoků od „normálního stavu“, jenž odpovídá mediánu průtoků aproximovaných gamma rozdělením. Pro přehlednost grafu byly hodnoty indikátoru SDVI vykresleny s opačným znaménkem. Graf na obr. 5 znázorňuje výsledné průběhy obou indikátorů a rovněž hodnoty pozorovaných průtoků standardizované na směrodatnou proměnnou (viz rovnici 4). Z grafu je patrné, že oba indikátory nabývají záporných hodnot ve stejném časovém kroku, ve kterém klesá standardizovaný průtok pod nulu a naopak. Zatímco indikátor SDVI roste s prodlužující se periodou podnormálních průtoků, hodnota indikátoru SRI 1 kopíruje hodnoty standardizovaných průtoků.

Nárůst indikátoru SDVI s prodlužující se délkou trvání sucha umožňuje porovnávání významnosti suchých period jak v rámci pozorované řady v jednom povodí, tak mezi povodími. Podobně se chová indikátor SRI stanovený pro klouzavé průměry za delší časové období. Jak ale znázorňuje obr. 6, s prodlužující se periodou použitou pro vyhlazení dat se zvětšuje zpoždění indikátoru SRI v reakci na aktuální změnu pozorovaných průtoků, což je patrné např. z hodnot indikátorů SDVI a SRI 12 v období let 1999 a 2000. Indikátor SRI 12 tedy nemůže plnit varovnou funkci.

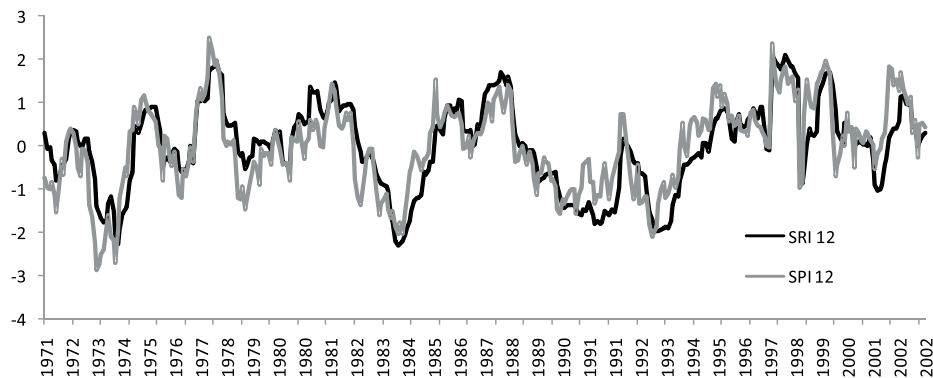
Pro zlepšení vypovídací schopnosti indikátoru SRI 1 bylo navrženo provádět integraci hodnot SRI 1 během suché periody. Kumulativní verze indikátoru SRI 1 je dále označována jako SRI+. Podobný přístup navrhl McKee et al. (1993) pro indikátor SPI, kdy absolutní hodnota sumy SPI vypočtené během suché periody vyjadřuje veličinu „Drought Magnitude“. Indikátor SRI+ je definován rovnicí 5, kde  $j$  začíná prvním měsícem suché periody a roste až do konce suché periody ( $x$ ).

$$SRI += - \sum_{i=1}^x SRI_i \quad (5)$$

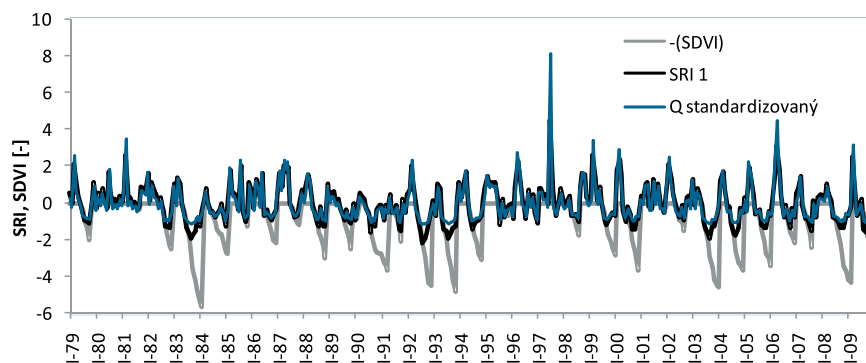
Pro výpočet indikátoru SRI+ za účelem jeho testování bylo za sucho považováno období s hodnotou SRI 1 menší než nula. Průběh hodnot indikátoru SRI+ a indikátoru SDVI je zachycen na obr. 7. Z grafu vyplývá, že oba indikátory popisují stav hydrologického sucha analogicky. Hodnota SRI+ představuje přibližně dvojnásobek hodnoty SDVI.

### 4.3 Výsledky testování indikátoru nedostatku vody

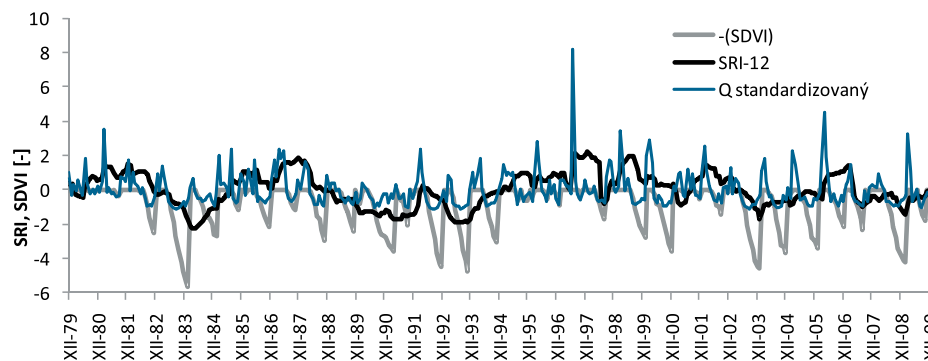
Hodnoty indikátoru WEI+ byly stanoveny pro vstupní data z hydrologické a vodohospodářské bilance, která je podle zákona č. 254/2001 Sb. každoročně vyhodnocována pro několik desítek bilančních profilů v ČR. Pro povodí Moravy byla využita data za období let 2005–2009 v měsíčním kroku pro bilanční profil ve Strážnici. Při pokusu o výpočet WEI+ v měsíčním kroku se ukázalo, že hodnoty v letním a podzimním období nabývají záporných hodnot. Je to způsobeno tím, že ve stávající definici indikátoru není uvažováno se zásobou vody v povodí. V období, kdy aktuální



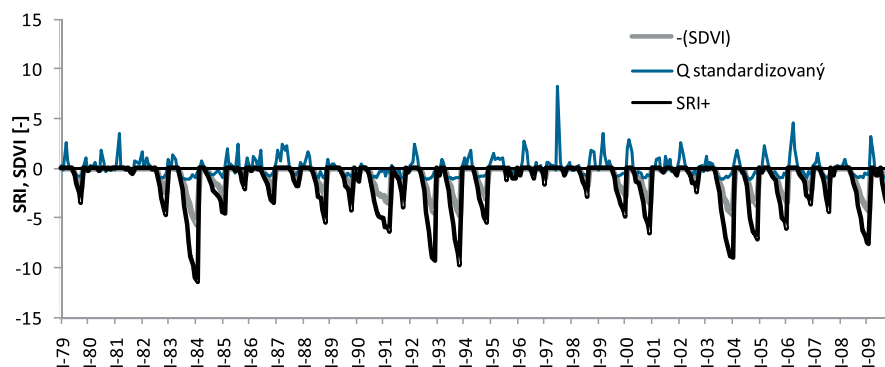
Obr. 4. Porovnání hodnot indikátorů SPI 12 a SRI 12 pro povodí k vodoměrné stanici Strážnice (Morava)



Obr. 5. Porovnání hodnot indikátoru SDVI stanoveného pro limitní průtok rovný mediánu průtoků (stanovený pro hodnoty aproximované pomocí gamma teoretického rozdělení) vynásobený -1 a hodnot indikátoru SRI 1, obou stanovený pro průtoky ve stanici Lanžhot



Obr. 6. Porovnání hodnot indikátoru SDVI stanoveného pro limitní průtok rovný mediánu průtoků vynásobený -1 a hodnot indikátoru SRI 12 ve stanici Lanžhot



Obr. 7. Porovnání hodnot indikátoru SDVI stanoveného pro limitní průtok rovný mediánu průtoků vynásobený -1 a hodnot SRI+ ve stanici Lanžhot

výpar převyšuje pozorované srážky, tak vychází hodnota vlastního průtoku (IF) záporně. Vzhledem k nulovému vnějšímu přítoku je pak záporná i hodnota obnovitelných sladkovodních zdrojů (RWA). V ročním kroku tento problém nenastává, neboť roční suma srážek převyšuje roční aktuální výpar na povodí.

Aby nedocházelo k záporným výsledkům pro WEI+ v měsíčním kroku, bylo expertní skupině navrženo změnit definici veličiny vlastního průtoku (IF) a místo rozdílu srážek a aktuální evapotranspirace zde uvažovat hodnotu odtoku z povodí očištěnou o vliv užívání vody na povodí (vliv odběrů vody z povrchových a podzemních zdrojů, vypuštění a manipulace na nádržích). Tato veličina je v České republice sledována v rámci řešení tzv. vodohospodářské bilance podle vodního zákona. V takovém případě vychází hodnota WEI+ kladná v každém měsíci v roce. Měsíční hodnoty indikátoru WEI+ pro povodí Moravy, stanovené s použitím této upravené definice, jsou vykresleny na obr. 8. Z grafu je patrné, že vodní zdroje jsou nejvíce zatíženy využíváním v měsících srpen, září a říjen. V tomto období činí hodnota indikátoru WEI+ i více než 40 %.

Značný podíl odběrů vůči celkovým obnovitelným vodním zdrojům na konci léta a na začátku podzimu se v hodnotách WEI+ stanovených v ročním chodu však nedaří prokázat. Průměrná hodnota WEI+ stanovená jak původní, tak upravenou metodou v ročním chodu činí pouze přibližně 6 %, což je ve srovnání s jihoevropskými zeměmi nízká hodnota. Rozdílný výsledek získáme při průměrování měsíčních hodnot získaných upravenou metodou, kdy se roční průměr během sledovaného období pohyboval v rozsahu 11–17 % (obr. 9). Upravená verze indikátoru WEI+ je použitelná pro povodí s nenulovým odtokem z povodí. Pokud bychom však chtěli aplikovat upravenou verzi indikátoru na povodích s občasnými toky, hodnota obnovitelných vodních zdrojů by byla rovna nule (týkalo by se to řady jihoevropských zemí).

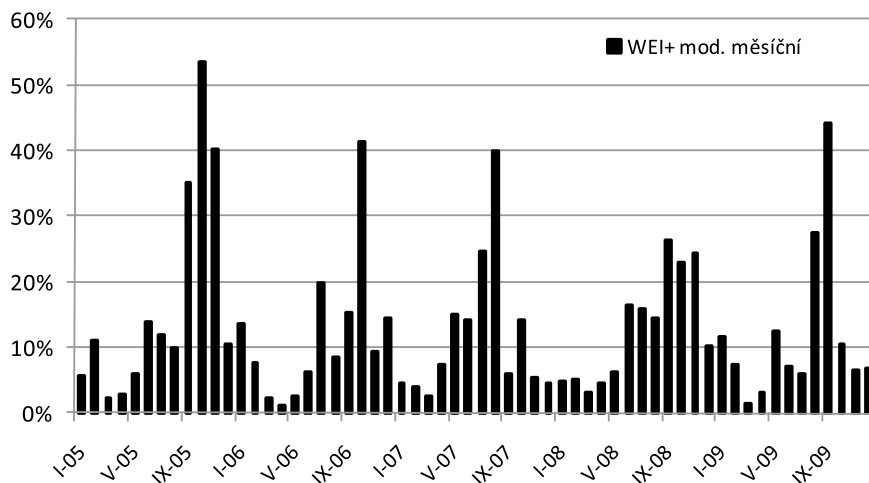
## 5 Závěr a doporučení expertní skupině

Na základě námi dosažených výsledků testování vybraných indikátorů sucha a nedostatku vody bylo expertní skupině doporučeno zvážit vhodnost použití indikátorů SPI s větší délkou kumulace srážek než jeden měsíc jako indikátoru meteorologického sucha. Dále bylo doporučeno zvážit výběr metody plošné interpolace výsledků do map, neboť metoda IDW nepřináší realistické výsledky. V případě indikátoru hydrologického sucha bylo doporučeno doplnit indikátor SRI 1 jeho kumulativní verzí, která umožňuje porovnávat suchá období, neboť ve své hodnotě zahrnuje vliv délky trvání sucha. V případě indikátoru WEI+ bylo expertní skupině doporučeno doplnit stávající definici indikátoru o člen popisující zásoby vody v povodí, aby bylo možné snížit časový krok indikátoru z jednoho roku na jeden měsíc. Druhou možností je stanovovat množství obnovitelných vodních zdrojů z hodnoty odvozeného odtoku z povodí, a nikoliv z rozdílu srážek a aktuálního výparu. Tato metoda by však vedla k velmi vysokým hodnotám WEI+ v oblastech s občasnými toky.

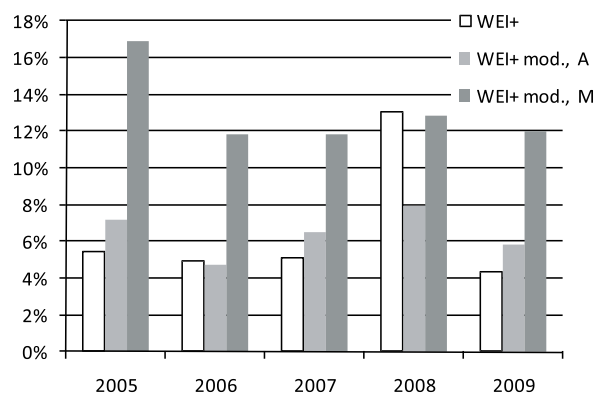
Z výsledků testování rovněž vyplývá, že stanovený cíl – definovat jednotné indikátory sucha v měřítku Evropské unie – není snadno dosažitelný. Jedním z důvodů je i skutečnost, že v mnoha zemích nejsou k dispozici podrobná data o užívání vody na povodí a hydrologické bilanci. V České republice je situace v této oblasti naopak velmi dobrá především díky dlouhé tradici plánování v oblasti vod a platné legislativě. Dá se tedy očekávat, že systémy indikátorů sucha vyvíjené na národní úrovni budou lépe využitelné ve vodohospodářské praxi a má smysl v jejich výzkumu a ověřování pokračovat.

## Literatura

- EK (2007a) Communication from the Commission to the European Parliament and the Council Addressing the Challenge of Water Scarcity and Droughts in the European Union, European Commission, 2007, dostupný online na <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0414:FIN:EN:PDF>.
- EK (2007b) Drought Management Plan Report – Technical Report – 2008 – 023, Water Scarcity and Droughts Expert Network, European Commission, 2007, dostupný online na [http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp_report.pdf).
- EK (2009) Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Work Programme 2010–2012 dostupný online na [http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?=/framework\\_directive/implementation\\_documents/final\\_2010-2012/\\_EN\\_1.0\\_&a=d](http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?=/framework_directive/implementation_documents/final_2010-2012/_EN_1.0_&a=d).
- McKee, TB., Doesken, NJ., and Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales, eight Conference on Applied Climatology, Anaheim,



**Obr. 8.** Průběh upraveného indikátoru využívání vody WEI+ stanovený pro povodí Moravy v měsíčním kroku



**Obr. 9.** Hodnoty indikátoru WEI+ v jednotlivých letech; bíle je vyznačena roční hodnota WEI+ stanovená podle definice popsané v bodu 2.4, světle šedě roční hodnota WEI+, kde veličina IF odpovídá odvozenému průtoku, tmavě šedě veličina WEI+ stanovená jako průměr z měsíčních hodnot

California, dostupné online <http://ccc.atmos.colostate.edu/relationshipof-droughtfrequency.pdf>.

Novický, O., Vlnas, R., Kašpárek, L., Vizina, A. aj. (2010) Časová a plošná variabilita sucha v České republice – závěrečná zpráva k projektu č. SP/1a6/125/08. Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.

Vizina, A. a Hanel, M. (2010) Posouzení sucha pomocí syntetických řad v podmínkách ovlivněných změnou klimatu. *VTEI*, roč. 52, mimořádné číslo II, s. 9–12, příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2010.

Štěpánek, P., Zahradníček, P., and Huth, R. (2011). Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. *Időjárás – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 115(1–2), p. 87–98.

Šercl, P. (2008) Hodnocení metod odhadu plošných srážek. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 2.

## Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory Ministerstva životního prostředí ČR v rámci řešení výzkumného záměru Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů (MZPO002071101) – subprojektu Stanovení vhodných indikátorů pro identifikaci výskytu, předpověď a vyhodnocení intenzity sucha pro podmínky České republiky.

**Ing. Magdalena Mrkvíčková<sup>1</sup>, Ing. Radek Vlnas<sup>1,3</sup>,  
Ing. Adam Beran<sup>1,2</sup>**  
<sup>1</sup>VÚV TGM, v.v.i., Praha,  
<sup>2</sup>Fakulta životního prostředí ČZU v Praze, <sup>3</sup>CHMÚ  
[magdalena\\_mrkvickova@vuv.cz](mailto:magdalena_mrkvickova@vuv.cz)  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

#### Key words

meteorological drought – hydrological drought – agricultural drought – water scarcity – standardized precipitation index – standardized runoff index – water exploitation index

A set of drought and water scarcity indicators is prepared under Common Implementation Strategy of the Water Framework Directive. These

## METODIKA PRO STANOVENÍ N-LETÝCH PRŮTOKŮ OVLIVNĚNÝCH PROTIPOVODŇOVÝMI OPATŘENÍMI

Ladislav Kašpárek, Martin Hanel

#### Klíčová slova

řady maximálních průtoků – N-leté průtoky – protipovodňová opatření

#### Souhrn

Standardně jsou N-leté průtoky používány jako návrhová data poskytovány pro hydrologický režim neovlivněný protipovodňovými opatřeními. V případě, že v povodí nad uvažovaným profilem na toku existují nebo jsou zřizována protipovodňová opatření, je použití neovlivněných N-letých průtoků pro některé účely, například pro zpracování záplavových území, nelogické. Článek popisuje metodiku pro stanovení N-letých průtoků ovlivněných účinkem protipovodňových opatření, zejména nádrží s retenčním účinkem. Je popsán postup výběru průtokových dat použitých pro řešení a rámcový popis výpočetního postupu a vyhodnocení výsledků.

### 1 Úvod

Poskytování hydrologických dat o průtocích je usměrňováno normou ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod. Podle ní se N-leté maximální průtoky ve vodoměrných stanicích určují z funkce překročení kulminačních průtoků pro pravděpodobnosti odpovídající zvoleným průměrným dobám opakování. Funkce překročení kulminačních průtoků je sestavena z řady maximálních kulminačních průtoků za každý hydrologický rok. V rozmezí průměrných dob opakování 1 rok až 100 let jsou N-leté průtoky zařazeny do skupiny označené „základní hydrologické údaje“, které patří do kategorie „standardní hydrologické údaje“, takže podle článku 5.1. uvedené normy je zpracovává nebo ověřuje odborně způsobilá právnická osoba pověřená ústředním orgánem státní zprávy v dané oblasti. Podle Věstníku MŽP ČR, částky 2/1997 je touto činností pověřen Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ).

Hydrologické údaje jsou zpracovávány a poskytovány na základě pozorovaných hodnot, z dostupných podkladů se uvedou informace o způsobu a rozsahu ovlivnění. Podle článku 5.3. normy jsou základní hydrologické údaje, tedy i N-leté průtoky, plošně zpracovávány a vyrovnávány. Při plošném vyrovnání se pokud možno vylučuje vliv výrazného prokazatelného ovlivnění, např. provozem vodních děl. Zpracování hydrologických dat s eliminací nebo zavedením ovlivnění je v článku 3.2 uvedeno jako příklad úlohy, označované „hydrologická studie“. Hydrologické studie spadají do kategorie „nestandardní hydrologické údaje“, které mohou být zpracovány a poskytovány i jinými odbornými pracovišti než ČHMÚ.

N-leté průtoky spolu s m-denními průtoky jsou základními charakteristikami, které popisují hydrologický režim toku, a jsou základem pro vodohospodářská řešení, dimenzování objektů na tocích i stanovení míry ochrany před povodněmi. V případě, že v povodí nad uvažovaným profilem na toku existují nebo jsou zřizována protipovodňová opatření (PPO), je použití neovlivněných N-letých průtoků pro některé účely, například pro zpracování záplavových území podle vyhlášky č. 236/2002 Sb., o způsobu a rozsahu zpracovávání návrhu a stanovování záplavových území, nelogické. Pokud protipovodňová opatření vedou ke zmenšení N-letých průtoků, měl by se jejich vliv projevit zmenšením rozsahu záplavových území.

Pro zpracování základních hydrologických dat, a tedy i neovlivněných N-letých průtoků, existují metodiky ČHMÚ, uvedené v normě ČSN 75 1400 a v dalších interních materiálech ČHMÚ. Pro zpracování hydrologických studií vedoucích ke stanovení N-letých průtoků s uvážením protipovodňových opatření jednotný metodický základ neexistuje. Vzhledem k současným vodohospodářským potřebám (vliv nových protipovodňových opatření) a při naplňování nových legislativních povinností (např. směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23. 10. 2007 o vyhodnocování a zvládnutí povodňových rizik) byl Výzkumnému ústavu vodohospodářské

indicators should be useful for implementation of the Water Framework Directive, especially for developing drought risk maps, preparation of drought and water scarcity plans, early warning systems etc. Proposed indicators were assessed on data for a pilot river basin in the Czech Republic – the Morava river basin. Based on the results, several recommendations for better applicability of selected indicators emerged. One of the conclusions of the assessment is that Czech national legislating enables us to operate with very detailed data on water use within river basins, so it allows to use more detailed indicators at the national level than which are proposed at the European level.

mu T. G. Masaryka, v.v.i., Ministerstvem životního prostředí zadán úkol vytvořit jednotnou metodiku pro zpracování N-letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními.

V rámci řešení tohoto úkolu byla provedena rešerše zahraničních zdrojů zabývajících se odvozením N-letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními. Bylo zjištěno, že tato tematika nebyla zatím komplexně řešena, nalezené studie se týkaly spíše dílčích aspektů problematiky a zejména byly řešeny pomocí hydraulického modelování. Tedy způsobem extrémně náročným na data a podrobná terénní měření, jenž by obecně byl těžko aplikovatelný.

### 2 Cíl metodiky

Navrhovaná metodika popisuje postup stanovení změny N-letých průtoků způsobené vlivem v říční síti již realizovaných nebo navrhovaných protipovodňových opatření ovlivňujících povodňové průtoky. Mezi taková opatření patří zejména vodní nádrže s retenčním účinkem, včetně nádrží suchých (označovaných jako poldry). V principu může být metodika použita i pro posouzení účinku ohrázení prostor s významným objemem (tj. zmenšení rozlivu do inundace) na povodně v níže ležících profilech toku, nebo pro jiná technická opatření (například převod vody do jiného povodí). Předmětem metodiky je stanovení změny N-letých průtoků v požadovaném rozsahu průměrných dob opakování nejen v profilu toku ležícím bezprostředně pod uvažovaným protipovodňovým opatřením, ale i v navazujících úsecích toků, na kterých se účinek může projevit, a to i pro případ, že v povodí bylo uskutečněno několik protipovodňových opatření.

Metodika předpokládá jako standardní zpracování N-letých průtoků z ročních maxim pozorovaných povodňových vln. Lze ji použít i pro zpracování N-letých průtoků sezonních (maxima za zimní, letní pololetí). Jako podklad pro řešení musí zadavatel u ČHMÚ objednat zpracování neovlivněných N-letých sezonních průtoků pro vodoměrné stanice a soutokové uzly toků a pozorovaných povodňových vln odpovídajících sezonním maximům pro vodoměrné stanice. Tato data nejsou v ČHMÚ standardně předmětem hromadného zpracování.

#### 2.1 Omezení pro použití metodiky

##### 2.1.1 Existující vodní díla s protipovodňovým účinkem

V těch povodích, kde po celou dobu hydrologických pozorování existují malé vodní nádrže (rybníky), popř. jejich soustavy s významným souhrnným retenčním účinkem, není při standardním vyčíslení povodňových průtoků jejich vliv eliminován a považuje se za součást přirozeného režimu. V takových případech odpovídají N-leté průtoky, odvozené z pozorování, ovlivněnému režimu. Při stanovení účinku protipovodňových opatření až na výjimečné případy, například když byly v současné době pro účely ochrany před povodněmi rybníky rekonstruovány a jejich retenční účinek zvětšen, není proto vhodné je jako samostatná protipovodňová opatření uvažovat.

##### 2.1.2 Omezená časová platnost manipulačních řádů

Ovlivnění povodňových průtoků, zejména v případě retenčního účinku nádrží, závisí na pravidlech řízení odtoku z nádrží, která jsou zakotvena v manipulačních řádech. Tato pravidla obvykle platí po řadu let, ale mohou být změněna. Vliv protipovodňových opatření, která jsou závislá na pravidlech obsažených v manipulačních řádech, lze stanovit na základě jejich existujících, popř. předpokládaných znění. Při posuzování účinku protipovodňových opatření podle předložené metodiky se uvažuje jen s účinky odpovídajícími pravidlům manipulačních řádů, dokonalejší postupy dispečerského řízení povodňového odtoku nejsou uvažovány. Při využívání N-letých průtoků pro rozhodnutí s dlouhodobými následky, například o výstavbě v inundačním území, je nezbytné, aby uživatel ovlivněných N-letých průtoků zvážil riziko vyplývající z možnosti zmenšení účinku protipovodňového opatření následkem možných změn v manipulačních řádech. Taková možnost existuje zejména u víceúčelových vodních nádrží, kde může být pro posílení zásobní funkce redukován retenční účinek.

##### 2.1.3 Vliv změn provedených na ploše povodí

Metodika není určena pro posuzování účinku opatření provedených na ploše povodí (např. změna využití pozemků apod.), které jsou určeny pro zvětšení retenční kapacity povodí, neřeší ani zvětšení N-letých průtoků vlivem urbanizace a jiné zástavby v povodí.

### 3 Popis metodiky

Posouzení vlivu protipovodňových opatření, zejména transformací povodní v retenčních prostorách nádrží, je standardně součástí vodohospodářských řešení při projektování nádrží i zpracování manipulačních řádů nádrží. Pro řešení jsou v současnosti používány teoretické  $N$ -leté návrhové povodňové vlny, zpracované podle ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod. Vzhledem k neurčitosti definice těchto vln, pokud jde o objem odtoku, jsou při posuzování bezpečnosti přehrad za povodní používány teoretické  $N$ -leté návrhové povodňové vlny charakterizované podmíněnou pravděpodobností velikosti objemu odtoku při daném kulminačním průtoku průměrné doby opakování  $N$ . Metodika jejich stanovení je popsána v referátu Boháč, Kašpárek a Kulasová (2001). Při tomto přístupu k odvozování teoretických povodňových vln je vyjádřeno, že povodně se stejně velkým kulminačním průtokem mohou mít rozdílný objem.

Běžně je účinek využití retenčního objemu nádrže posuzován jen pro profil toku bezprostředně pod nádrží. Předmětem předložené metodiky je stanovení změny  $N$ -letých průtoků v celém jejich rozsahu, nejen v profilu toku ležícím bezprostředně pod uvažovaným protipovodňovým opatřením, ale i v navazujících úsecích toků, na kterých se účinek může projevit, a to i pro případ, že v povodí bylo uskutečněno několik protipovodňových opatření.

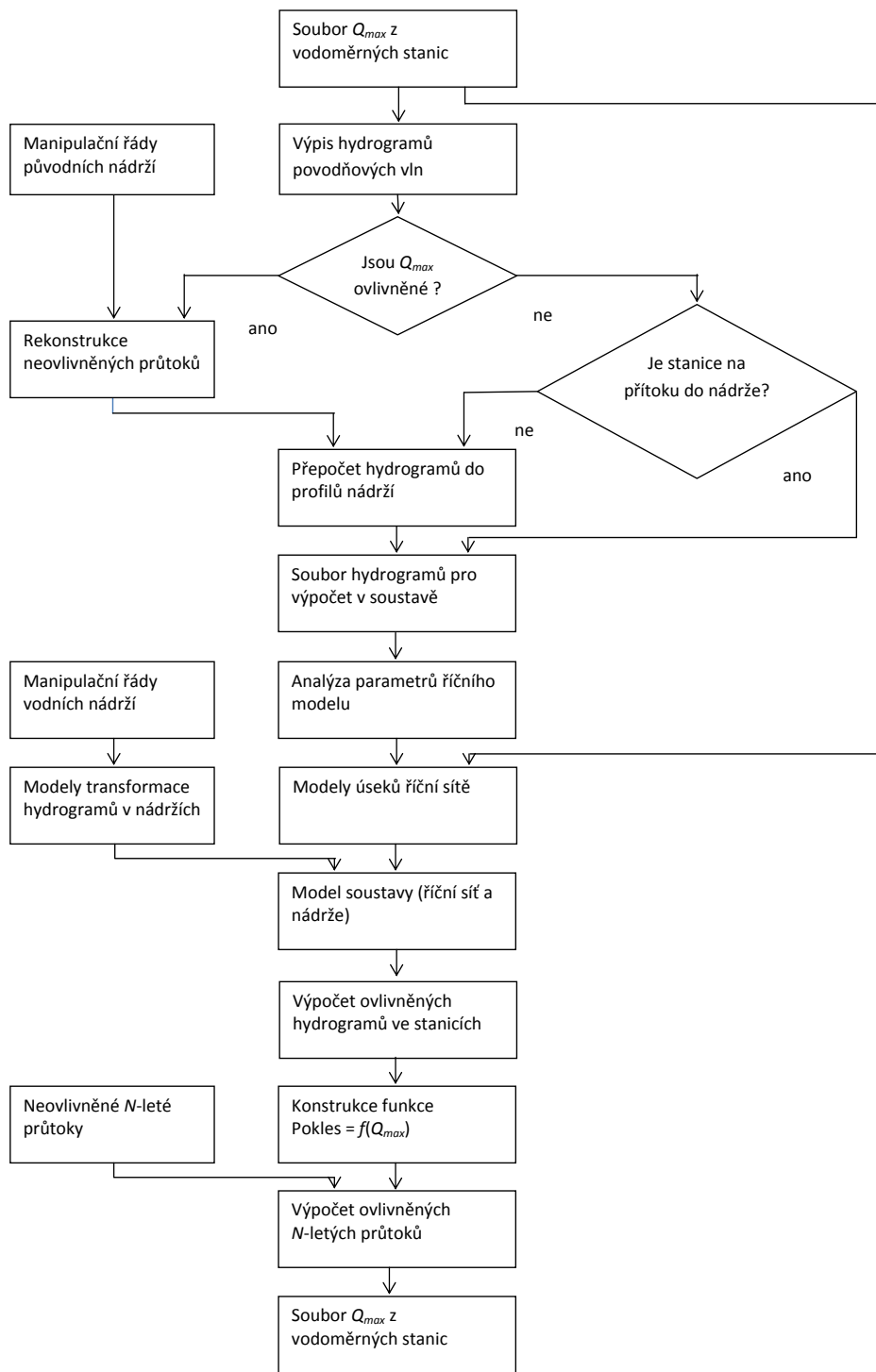
Pro návrh metodiky je podstatné, že povodňové vlny, které jsou rozhodující pro stanovení  $N$ -letých průtoků v profilech na tocích pod nádrží, ležících už ve vzdálenosti několika desítek km od PPO, mohou mít jiný charakter, než návrhové povodně, použité pro posouzení účinku PPO. Typické je, že pokud PPO je umístěno v profilu, který uzavírá malé povodí (např. několik desítek km<sup>2</sup>), je návrhová vlna odvozena jako letní povodeň, odpovídající vzniku z intenzivního deště relativně krátkého trvání. Ten způsobí požadovaný  $N$ -letý průtok, povodeň však nemá tak velkou odtokovou výšku, jako povodeň z dlouhodobějších dešťů nebo povodně zimního typu, které přísluší případům, jež vytvářejí soubor pro odvození  $N$ -letých průtoků v níže ležících profilech, více vzdálených od PPO. Účinek PPO na zmenšení kulminačních průtoků těchto vln může být v níže ležících profilech podstatně menší než ten, který byl vypočten podle  $N$ -letých povodňových vln stanovených pro profil PPO.

Poznátky o tom, jak se vytvářejí průběhy povodňových vln pod soutokem dvou toků, ukazují, že  $N$ -leté průtoky pod soutokem nejsou součtem  $N$ -letých průtoků nad soutokem. Vyplývá to z toho, že jen výjimečně jsou povodí obou toků nad soutokem zasažena stejně významnou povodní s takovým časovým průběhem, že kulminační průtoky jsou na soutoku synchronní. Běžně se takové situace nevyskytují. Dokonce může dojít i k opačnému extrému, kdy rozvodnění na jednom toku způsobí dočasnou změnu směru proudění na druhém toku.

Skladbu  $N$ -letých průtoků v říční síti řeší ČHMÚ postupy, které vycházejí z publikací Novický, Kašpárek a Kolářová (1992) a Lett (1999). Z toho, že nelze aritmeticky sčítat  $N$ -leté průtoky, můžeme usuzovat, že nelze aritmeticky sčítat ani jejich změny způsobené účinky jednotlivých opatření.

Z uvedených poznatků vyplynuly dva základní principy řešení

- posuzování účinků protipovodňových opatření je třeba řešit v říční síti, rozčleněné minimálně v profilech, kde se nacházejí protipovodňová opatření, a v profilech vodoměrných stanic, popř. i v profilech soutoků dílčích toků,
- k posouzení je třeba použít povodňové vlny, z jejichž kulminačních průtoků je sestaven soubor pro odvození  $N$ -letých průtoků v posuzovaném profilu (vodoměrné stanici). Pokud je povodňový režim ve dvou stanicích ležících na stejném toku podobný, lze použít pro obě stanice soubor vybraný podle stanice dolní. Je však třeba ověřit, že odlišnosti ve výběru povodňových vln se neprojeví ve vztahu mezi kulminačními průtoky a jejich poklesy vlivem protipovodňových opatření, zejména v oblasti několika největších pozorovaných kulminačních průtoků.



Obr. 1. Schéma postupu zpracování

Metodika řešení je založena na simulaci průchodu řady povodňových vln soustavou říční sítě povodí a protipovodňových opatření pomocí hydrologického modelu. Postup řešení je znázorněn ve vývojovém diagramu na obr. 1.

#### 3.1 Vymezení řešené soustavy, konkrétních možností řešení a vstupních dat

Na počátku zpracování je třeba vymežit rozsah řešené úlohy v následujících krocích:

- vymezení rozsahu posuzované říční sítě a odpovídajícího povodí,
- výběr protipovodňových opatření, jejichž vliv se bude posuzovat,
- vyhledání vodoměrných stanic a informací o vyhodnoceném pozorování povodní (časový rozsah pozorování),
- zpracování informací o možném ovlivnění povodňových vln zaznamenaných ve vodoměrných stanicích vlivem existujících nádrží,
- výběr profilů, pro které se bude úloha řešit, a stanovení období, ze kterého budou použity průběhy povodní,
- zpracování rámcového postupu řešení,
- sestavení seznamu dat potřebných pro řešení.

Zvolí se soustava vodoměrných stanic, pro které budou pomocí modelu odvozeny změny  $N$ -letých průtoků. Pro ostatní profily říční sítě se odvozené



**Tabulka 1.** Přehled datových podkladů

Údaje o maximálních průtocích	
Charakteristiky <i>N</i> -letých průtoků	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>N</i>-leté průtoky ve vodoměrných stanicích</li> <li><i>N</i>-leté průtoky v profilech nádrží</li> <li>katastr <i>N</i>-letých průtoků pro rozsah řešené říční sítě</li> </ul>
Soubory průběhů povodňových vln	<ul style="list-style-type: none"> <li>pozorované průběhy z vodoměrných stanic</li> <li>vybrané <i>N</i>-leté teoretické povodňové vlny pro zvolené profily vodoměrných stanic</li> </ul>
Podklady pro sestavení modelu řešené soustavy	
Charakteristiky říční sítě a povodí	<ul style="list-style-type: none"> <li>mapové podklady</li> <li>délky říčních úseků</li> <li>údaje o drsnosti řečišť a inundací</li> <li>charakteristické příčné profily včetně rozlivů do inundací</li> <li>křivky postupových dob průtoků</li> <li>měrné křivky průtoků</li> <li>plochy dílčích povodí a mezipovodí</li> </ul>
Údaje o posuzovaných PPO	<ul style="list-style-type: none"> <li>lokalizace, plochy povodí nad profilem PPO</li> <li>manipulační řády PPO</li> <li>návrhové <i>N</i>-leté teoretické povodňové vlny pro PPO</li> <li>průběhy významných pozorovaných povodňových vln, pokud existují (odtoky, přítoky, výšky hladiny)</li> </ul>
Údaje o nádržích, které ovlivňovaly dosud pozorované povodně	<ul style="list-style-type: none"> <li>lokalizace nádrží, plochy povodí nad nádržemi</li> <li>manipulační řády</li> <li>pokud neexistují manipulační řády: čáry zatopených objemů, měrné křivky výpustí a přelivů</li> <li>průběhy významných pozorovaných povodňových vln, pokud existují (odtoky, přítoky, výšky hladiny)</li> </ul>

změny interpolují nebo extrapolují. Období, ze kterého se použijí průběhy povodní, by mělo být co nejdélejší, při jeho volbě však je třeba vzít do úvahy i to, aby v jeho průběhu pozorovala sestava vodoměrných stanic umožňující popsát režim povodní v posuzované základní říční síti. Prakticky jde o kompromis mezi délkou použitého období a hustotou sítě vodoměrných stanic. Výběr období, ze kterého lze odhadovat účinky protipovodňových opatření, je omezen tím, že ve všech zvolených vodoměrných stanicích musí být dostupné časové průběhy povodní za stejné období. Roli hrají nejen rozdílné počátky vodoměrných pozorování, ale také to, že při pozorování vodních stavů pouze na vodočtech, před instalací limnigrafů – což byla standardní situace v 19. století a počátkem 20. století, byly zaznamenávány jen ranní a maximální vodní stavy. Při velkých povodních byly někdy odečteny vodní stavy v několikahodinových intervalech, pro systematické zpracování však není těchto dat dostatek.

### 3.2 Pořízení vstupních dat

Řešení se provádí pro soubor povodní, sestavený podle souboru maximálních kulminačních průtoků za zvolené dlouhodobé období, tj. souboru, ze kterého se odvozují *N*-leté průtoky v řešené stanici, nebo jen z části tohoto období. Při volbě období se musí vyhovět podmínce, že v něm existují pozorování ve všech vodoměrných stanicích řešené soustavy nebo řešené části soustavy. Standardní řešení se provede pro roční maxima, v případě požadavku na rozlišení letních a zimních povodní se řešení provede samostatně pro maxima ze zimního a maxima z letního pololetí. Povodně s kulminačním průtokem menším než jednoletý průtok se vynechají, důvodem je podstatná redukce rozsahu přípravy dat při zanedbatelné ztrátě informace.

Ve vodoměrných stanicích ležících v části soustavy nad řešenou stanicí se doplní výběr tak, aby obsahoval všechny povodně vybrané pro řešenou stanicí. Hydrogramy povodní se připraví v hodinovém kroku.

Přehled dat potřebných pro posouzení vlivu PPO na *N*-leté průtoky podle této metodiky je uveden v tabulce 1.

### 3.3 Rekonstrukce neovlivněných hydrogramů povodní ovlivněných stávajícími nádržemi

V některých případech je možnost odvození hydrogramů přítoku do nové zřízené nádrže (PPO) komplikována tím, že existující vodoměrná pozorování povodní jsou v celém rozsahu ovlivněna tím, že v povodí je již existující nádrž (například rybník) nebo soustava nádrží s významnou retenční schopností. ČHMÚ v některých případech jejich vliv na povodňový režim neposuzuje a uvažuje s nimi jako se stálou vlastností povodí. Standardně poskytované *N*-leté průtoky pak zahrnují ovlivnění.

Pro přepočítání do profilů nad nádrží však nelze takto ovlivněná vodoměrná pozorování použít a je třeba řešit úlohu rekonstrukce neovlivněných hydrogramů s využitím manipulačního řádu existující nádrže (nádrží), pokud není k dispozici s využitím čáry zatopených objemů a měrné křivky přelivu.

Za předpokladu, že je znám odtok z nádrže (ať už na základě měření, nebo odvození hydrologickou analogií – viz kapitola 3.4), lze přítok do nádrže zjednodušeně rekonstruovat následujícím postupem. Na základě objemu odtoku z nádrže (*O*) je možno z manipulačního řádu (resp. z měrné křivky přelivu) odečíst výšky hladiny a tům, s použitím čáry zatopených objemů,

přidat objemy v nádrži (*S*). Následně lze objem přítoku do nádrže (*I*) v čase *t* řešit jednoduchou bilanční rovnicí

$$\Delta S_t = I_t - O_t, \text{ neboli } I_t = O_t + \Delta S_t, \quad \text{pro } t > 2 \quad (1)$$

kde změna zásoby  $\Delta S_t$  je vypočtena jako rozdíl zásoby v čase *t* a *t* - 1, tedy  $\Delta S_t = S_t - S_{t-1}$ . Za *I*<sub>*t*</sub> v čase *t* = 1, pro které neznáme změnu zásoby, je možné dosadit např. následující hodnotu přítoku, což vzhledem k tomu, že pozornost je zaměřena na maximální průtoky, nemá na výsledky analýzy žádný vliv.

### 3.4 Přepočítání průtoků z vodoměrných stanic do profilů PPO

Pro případy, kdy jsou k dispozici vodoměrná pozorování na přítoku (nebo přítocích) nad PPO, hydrogramy povodní se přepočítají metodou hydrologické analogie na velikost přítoku do profilu PPO. V některých případech, kdy posuzujeme vliv již existující nádrže (PPO), popř. v blízkosti PPO existuje nádrž, lze hydrogram přítoků do nádrží získat bilančním výpočtem z měřené odtoku z nádrže a z údajů o kolísání hladiny v nádrži. Pro případy z posledních desetiletí, výjimečně i pro starší období lze tato data získat pro některá vodní díla od podniků Povodí. V případech, kdy objem nádrže (přesněji plocha hladiny) je relativně velký vzhledem k velikosti průtoků, nelze bilančním výpočtem získat dostatečně přesný odhad časového průběhu přítoku (Kašpárek aj., 2005). Průběh přítoku odvozený z průběhu odtoku a z kolísání hladiny pak lze použít jen jako doplňující informaci k průběhu odhadnutému metodou hydrologické analogie popsanou v následujícím odstavci. V případě, že není k dispozici vodoměrné pozorování nad PPO, jehož vliv máme posoudit, je třeba hydrogramy posuzovaných povodní do tohoto profilu přepočítat, obvykle z nejbližší po toku ležící vodoměrné stanice

Pokud jsou průtoky v této stanici ovlivněny existujícím vodním dílem, lze zejména u letních povodní pro přepočítání využít informace o rozložení srážek na povodí a model soustavy rozšířit o srážko-odtokové komponenty. Příklady takových řešení jsou ve studiích Starého a Březkové (2002, 2003, 2006). Pro zimní povodně by bylo třeba používat i informace o sněhové zásobě v povodí, průběhu teplot vzduchu na povodí a komponenty modelující tání sněhu. Vzhledem k tomu, že pracnost přípravy dat se při tomto přístupu podstatně zvětšuje, srážkoměrné údaje ze starších období jsou dostupné téměř výhradně jen v denních úhrnech, údaje o zásobě vody ve sněhu vesměs chybí, nepočítáme s tím, že by byl tento postup pro zimní povodně součástí standardního řešení.

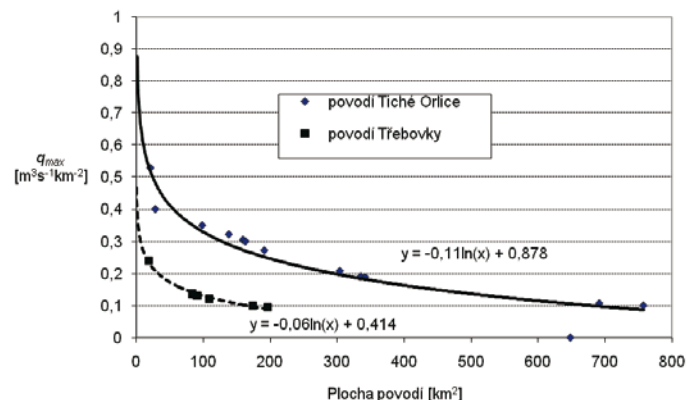
Pro standardní postup přepočtu průtokových hydrogramů z vodoměrné stanice do profilů PPO navrhuje dvě jednoduché metody. Jejich základ je stejný, založený na předpokladu podobnosti časového průběhu povodňového hydrogramu ve vodoměrné stanici a v profilu PPO.

Průtok v profilu PPO (*Q<sub>p</sub>*), obvykle přítok do nádrže, je z průtokových dat nejbližší vodoměrné stanice na posuzovaném toku *Q<sub>VS</sub>* (pokud není k dispozici, vyhledá se jiný vhodný pozorovaný profil – analogon), odvozen podle rovnice

$$Q_p(t) = k Q_{VS}(t + t_p) \quad (2)$$

kde koeficient *k* je dán poměrem ploch povodí (varianta výpočtu dále označovaná *vA*), nebo poměrem dlouhodobých průměrů ročních maximálních průtoků (varianta výpočtu dále označovaná *vQ*), *t* je čas, *t<sub>p</sub>* je postupová doba mezi profilem PPO a vodoměrnou stanicí; v případě, že vodoměrná stanice leží na toku nad PPO, má záporné znaménko.

Ve variantě *vA* se předpokládá, že výška povodňového odtoku byla na celé ploše povodí stejná, pro přepočítávací koeficient se použije jen poměr ploch povodí. Tato varianta se blíží realitě spíše u zimních povodní, kdy v částech povodí s větší nadmořskou výškou často nenastávají větší spe-



**Obr. 2.** Vztah mezi plochou povodí a specifickým průměrným maximálním průtokem

cifické kulminační průtoky než ve středních nebo i dolních částech povodí. Intenzita tání sněhu závisí na teplotě vzduchu, která s nadmořskou výškou obecně klesá. U letních povodní se tato metoda přibližuje případům, kdy povodí bylo zasazeno srovnatelnou srážkou po celé ploše.

Metoda přepočtu  $vQ$  vychází z předpokladu, že plošnou proměnlivost velikosti povodňového odtoku lze charakterizovat specifickým průměrem ročních maximálních průtoků z jednotlivých částí povodí. Pro přepočet se pak použije průměr ročních maximálních průtoků pro profil nad posuzovaným PPO a pro profil vodoměrné stanice. Ve vodoměrné stanici je vypočten z pozorovaných hodnot, pro profil nad PPO se určí ze vztahu nárůstu specifického kulminačního průtoků s klesající plochou povodí sestaveného pro příslušné povodí z existujících pozorování v soustavě vodoměrných stanic, popř. z již zpracovaných návrhových veličin.

Průměr ročních maxim  $Q_{max, prům}$  v profilu PPO získáme podle závislostí

$$q_{max, prům} = f(A) \quad (3)$$

$$Q_{max, prům} = q_{max, prům} \cdot A \quad (4)$$

kde  $q_{max, prům}$  je specifický průměrný maximální průtok [ $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^2$ ] a  $A$  je plocha povodí [ $km^2$ ].

Závislost (3) lze odvodit z údajů obsažených v katastru  $N$ -letých průtoků (ročních), příklad je na obr. 2. Nárůst průměru ročních maxim průtoků (ve formě specifického průtoků) při poklesu plochy povodí souvisí s nárůstem průměrné dlouhodobé srážky s nadmořskou výškou a zejména s tím, že přívalové srážky s narůstající plochou povodí v průměru klesají. Čím menší povodí, tím větší průměrná intenzita se na jeho ploše může vyskytnout.

### 3.5 Sestavení modelu říční sítě povodí včetně PPO

Pro simulaci změn maximálních průtoků vlivem protipovodňových opatření se použije hydrologický koncepční model, složený z dílčích modelů

- translace hydrogramu v říčním úseku,
- translace a transformace hydrogramu v říčním úseku s významným rozlivem do inundací,
- průchod povodní nádrží (podle pravidel manipulačního řádu) nebo jiným PPO.

Pro řešení potřebujeme model řešené soustavy, složený z dílčích modelů skladby průtoků a proudění vody v říční síti, modelů transformace průtoků v nádržích a inundačních rozlích a modelů různých typů protipovodňových opatření. Z literární rešerše i ze zkušebních výpočtů vyplynulo, že pro sestavení hydrologických dílčích modelů lze pro daný účel použít relativně jednoduché základní dílčí modely chování. Pro říční úseky bez významných rozlivů postačuje metoda odpovídajících si průtoků, což je v podstatě translace hydrogramu o postupovou dobu. V úsecích s významnými rozlivy do inundací je třeba použít složitější modely, které uvažují akumulační účinek, postačují však modely hydrologického typu.

Pokud nejsou parametry říčních modelů známy, odvodí se s využitím hydrogramů povodní použitých pro řešení. Pro odhad parametrů modelů transformace lze využít i morfologické údaje o říčním toku i nivě.

Pro modelování účinku většiny protipovodňových opatření existují standardní postupy, složitost řešení se zejména u nádrží může zvětšovat podle toho, jak dokonale chceme vystihnout pravidla manipulací daná manipulačním řádem.

Při sestavení modelu soustavy, ve které se má řešit vliv protipovodňových opatření na  $N$ -leté průtoky, je racionální využít jako základ některý z modelů, které jsou využívány pro předpovědi průtoků. Jako příklad lze uvést, že ve výpočtech na pilotním povodí Tiché Orlice jsme použili model Aqualog, popsáný ve zprávě Krejčí (2009), upravený a doplněný zejména o submodely poldrů. Ve výpočtech popsanych ve studiích Starého a Březkové (2002, 2003, 2006) byl použit model Hydrog.

### 3.6 Simulace průběhu povodní

V posuzované soustavě se provede modelový výpočet pro

- stav soustavy bez posuzovaných protipovodňových opatření (maximální průtoky i průběhy povodní ve vodoměrných stanicích by se měly shodovat s pozorováními),
- soustavu, do které jsou začleněna protipovodňová opatření.

Výsledkem modelování jsou dvě řady průběhů povodňových vln, jedna pro povodí ve stavu bez PPO, druhá pro povodí, ve kterém PPO existují. Pro další řešení se použijí kulminační průtoky odpovídajících si povodní.

### 3.7 Analýza poklesů kulminačních průtoků

Pro posouzení vlivu PPO na  $N$ -leté průtoky jsou použity modelované kulminační průtoky. Ty bychom mohli zpracovat standardním statistickým postupem, který se v ČHMÚ používá pro výpočet  $N$ -letých průtoků, tj. vypočítat z ročních maximálních průtoků průměr, koeficient variace, koeficient asymetrie, resp. zvolený empirický kvantil v modulovém měřítku, který se obvykle místo koeficientu asymetrie pro další výpočty podle zvoleného teoretického rozdělení pravděpodobnosti používá. Prakticky tento postup většinou nelze uplatnit, neboť  $N$ -leté průtoky jsou odvozovány ze souborů, které obsahují maximální roční průtoky z období delších, než můžeme použít pro výpočet ovlivnění, někdy jsou pro jejich výpočet použity i údaje o historických povodních.

Zvolili jsme proto odlišný přístup. Z výsledků modelových výpočtů se použijí pro další postup poklesy maximálních kulminačních průtoků jednotlivých povodní způsobené vlivem protipovodňových opatření

$$\Delta Q_{max} = Q_{max} - Q_{max, ovl} \quad (5)$$

vyjádřené také v relativním měřítku:

$$\Delta_r Q_{max} = 100 (1 - Q_{max, ovl} / Q_{max}) \quad (6)$$

a sestaví se grafické korelační vztahy

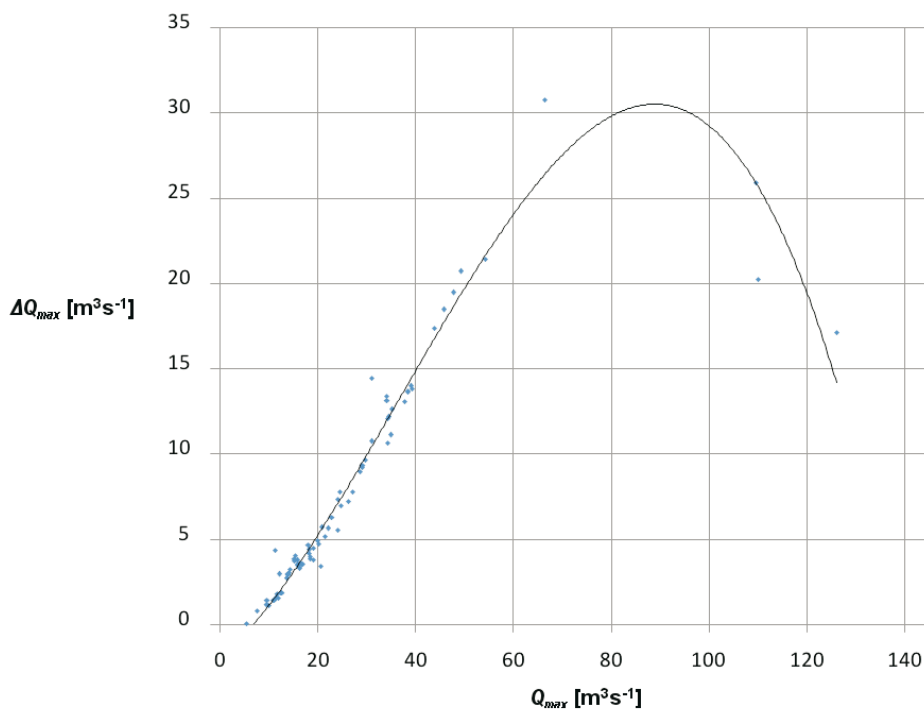
$$\Delta Q_{max} = f(Q_{max}), \quad (7)$$

$$\Delta_r Q_{max} = f(Q_{max}). \quad (8)$$

Poklesy maximálních průtoků  $\Delta Q_{max}$  jsou vyjádřeny v  $m^3 \cdot s^{-1}$ , relativní poklesy  $\Delta_r Q_{max}$  v % neovlivněných průtoků. Vztahy typu (7) jsou základní, umožňují porovnání účinku PPO v říční síti. Vztahy typu (8) jsou v některých případech citlivější při zkoumání nelinearity vztahů. Pro vzájemné porovnání výsledků z různých profilů jsou méně vhodné, je v nich souhrnně vyjádřena jak změna neovlivněných průtoků, tak jejich pokles vlivem PPO a oba vlivy nelze jednoduše oddělit.

V případě, že nejsou použity pozorované průtoky do profilů PPO, zpracují se uvedené vztahy pro varianty výpočtu  $vA$  i  $vQ$ . Výsledný průběh poklesů kulminačních průtoků by měl být v rozmezí výsledků obou postupů. V profilech, kdy převažují velké letní povodně, lze přisoudit větší váhu výsledkům varianty  $vQ$ .

Můžeme oprávněně předpokládat a zkušební výpočty potvrzují, že rozptyl jednotlivých bodů od středního vztahu bude značný, což odpovídá tomu, že uplatnění vlivu PPO je značně závislé zejména na tvaru povodňových vln. U povodní jednoduchého tvaru, které mají jen jeden vrchol, platí, že při stejném kulminačním průtoku jsou více zmenšeny povodně s kratší dobou vzestupu. U povodní s dvěma srovnatelnými vrcholy je situace podstatně složitější. Také v případě, kdy posuzujeme zmenšení kulminačního průtoků v profilu podstatně vzdáleném od PPO, je pokles ovlivněn dalšími okolnostmi. Další postup spočívá v tom, že pomocí regresní analýzy určíme vztah,



Obr. 3. Typický průběh vztahu mezi neovlivněnými kulminačními průtoky  $Q_{max}$  a poklesy kulminačních průtoků  $\Delta Q_{max}$

který udává pro neovlivněnou velikost kulminačního průtoku střední velikost jeho změny. Pro hodnoty  $N$ -letých průtoků neovlivněných PPO standardně zpracovaných podle metodik ČHMÚ z něj odhadneme velikosti poklesu  $\Delta Q_N$  a vypočteme ovlivněné  $N$ -leté průtoky  $Q_{N,ovl}$

$$Q_{N,ovl} = Q_N - \Delta Q_N \quad (9)$$

Zda datový soubor, který použijeme pro proložení vztahu (6), resp. (7), obsahuje dostatek informací pro dosažení přiměřeně věrohodného odhadu, závisí zejména na jeho rozsahu a na tom, zda obsahuje i případy extrémních povodní.

Variety přepočtu průtoků z vodoměrné stanice do profilů PPO, označené vA a vQ7, vedou obecně k odlišným hodnotám poklesu  $\Delta Q_{max}$ . Z rozdílných předpokladů o rozložení povodňového odtoku na ploše povodí vyplývá, že v případě, kdy PPO jsou umístěna v horních částech povodí, na menších dílčích povodích, projev se jejich účinek více u varianty vQ. Vzhledem k tomu, že u zimních povodní je pravděpodobnější rozložení odtoku blízké předpokladu varianty vA, a vzhledem k tomu, že se vyskytují i letní povodně s centrem srážek v dolní části povodí, doporučujeme pro výsledný odhad regresních vztahů (6) používat průměr výsledků z variant výpočtů vA a vQ.

Podle zkušeností z dosud provedených výpočtů vyplývá, že typickým průběhem vztahu (6) je zvětšování velikosti  $\Delta Q_{max}$  účinkem PPO jen do určité velikosti průtoků, s následným poklesem až do nulových hodnot pro extrémní povodně. Ukázka takového vztahu je na obr. 3. V případě, kdy retenční účinek PPO je mimořádně velký, může oblast, ve které nastává pokles hodnot  $\Delta Q_{max}$ , být i mimo rozsah standardní sestavy  $N$ -letých průtoků, tj. v oblasti průtoků větších než  $Q_{100}$ .

V rozsahu průtoků s průměrnými dobami opakování 1 rok až 20 let lze při běžných délkách pozorování (několik desítek let) regresní vztahy typu (7) a (8) odhadnout poměrně věrohodně podle výsledků modelování. Pro oblast průtoků s delší průměrnou dobou opakování převyšující jejich rozsah pozorování nelze průběh proložený v oblasti průtoků s kratší průměrnou dobou opakování mechanicky extrapolovat. Rozhodujícím podkladem jsou výsledky získané pro největší pozorované povodně. V případě nejistot lze rozšířit o modelové řešení vycházející z modelového výpočtu pro teoretickou  $N$ -letou povodeň (např. pro  $N = 100$ ), odvozenou podle metody popsané v referátu Boháč, Kašpárek a Kulasová (2001) pro posuzovanou vodoměrnou stanici a dále zpracovanou modelovou simulací stejně jako povodně pozorované.

Pokud je předmětem řešení odhad změn  $N$ -letých průtoků odděleně pro zimní a letní povodně, sestaví se odděleně i výše uvedené vztahy. I v případě, že se zabýváme jen  $N$ -letými průtoky z ročních maxim, je vhodné posoudit, jakým podílem se případy z obou pololetí podílejí na souboru, z kterého jsou  $N$ -leté průtoky odvozovány, v závislosti na velikosti průtoku, resp. průměrné době opakování. Tato skladba může být v říční síti proměnlivá, s narůstající plochou povodí často přibývá zimních případů. Zejména na menších povodích se obvykle největší kulminační průtoky vyskytují u letních povodní. Informace o tom, jakého typu jsou zejména povodně odpovídající dlouhým průměrným dobám opakování, je vhodné využít při analýze vztahů typu (7) zejména odhadu velikosti hodnot  $\Delta Q_{max}$  v oblasti průtoků s dlouhou průměrnou dobou opakování.

Popsaný postup se provede pro posuzovanou vodoměrnou stanici (vodoměrné stanice), popř. další zvolené profily posuzované soustavy nad řešenou vodoměrnou stanicí. V posuzovaných profilech, které nejsou ve vodoměrných stanicích, se místo pozorovaných průtoků v rovinách (5) a (6) použijí průtoky modelované pro stav povodí bez PPO.

Vzhledem k tomu, že pro odhad zmenšení kulminačních průtoků v oblasti dlouhých průměrných dob opakování nemůžeme mít dostatek informací, je vhodné pokusit se nejistotu odhadů založených na zpracování v jednotlivých vodoměrných stanicích ověřit posouzením jejich relací v návaznosti říční sítě.

### 3.8 Interpolace poklesů maximálních průtoků

Výše popsaný výpočet  $N$ -letých průtoků ovlivněných PPO se vztahuje na předem vybrané profily řešené soustavy, zejména profily vodoměrných stanic, popř. na další profily, pro které je řešení požadováno. Pokud je třeba poté, co proběhlo základní zpracování, stanovit  $N$ -leté průtoky ovlivněné PPO v jiných profilech, není nezbytné modelové výpočty v modifikované soustavě opakovat.

Pro profily říční sítě mezi posuzovanými profily odtoku z vodních nádrží a vodoměrnými stanicemi lze podle výsledků v těchto profilech poklesy maximálních průtoků interpolovat. Pro profily pod nejnižší položenými vodoměrnými stanicemi na hlavním toku a přítocích se obdobně uplatní extrapolace dat.

Nejjednodušší z možných modelů, které popisují propagaci poklesu účinku PPO z horního profilu směrem po toku, by byl založen na předpokladu, že velikost poklesu  $\Delta Q_{max}$  vyjádřená v  $m^3s^{-1}$  je v dolním profilu stejná jako v profilu horním. V tomto případě by se směrem po toku snižoval jen relativní pokles  $\Delta_r Q_{max}$ , v závislosti na zvětšování  $N$ -letých průtoků.

Hydrogramy transformované vlivem protipovodňových opatření mají kulminační průtok nejen zmenšený, ale také časově posunutý, časová

skladba hydrogramů ovlivněných průtoků je jiná než u hydrogramů neovlivněných. Uvedený nejjednodušší model tedy nemůže odpovídat skutečným poměrům. Oprávněně lze očekávat a dosud získané výsledky také ukazují, že účinek protipovodňových opatření (pokud jde o pokles kulminačních průtoků) s narůstající plochou povodí klesá nejen v relativním měřítku, ale v průměru i v absolutní velikosti.

Problematika stanovení proměny poklesu vlivem PPO při průchodu říční sítě je dosti složitá. U konkrétních povodní nezáleží jen na zřejmém vlivu umístění centra příčné srážky, ale také na vztahu mezi dobou trvání deště a dobou, za kterou se v posuzovaném profilu uplatní odtok z celého povodí. Míra proměny povodňového hydrogramu ovlivněného PPO při průchodu říčním úsekem s významným působením rozlivů je závislá na tom, zda vlivem PPO byly zmenšeny průtoky v celé oblasti vrcholu povodně. Rozliv do inundace pak již má v porovnání s neovlivněnou povodní menší účinek. Pokud je vlivem PPO vrcholová část hydrogramu jen zeshňlena, může být působení rozlivu do inundace účinné a způsobí znatelný pokles kulminačního průtoku – větší než u neovlivněného hydrogramu.

Z hlediska praktických aplikací je třeba zvolit postup, který umožní interpolovat velikost poklesu  $\Delta Q_{max}$  v profilech mezi počátkem a koncem posuzovaného úseku. Interpolace v závislosti jen na ploše povodí patrně není vhodná. Nezhlednala by, že specifický průtok obvykle směrem po toku klesá a vliv přítoku z mezipovodí se zeslabuje.

Pro interpolaci navrhuje použít jako řídicí proměnnou průměr maximálních kulminačních průtoků  $Q_{max,prům}$  (tato veličina je standardně používána při odvozování  $N$ -letých průtoků), nebo přímo velikosti příslušných  $N$ -letých průtoků. Pro interpolaci běžně postačuje lineární funkce.

Složitější je řešení skladby poklesů PPO na soutoku hlavního toku a přítoku, které je třeba řešit, když v povodí hlavního toku a v povodí přítoku jsou uvažována PPO. Pokud nebyly profily nad soutokem a profil pod soutokem zahrnutý do modelového řešení, lze výpočet velikosti  $\Delta Q_{max}$  pod soutokem založit na předpokladu, že skladba poklesů kulminačních průtoků je obdobná jako skladba neovlivněných kulminačních průtoků.

V soutokovém uzlu označíme  $N$ -leté průtoky a jejich poklesy indexy  $d$  pro profil pod soutokem,  $h$  pro profil nad soutokem a  $p$  pro závěrový profil přítoku.

Skladba  $N$ -letých průtoků je založena na použití koeficientů  $R_N$ . Vzhledem k tomu, že  $N$ -leté průtoky v profilech soutokového uzlu známe, lze je vypočítat z rovnice

$$C_N = Q_{N,d} / (Q_{N,h} + Q_{N,p}) \quad (10)$$

Poklesy  $\Delta Q_{N,d}$  pod soutokem pak vypočteme ze vztahu

$$\Delta Q_{N,d} = (\Delta Q_{N,h} + \Delta Q_{N,p}) C_N \quad (11)$$

a  $N$ -leté ovlivněné průtoky pod soutokem jsou

$$Q_{N,d,ovl} = Q_{N,d} - \Delta Q_{N,d} \quad (12)$$

Hodnoty neovlivněných průtoků potřebné pro popsaný výpočet jsou standardně obsaženy v katastru  $N$ -letých průtoků, který je odvozený z ročních kulminačních průtoků. V případě hodnocení sezonních povodní je třeba je nechat zpracovat v ČHMÚ.

## 4 Uplatnění certifikované metodiky

Metodika zpracování  $N$ -letých průtoků změněných vlivem protipovodňových opatření určuje jen zásadní postup zpracování. Řešení vyžaduje náročnou přípravu dat, sestavení modelu povodí včetně protipovodňových opatření a zpracování výsledků modelování. Jde o úlohu, spadající do kategorie „hydrologická studie“. Od uživatele metodiky je vyžadována zkušenost se zpracováním hydrologických návrhových dat. Zpracováním  $N$ -letých průtoků změněných vlivem protipovodňových opatření jsou proto pověřeni výhradně uživatelé metodiky – Český hydrometeorologický ústav a Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

Tato metodika je výsledkem řešení výzkumného záměru MZP0002071101 Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů.

## Literatura

- Boháč, M., Kašpárek, L. a Kulasová, B. (2001) Odvození extrémních povodňových vln statistickými přístupy. In Vývoj metod pro odhad extrémních povodní. Praha : ČVTS, s. 70–95. ISBN 80-02-01441-5.
- Kašpárek, L. aj. (2005) Vliv a možnosti využití ochranné funkce údolních nádrží pro ochranu před povodněmi v povodí Labe. Závěrečná zpráva VaV 650/6/03. Praha : VÚV TGM, s. 104–106.
- Kašpárek, L., Novický, O., Jeníček, M. a Buchtela, Š. (2005) Vliv velkých údolních nádrží v povodí Labe na snížení povodňových průtoků. Praha : VÚV TGM, 44 s. ISBN 80-85900-56-4.
- Kašpárek, L. (2009) Metody hodnocení účinků protipovodňových opatření na  $N$ -leté průtoky. VTEI, 2009, 51, mimoř. č. I, s. 13–16, příloha Vodního hospodářství č. 11/2009.

- Kašpárek, L. a Hanel, M. (2010) Základní zásady metodiky pro stanovení  $N$ -letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními. *VTEI*, 2010, 52, mimoř. č. II, s. 1–5, příloha Vodního hospodářství č. 11/2009.
- Lett, P. (1999) Koefficienty snížení velkých vod v soutokovém uzlu říčního systému – analýza problému. In *Sborník prací ČHMÚ*, sv. 47, Praha, ČHMÚ, s. 36–46. ISBN 80-85813-65-3
- Novický, O., Kašpárek, L. a Kolářová, S. (1992) Hydrologická data pro návrhové účely. Světový klimatický program – voda. Praha: ČHMÚ, 143 s.
- Starý, M. a Březková, L. (2002) Stanovení účinku nových retenčních nádrží na průběh povodní v povodí Tiché Orlice. Brno, 256 s.
- Starý, M. a Březková, L. (2003) Stanovení účinku nových retenčních nádrží na průběh povodní v povodí Tiché Orlice. In *Sborník referátů z konf. Protipovodňová prevence a krajinné plánování*, Pardubice, s. 273–279.
- Starý, M. a Březková, L. (2006) Stanovení účinnosti vodních děl v povodí Třebovky. Brno, 42 s.

## Seznam použitých symbolů

PPO	protipovodňové opatření, tj. nejčastěji nádrž s retenčním účinkem,
$t$	čas,
$N$	průměrná doba opakování kulminačního průtoku [let],
$A$	plocha povodí [km <sup>2</sup> ],
$vA$	varianta přepočtu průtoků z vodoměrné stanice do jiného profilu založená na poměru ploch povodí,
$vQ$	varianta přepočtu průtoků z vodoměrné stanice do jiného profilu založená na poměru průměrů ročních maximálních průtoků,
$k$	koefficient pro přepočet průtoků z vodoměrné stanice do zvoleného profilu,
$Q_N$	$N$ -letý průtok [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] doby opakování $N$ ,
$Q_{N, ovl}$	$N$ -letý průtok [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] doby opakování $N$ ovlivněný účinkem protipovodňových opatření,
$Q_{max}$	neovlivněný maximální kulminační průtok [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] ze zvoleného období (roční, zimní pololetí, letní pololetí),
$Q_{max, ovl}$	maximální kulminační průtok [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] ze zvoleného období ovlivněný účinkem protipovodňových opatření,
$Q_{max, prům}$	průměr maximálních ročních kulminačních průtoků [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] za víceleté období,
$q_{max, prům}$	specifický průměr maximálních ročních kulminačních průtoků [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> ] za víceleté období,
$\Delta Q_{max}$	absolutní změna kulminačního průtoku $Q_{max}$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] způsobená vlivem protipovodňových opatření,

$\Delta Q_N$	absolutní změna $N$ -letého průtoku $Q_N$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] způsobená vlivem protipovodňových opatření,
$\Delta_r Q_{max}$	relativní změna kulminačního průtoku $Q_{max}$ [%] způsobená vlivem protipovodňových opatření,
$Q_p$	průtok v profilu protipovodňového opatření nebo v jiném zvoleném profilu,
$Q_{vs}$	pozorovaný průtok ve vodoměrné stanici,
$t_p$	postupová doba průtoků,
$VS$	vodoměrná stanice,
$VN$	vodní nádrž,
$I_t$	objem přítoku do nádrže v čase $t$ ,
$O_t$	objem odtoku z nádrže v čase $t$ ,
$\Delta S_t$	změna objemu v nádrži mezi časy $t$ a $t+1$ .

### Poděkování

Článek vznikl v rámci výzkumného záměru MZP0002071101 Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů, financovaného Ministerstvem životního prostředí České republiky. Článek vychází z výsledků části Dopady klimatických a antropogenních změn na vodní režim a přírodní prostředí zahrnuté do oddílu A (hydrologie).

Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Martin Hanel  
VÚV TGM, v.v.i, Praha  
ladislav\_kasperek@vuv.cz, martin\_hanel@vuv.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

*A method for determination of  $N$ -year discharges influenced by flood protection measures (Kašpárek, L.; Hanel, M.)*

### Key words

*maximum flow series –  $N$ -year floods – flood protection measures*

**The  $N$ -year discharges, as the standard design values, are typically derived assuming no flood protection measures. Using discharges unaffected by flood protection measures for studies like estimation of the floodplain extent might be illogical. In present paper, a method for calculation of  $N$ -year discharges influenced by flood protection measures, especially by reservoirs, is introduced. Data selection and the key steps of the proposed approach are described.**

## Publikace Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky

Jde o jednu z řady monografií vydaných v rámci hydrologického výzkumu ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v.v.i. Publikace čerpá z výsledků výzkumného projektu SP/1a6/125/08 s názvem *Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky*, který probíhal v letech 2008–2010. Cílem projektu bylo zpracování časových řad odtoku vody z hlediska nedostatkových objemů, odhad pravděpodobného vývoje suchých období podle modelovaného vývoje klimatu a vyhodnocení vlivu malých průtoků na jakost vody v tocích.

Epizody extrémního sucha mají negativní vliv na vodní zdroje a mohou vážně poškozovat životní prostředí. Sucha mohou být spolu s povodněmi považována v České republice za nejvýznamnější přírodní pohromu. Tradičně jsou rozlišovány tyto vzájemně provázané kategorie sucha: meteorologické, hydrologické a zemědělské, popř. socioekonomické pro dopad předcházejících typů sucha na ekonomickou sféru. Ke kvantifikaci sucha se používá řada ukazatelů založených na měření srážek, půdní vlhkosti nebo průtoků v závislosti na konkrétním účelu analýzy.

Hydrologické sucho je spojováno s důsledky bezsrážkových období pro povrchové a podzemní vody. Extremita, intenzita a frekvence hydrologického sucha je obvykle definována v měřítku povodí. Ačkoli každé sucho má původ v nedostatku srážek, hydrologie se více zabývá jeho dopady na tvorbu odtoku. Hydrologické sucho obvykle reaguje na meteorologické a zemědělské sucho s jistým zpožděním. Hydrologické sucho je spojeno s poklesem průtoků a současně s poklesem hladin podzemní vody a jejich zásob.

Práce se zabývá:

- Vymezením a analýzou standardizovaných deficitních objemů a jejich trvání za využití dlouhých řad průměrných denních průtoků od roku 1931 pomocí programu

*Nizówka 2003*. Limitním průtokem pro stanovení sucha byl zvolen průtok se 70% a 95% zabezpečením.

- Vyhodnocením standardizovaných nedostatkových objemů a jejich trvání v řadách průměrných měsíčních průtoků od roku 1931 pomocí programu *ExDevS* a *ExDevB* vyvinutých pro tento účel v rámci projektu. Je uvedeno řešení s prahovými hodnotami  $Q_{70}$  a  $Q_{95}$  pevnými i proměnlivými během roku v závislosti na křivce překročení průtoků daného měsíce. Jsou analyzovány měření a přirozené průtoky. Na příkladu stanice Děčín je analyzována dlouhá časová řada od roku 1851.
- Vlivem nádrží na velikost sucha.
- Srovnáním identifikace sucha v denních a měsíčních řadách odtoku.
- Posouzením existence trendu v časových řadách ročních a měsíčních hodnot standardizovaných nedostatkových objemů pomocí modifikované verze Mann-Kendallova testu trendu.
- Rozborem vztahu nedostatkových objemů k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí.
- Modelováním hydrologické bilance v podmínkách změny klimatu s využitím výstupů z regionálních klimatických modelů. Stručně je pojednána část o použitím modelu hydrologické chronologické bilance BILAN a vybraných scénářích charakterizujících podmínky klimatu k referenčním letům 2025, 2055 a 2085. Podrobně je rozvedena část komentující předpokládané změny celkového odtoku i jednotlivých složek hydrologického cyklu.
- Pojednáním o indexech meteorologického sucha a způsobech jejich stanovení a shrnutím výsledků stanovení indexů sucha v souboru povodí, na nichž byla modelována hydrologická bilance.
- Hodnocením vlivu nízkých průtoků na jakost vody na příkladu vybraných přítoků VN Orlik a na odtoku z nádrže. Byly sledovány změny obecných ukazatelů jakosti vody – teploty, pH, rozpuštěného kyslíku, chemické a biochemické spotřeby kyslíku, nerozpuštěných látek, dusičnanů, fosforu a dalších látek. Pozornost byla věnována jakosti vody při průtocích se 70% zabezpečením.

*Vlnas, R. aj.: Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky. Praha: VÚV TGM, 2010, ISBN 978-80-87402-11-5*

# REKONSTRUKCE KULMINAČNÍHO PRŮTOKU HISTORICKÉ POVODNĚ Z 23. KVĚTNA 1908 NA VODNÍM TOKU DOUBRAVA

Adam Beran

## Klíčová slova

historická povodňová vlna – kulminační průtok – model říční sítě HEC-RAS – hydraulické modelování

## Souhrn

Tento příspěvek seznamuje s postupy a výsledky určování kulminačních průtoků při povodni ve zvolených úsecích vodního toku Doubrava v obcích Žleby a Ronov nad Doubravou. K modelování průtoků byl použit hydraulický model říční sítě HEC-RAS. Jako největší povodeň na vodním toku Doubrava byla podle historických materiálů určena událost z 23. května 1908. Kulminační průtok pro tuto událost byl pomocí modelování stanoven na 350 m<sup>3</sup>/s, což potvrdilo domněnku, že hodnota průtoků vypočtená pro povodni byla z nějakého důvodu nadhodnocena, tento rozdíl činil 50 m<sup>3</sup>/s.

## Úvod

V květnu roku 1908 zasáhla povodňová vlna vodního toku Doubrava ta největší povodeň v zaznamenané historii (Boháč aj., 2008; Elleder aj., 2008). Obrovské množství vody, které proteklo přilehlými obcemi, napáchalo velké škody jak na majetku, tak na životech. Velikost kulminačního průtoků se zdá být tehdejšími výpočty poněkud nadhodnocena, to může být například nepřesným odečtením z vodočtu, zvolením nevhodného drsnostního součinitele nebo nezahrnutím jiných okolností. Pro určení teoretické povodňové vlny se zvolenou dobou opakování 10 000 let pro účely posouzení bezpečnosti VD Pařížov při povodni bylo rozhodnuto, že dojde k rekonstrukci povodně s určením velikosti kulminačních průtoků v obcích Žleby a Ronov nad Doubravou, které leží na toku Doubravy pod VD Pařížov. Postup práce zahrnoval hledání informací o povodni v dochovaných historických pramenech, zaměření říčních úseků geodetickými přístroji a 1-D modelování ustáleného nerovnoměrného proudění v modelu říční sítě HEC-RAS.

## Data a metody

Jelikož od povodně uplynulo již 102 let, bylo určitou výzvou najít a utřídit co nejvíce informací popisujících inkriminovanou událost. Navštíveny byly regionální archivy v Chrudimí a Třemošnici, také Národní archiv ČR a archiv Českého hydrometeorologického úřadu v Brozaněch. Z nalezených materiálů byly pro sestavení co nejpřesnějšího hydraulického modelu území nejužitečnější: dobová korespondence úřadů obcí zasažených povodní, dále technické výkresy znázorňující tvar tehdejšího železničního mostu ve Žlebech, který povodeň úplně zničila, nebo půdorysný plán Žleb se zakreslenou a geodeticky zaměřenou povodňovou situací. Další cenné informace byly objeveny v kronikách obcí Žleby, Ronov nad Doubravou a Kněžice.

Pro sestavení hydraulických modelů byly říční úseky v terénu geodeticky zaměřeny totální stanicí TOPCON. Ve Žlebech, kde jsou známé tři povodňové značky, bylo na úseku dlouhém cca 1 300 m zaměřeno šest příčných profilů. V Ronově nad Doubravou je známá bohužel jen jediná výška hladiny povodně 1908. Zde bylo zaměřeno sedm profilů na úseku cca 1 100 m.

Data z totální stanice byla upravena v geografickém informačním systému ArcGIS a poté byly příčné profily vkládány do programu HEC-RAS, ve kterém byl vytvořen 1-D model říční sítě. Drsnostní součinitele koryt a jejich inundací byly voleny podle předchozí rekognoskace terénu ve srovnání s literaturou (Brachtl a Taus, 1962) a po konzultaci s pracovníky Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v.v.i. Na sestavení modelu byly simulovány průtoky různé velikosti a byly vybrány ty, které nejlépe odpovídaly zaměřeným povodňovým značkám z 23. května roku 1908.

Rekonstrukcí historických maximálních průtoků se ve světě zabývali např. Sudhaus et al. (2008) pro povodně 1824 a 1882 na vodním toku Neckar v Německu. Dále lze jmenovat nedávno otištěný článek (Wetter et al., 2011) o největší povodni od roku 1268 na řece Rýn v Basileji. Z českých autorů lze uvést Kašpárka (1984), který se zabýval povodněmi z let 1872 a 1981 na vodním toku Litavka.

Pro účely jednodimenzionálního modelování proudění v říčním korytě je k dispozici celá řada programů, které se liší uživatelským rozhraním, typem zpracovávaných úloh a samozřejmě cenou. Právě díky volnosti volného stažení z internetu byl vybrán software HEC-RAS. Další používané programy jsou např.: MIKE 11, MIKE FLOOD, HYDROCHECK nebo LISFLOOD-FP popsané v diplomové práci Berana (2011).

## Výsledky

### Průtok Žleby

Při hledání v historických pramenech bylo z článku Stupeckého (1914) zjištěno, že ve Spačicích, které leží na toku Doubravy nad přehradou Pařížov, „...vodní množství za nejvyššího stavu velké vody z r. 1908 měřeno nebylo, přijal se pro jeho vyšetření maximální odtok z 1 km<sup>2</sup> zahrazeného povodí hodnotou 1,1 m<sup>3</sup>/sek.“ Očividně i v úseku Žleby byl průtok po roce 1908 vypočten z téměř stejné velikosti specifického kulminačního průtoků, jako tomu bylo pro Spačice. Pro plochu povodí 383 km<sup>2</sup> byla použita hodnota specifického kulminačního průtoků 1,04 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>, a tedy průtok vyšel 400 m<sup>3</sup>. V dalším historickém článku (Pech, 1934) se autor sice o této povodni zmiňuje, jako rozsah čtyř maximálních průtoků ve Žlebech z období desetiletí 1904 až 1914 uvádí 76–122 m<sup>3</sup>/s, přičemž úplně největší průtok před rokem 1913 uvádí 152 m<sup>3</sup>/s bez určení data. Patrně jde o povodeň z roku 1897. V článku Pecha (1934) jsou uvedeny kulminační průtoky ze stanice Kobylnice (nacházela se zhruba 4,4 km nad ústím Doubravy do Labe, tj. přibližně 19 km po toku od Žleb) z období 1900–1930 a že Žleb z období 1913–1928. Z porovnání kulminačních průtoků Pech vyvodil, že „u největších vod ve všech případech nastává značnější snížení průtoků (asi o 20 %) při přechodu povodňové vlny ze Žleb do Kobylnice. Snížení to vzniká rozlítím těchto největších vod do rozsáhlých inundačních prostor mimo břehy.“ Nicméně snížení ze 400 m<sup>3</sup>/s na 78 m<sup>3</sup>/s pro povodeň z roku 1908 se při porovnání s ostatními povodněmi jeví jako vysoce nepravděpodobné, i když se na větším transformačním účinku jistě podílel strmější vzestup i pokles průtoků a relativně menší objem odtoku za této povodně. Při porovnání objemu povodňové vlny ve Žlebech, kde je hodinový záznam vodních stavů, a rekonstrukce průtoků z denních čtení vodočtu v Kobylnici se ukazuje, že za předpokladu měrné křivky průtoků ve stanici Žleby směřující pro stav 520 cm do průtoků 400 m<sup>3</sup>/s je objem vlny ve Žlebech cca o 30 % (3,8 mil. m<sup>3</sup>) větší než v Kobylnici. Není pravděpodobné, že by se tak velké množství vody vsáкло do údolní nivy.

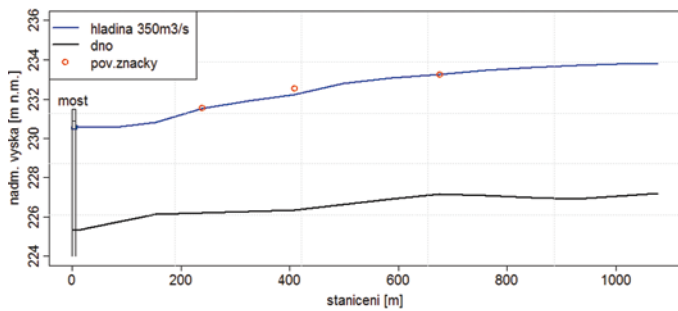
V historických materiálech byl nalezen výkres příčného profilu i údaj o sklonu hladiny, podle kterých byl maximální průtok ve Žlebech vypočten. V rukopisu Vogela (1909) se zachoval i výpočet podle vzorce Gaungilleta a Kuttera. Avšak dá se polemizovat, zda tehdy zvolené koeficienty drsnosti pro vlastní řečiště (0,025) a pro inundace (0,030) nejsou příliš nízké.

V článku v Národních listech z 26. 5. 1908 se píše, že „most místní dráhy Čáslav–Závratec jest stržen“, což může zpochybňovat dosud uvažovanou hodnotu kulminačního průtoků 400 m<sup>3</sup>/s. Tento most se nachází cca 300 m pod místem, kde byl zaměřen příčný profil použitý pro výpočet kulminačního průtoků. Je velmi pravděpodobné, že příhradová mostní konstrukce spolu se zachycenými splavenými předměty z vyšších poloh toku vytvořila překážku pro proudění a vzdouvala hladinu v úseku nad mostem. Tuto domněnku potvrzuje i Protokol z jednání o vypracování projektu na definitivní přestavbu mostu (1908), v kterém zástupce čáslavského okresu žádal, „aby nový železniční most zřízen byl tak, aby voda při velkých srážkách měla náležitý odtok a nebyla mostem nikterak vzdouvána a aby tak stále se opakující škody zamezeny byly“. V protokolu se také konstatuje, že „na místě samém nadevší pochybnost zjištěno bylo, byl při povodni dne 23. 5. 1908 ve Žlebech panovší podemletí levý pilíř železničního mostu a byl taras, pokud se týče břehu na levé straně Doubravy před mostem tím stržen a valně poškozen. Totéž v míře poněkud menší stalo se i za povodně r. 1897 a i za povodně dřívější a nutno hledati příčinu v tom, že most železniční byl nešťastně položen a situován jmenovitě v tom, že levý pilíř železničního mostu postaven byl přímo proti proudnici vody a že průtočná plocha železničního mostu byla nepřiměřeně malá, následkem čehož katastrofální vodu pojmouti nemohla.“

V Národním archivu ČR se podařilo nalézt výkresy původního železničního mostu a stavu jeho profilu po povodni 1908 obsahující i návrh jeho změn včetně úprav přílehlého říčního koryta i mapu zaplaveného území ve Žlebech s vyznačenými nadmořskými výškami maximální hladiny.

Při geodetickém zaměřování říčního úseku v obci Žleby bylo zaměřeno šest příčných profilů od silničního mostu u kostela k železničnímu mostu. Změřena byla dochovaná povodňová značka na nábrežích K. Marxe. Další výšky hladiny byly převzaty z dokumentu Lageplan des Inundationsgebietes am Doubrava Flusse in der Gemeinde Žleb für den Stand des Hochwassers am 23. 5. 1908, jehož kopie byla získána z fondu Generální inspekce Rakouských drah a Českého místodržitelství z Národního archivu České republiky.

Doubrava ve Žlebech protéká zaříznutým korytem se zástavbou po obou březích. V současné době je řečiště přibližně v polovině úseku upraveno do obdélníkového tvaru. Podle dochovaných fotografií bylo koryto již v roce 1908 v menším rozsahu opevněno podél levého břehu. Pro výpočty byl, s přihlédnutím k fotodokumentaci stavu řečiště po povodni, koeficient drsnosti hlavního koryta zvolen 0,045 a pro inundaci pak hodnota 0,1. Při aplikaci 1-D modelu ustáleného nerovnoměrného proudění v programu HEC-RAS zjištěným stopám nejlépe odpovídá průtok  $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ . Průběh namodelované hladiny s vyznačením stop z povodně je vykreslen na obr. 1.



**Obr. 1.** Podélný profil hladiny pro průtok  $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$  na úseku Žleby s vyznačením povodňových značek z května 1908

### Průtok Ronov nad Doubravou

V regionálním časopise Ronov nad Doubravou – Městečko (2007) byla nalezena citace zápisu z hasičské kroniky z roku 1908: „V den 23. května přehnaly se mraky zlověstné, spojené s bouří, která se rozpoutala s průtrží mračen, voda v řece rychle stoupala a protřazením horních rybníků dostoupila takové míry, že zatopila obydlí poblíž řeky, že dobytek musel být vyváděn a i vynášen. Zatopeny byly statky na obci p. Pospíšila a p. Davida, přes most dále k pivovaru, který zatopila, že nebylo k němu přístupu a obyvatelé se museli utéci do vyšších míst. Nejhůře řádila ve mlýně „Podzámeckém“, kdež vnikla do všech místností, stájí, odplavila veškeré dříví a prkna, zničila a pokazila mlýnské zařízení i stroje a pilu. Sbor zúčastnil se pracích záchranných, kde mohl, bohužel proti rozpoutanému živlu byly síly slabé.“ V informaci z hasičské kroniky je uvedena informace o protřazení horních rybníků, bohužel bez dalších upřesňujících informací.

Při průzkumu uvedených míst bylo shledáno, že Podzámecký mlýn již neexistuje, avšak jez, který pro něj vzdouval vodu, je zachován v původním stavu, což vyplývá z porovnání fotografie z roku 1903 s nynějším stavem.

V knize Hruškové a Turka (1999) byly nalezeny konkrétnější informace, a sice o zatopení Korečnického mlýna, který se nachází v místech, kde Doubrava vtéká do Ronova. Mlýn byl údajně založen již roku 1306. Informace o povodni z roku 1908 pochází z rodinné kroniky majitelů mlýna: „Když průtrže mračen na horním toku Doubravy způsobily v květnu 1908 velkou povodeň, zaplavila řeka „amerikána“ do prvního patra a u českého mlýna sahala až k oknům šalandy.“ „Amerikán“ je typ mlýna a šalanda je místnost, kde čekali zákazníci na semletí obilí. Obě budovy, „amerikán“ i starší český mlýn jsou zachovány a současní majitelé nám byli schopni ukázat okna šalandy, takže výška hladiny povodně je zde známa. Korečnický mlýn je přibližně 900 m nad profilem jezu bývalého Podzámeckého mlýna.

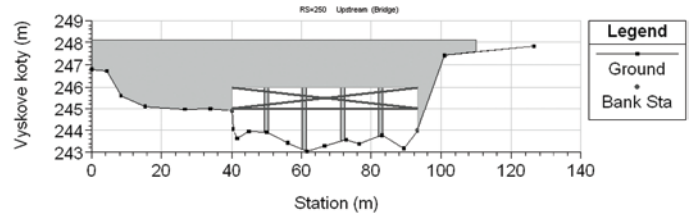
Začátek zaměřovaného úseku v Ronově nad Doubravou byl asi 100 m nad Korečnickým mlýnem. Konec byl pak v koruně jezu, který vzdouval vodu pro Podzámecký mlýn. Celý úsek je dlouhý cca 1 200 m a bylo na něm zaměřeno sedm příčných profilů. Řečiště v těchto místech má malý sklon s vyvinutou nivou, která z podstatné části nebyla v roce 1908 zastavěna. Přibližně 200 m nad jezem je silniční most, o jehož tehdejších rozměrech a pravděpodobné míře zacpání nebyly nalezeny žádné informace, takže pokus na základě geodetického zaměření úseku od Korečnického mlýna po uvedený jez aplikovat model ustáleného nerovnoměrného proudění HEC-RAS nelze brát jako důvěryhodné určení průtoku, ale jen jako zjištění, zda se průtok blíží namodelovanému průtoku ve Žlebech, které leží cca 5 kilometrů pod Ronovem.

V programu HEC-RAS se most modeloval podle nynějšího stavu a jako okrajová podmínka pro výpočet se zadal podélný sklon koryta, který je podle zaměření 0,0021. Drsnost koryta byla zvolena 0,04 pro hlavní koryto a 0,1 pro inundaci. Po prvních simulacích byl vypočten průtok okolo  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , což neodpovídá vypočtenému průtoku ve Žlebech. Je velmi pravděpodobné, že při extrémní povodni byl most splaveným materiálem z horní zalesněné části povodí ucpán a vzdouval hladinu. V programu HEC-RAS se provedl pokus se zacpáním profilu mostu. Dolní úroveň mostovky se snížila o 1 m (obr. 2). Na obr. 3 je zachycen podélný profil koryta s vyznačením úrovně hladiny pro průtok  $Q = 295 \text{ m}^3/\text{s}$  při zacpaném mostu. Z těchto výsledků je patrné, že kulminační průtok se mohl pohybovat kolem  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Přesná hodnota se bohužel kvůli nedostatku informací nedá určit.

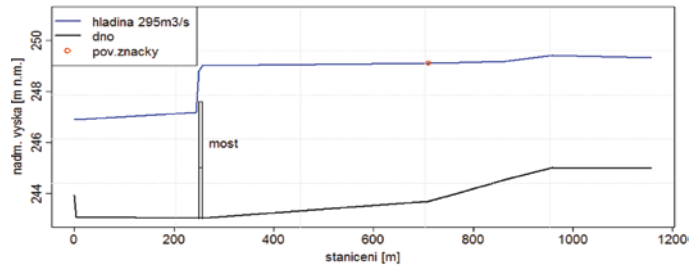
### Závěr

Hodnota kulminačního průtoku při povodni 23. května 1908 na vodním toku Doubrava ve Žlebech byla přímo po povodni odvozena  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . V té době používané výpočetní postupy a poznatky o drsnosti řečišť byly poněkud odlišné od soudobých, vznikly proto pochybnosti o tom, zda průtok nebyl nadhodnocen.

Zpřesnění velikosti kulminačního průtoku v obci Žleby se podařilo díky nalezení důležitých dobových materiálů. Byly jimi zejména plán obce Žleby s půdorysným zakreslením povodně z 23. 5. 1908 a s nivelačními zna-



**Obr. 2.** Příčný profil v místě silničního mostu s vyznačením snížení mostovky o 1 m



**Obr. 3.** Podélný profil hladiny pro průtok  $Q = 295 \text{ m}^3/\text{s}$  na úseku Ronov nad Doubravou při ucpání mostu s vyznačenou povodňovou stopou na Korečnickém mlýně

kami a technický výkres tehdejšího železničního mostu, který byl povodní stržen. Dále byla v obci nalezena historická povodňová značka na fasádě domu na nábřeží K. Marxe. Bez těchto informací by nebylo možné sestavit úplný hydraulický model situace. Simulováním povodně byla vypočtena velikost kulminačního průtoku  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Modelování úseku v Ronově nad Doubravou přesnou hodnotu průtoku nepřineslo, neboť byla nalezena pouze jedna povodňová značka a o stavu koryta a rozměrech silničního mostu přes řeku v roce 1908 nebylo nic zjištěno. Nemohl tedy být sestaven přesný hydraulický model. Byla však provedena simulace se zacpaným mostem, která potvrdila, že za této okolnosti při průtoku cca  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  mohla maximální hladina dosáhnout výšky povodňové značky.

Zmenšení kulminačního průtoku při povodni v roce 1908 o  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  ve Žlebech má význam pro zpřesnění odhadu N-letých průtoků nejen ve Žlebech, ale také jako jeden z podkladů pro odvození teoretické povodňové vlny s dobou opakování 10 000 let (Kašpárek, 2010) pro VD Pařízov na Doubravě.

### Poděkování

Príspevek vznikl pro konferenci Hydrologie malého povodí 2011, na které byl prezentován.  
Děkuji Ing. Liboru Ellederovi, Ph.D., (ČHMÚ) za spolupráci při vyhledávání historických podkladů.

### Literatura

- Beran, A. (2011) Studie historické povodňové vlny z května 1908 na řece Doubravě. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování.
- Brachtl, I. a Taus, K. (1962) Súčinitele drsnosti otvorených kanálov. Veda a výskum praxi 8, Výskumný ústav vodohospodársky v Bratislave, Slovenské vydavateľ'stvo technickej literatury.
- Boháč, M aj. (2008) Hydrologická studie pro VD Pařízov. Praha : ČHMÚ, 24 s.
- Dobrozdání (1909) Dobrozdání c.k. hydrografického oddělení zemského o množství katastrofálního odtoku z povodí rybníků v obci Ostružné a Spačících z 25. května 1909. Rukopis z archivu ČHMÚ v Brozanech.
- Elleder, L., Tyl, R. a Šimadnl, P. (2008) Katastrofální povodeň 23. května v povodí Doubravy. In Workshop A. Patery. Praha : ČVTHS.
- Hrušková, M. a Turek, J. (1999) Tam, kde teče Doubravka, střední Podoubraví. Vydáno vlastním nákladem, Praha, s. 113–115.
- Kašpárek, L. (1984) O povodních z let 1872 a 1981 na Litavce a jejich významu pro odhad n-letých průtoků. Praha : Ústav pro hydrodynamiku, 56 s.
- Kašpárek, L. (2010) Stanovení teoretické povodňové vlny s dobou opakování 10 000 let pro vodní dílo Pařízov na Doubravě. Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka.
- Protokol (1908) Protokol z jednání o vypracování projektu na definitivní přestavbu mostu. Žleby, 21 s. Materiál z archivu ČHMÚ v Brozanech.
- Pech, FA. (1931) Řeka Doubravka a její úprava. *Technický obzor, Časopis českosl. inženýrů*, roč. 34, č. 23, s. 453–458 a č. 24, s. 469–471.
- Ronov nad Doubravou – Městečko (2007) č. 1; dostupný z <http://www.ronovnd.cz/soubory/19>.

- Stupecký, F. (1914) O stavbě vodní nádrže na Doubravě u Pařížova. *Technický obzor*, 1914, č. 26–28, s. 169–171, č. 29–31, s. 175–181, č. 32–33, s. 183–188.
- Sudhaus, D., Seidel, J., Burger, K., Dostal, P., Imbery, F., Mayer, H., Glaser, R., and Konold, W. (2008) Discharges of past flood events based on historical river profiles. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5, 323–344.
- Vogel (1909) Účinek nádrží na Hostačovce u Pařížova. Materiál z archivu ČHMÚ v Brozanech.
- Wetter, O., Pfister, Ch., Weingartner, R., Luterbacher, J., Reist, T., and Trosch, J. (2011) The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. *Hydrological Sciences Journal*, 56, 5, 733–758.

Ing. Adam Beran  
 ÚVU TGM, v.v.i., Praha  
 a Fakulta životního prostředí ČZU v Praze  
 adam\_beran@vuv.cz  
 Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Reconstruction of the historical flood from 23 May 1908 on the Doubrava River (Beran, A.)*

### Key words

historical flood – culmination flow – river analysis system HEC-RAS – hydraulic modelling

The event of May, 23th 1908 was identified as the largest flood on the river Doubrava according to the historical materials. The paper introduces the procedures and results of determination of peak flows during floods in selected parts of the Doubrava River in Žleby and Ronov nad Doubravou. For modelling the HEC-RAS – hydraulic model of river network was used. The estimated peak flow was 350 m<sup>3</sup>/s, which confirmed the hypothesis that the calculated flow rate just after the flood had been for some reason overestimated by 50 m<sup>3</sup>/s.

## VALIDACE GENERÁTORU SRÁŽEK A TEPLoty PRO SIMULACI HYDROLOGICKÉ BILANCE NA POVODÍ CHRUDIMKY

Martin Hanel, Roman Kožíň, Adam Beran, Magdalena Mrkvičková

### Klíčová slova

generátor srážek a teploty – povodí Chrudimky – neparametrický resampling

### Souhrn

Pomocí statistického generátoru využívajícího metodu resamplingu na základě nejbližšího souseda byly generovány tisícileté časové řady srážek a teploty pro pět stanic na povodí Chrudimky. Generované časové řady byly následně použity pro simulaci hydrologické bilance pomocí modelu Bilan. Článek se zaměřuje na validaci vybraných charakteristik generovaných srážek, teploty a z nich odvozených simulovaných průtoků vzhledem k pozorovaným srážkám, teplotě a průtokům simulovaným pomocí hydrologického modelu na základě těchto pozorování. U všech veličin je pozornost věnována zejména průměrům, variabilitě, autokorelaci a extrémům. U průtoků jsou navíc validovány deficitní objemy, průměrné délky sucha a jejich počet. Výsledky ukazují, že statistický generátor je dobře využitelný pro vodohospodářské aplikace, nicméně byly identifikovány některé problémy a navrženo jejich řešení.

### Úvod

V praktických aplikacích ve vodním hospodářství jsou často předmětem zájmu extrémní hydroklimatických veličin, což je dáno zejména tím, že tyto extrémní mohou být doprovázeny škodami značného rozsahu. Hydrologické a meteorologické sucho, povodně a přívalové srážky nebo např. navazující posouzení zabezpečení funkcí vodních nádrží jsou tak předmětem řady odborných studií a publikací. Ve vodohospodářských aplikacích je často nezbytné generovat dlouhé sekvence veličin významně ovlivňujících vodohospodářskou bilanci (zejména srážek a teploty). Praktickým problémem pak je skutečnost, že délka pozorovaných dat jen málokdy umožňuje spolehlivé odhady událostí s dobou opakování větší než cca padesát let a statistické charakteristiky generovaných řad jsou tak často významně ovlivněny předpoklady o (nepozorovaných) extrémních kvantilech rozdělení generovaných veličin. Pro generování několika veličin a/nebo veličin z více stanic navíc není možné zanedbat existující závislosti mezi veličinami. Například v případě sucha je důležité, zda je nedostatek srážek doprovázen nadprůměrnou či podprůměrnou teplotou. V případě posuzování funkce vodohospodářských soustav je zase nezbytné, aby bylo zachováno prostorové rozložení srážek přes jednotlivá subpovodí.

Postupy generování časových řad lze v zásadě rozdělit na parametrické, jež apriori předpokládají, že generovaná veličina má zvolené statistické rozdělení, popřípadě specifikují podobu závislosti mezi veličinami, neparametrické, které nevyžadují specifikaci statistického rozdělení generované veličiny a spoléhají na informaci obsaženou v dostupných datech, a semiparametrické, jež jsou kombinací obou. Neparametrické metody v principu umožňují zachování korelační struktury obsažené v datech (což není v případě parametrických modelů vždy zcela triviální) a implicitně zahrnují nejistotu spojenou s neznalostí statistického rozdělení generovaných veličin. Jsou proto slibným nástrojem využitelným v řadě aplikací od modelování vlivu klimatických změn na hydrologické extrémní (Leander a Buishand, 2007), respektive posouzení zabezpečení zásobní funkce

vodních nádrží v podmínkách klimatické změny, až po předpověď sucha (Hwang a Carbone, 2009).

V předkládaném článku se zabýváme aplikací a testováním simulačního algoritmu využívajícího neparametrický resampling pomocí metody nejbližšího souseda (Lall a Sharma, 1996; Buishand a Brandsma, 2001) pro generování srážek a teploty na povodí Chrudimky. Cílem studie je ověření využitelnosti generátoru pro vodohospodářské aplikace. Generované srážky a teplota jsou proto následně využity pro simulaci průtoku pomocí konceptuálního hydrologického modelu Bilan (Tallaksen a van Lanen, 2004). Metodika, jež je popsána v následující kapitole, byla implementována v prostředí R (R Development Core Team, 2010) a bude v budoucnu využita pro posouzení variant návrhu adaptačních opatření k zmírnění dopadů klimatické změny. Kapitola Aplikace přibližuje zájmové území, použítá data a parametry testovaných simulací, následuje vyhodnocení základních charakteristik simulovaných srážek, teploty a průtoků, včetně základních charakteristik sucha, na něž navazuje diskuse a závěry.

### Metodika

Neparametrický resampling pomocí metody nejbližšího souseda umožňuje generování libovolně dlouhých časových řad zvolených veličin simultánně pro více veličin a více stanic. Podstatou metody je permutace pozorovaných dat způsobem, jenž zachovává autokorelaci a vztahy mezi jednotlivými veličinami a stanicemi. Použitím tohoto algoritmu nejsou v původním časovém rozlišení generovány nepozorované hodnoty, nicméně generováním nepozorovaných sekvencí dochází k výskytu nepozorovaných hodnot při agregaci do delších časových kroků (například permutací pozorovaných denních srážkových úhrnů vznikají měsíční srážkové úhrny ležící mimo pozorovaný rozsah těchto úhrnů). V předkládaném článku vycházíme z postupu navrženého Buishandem a Brandsmou (2001), jenž je stručně shrnut v následujícím textu.

Veličiny vybrané k resamplingu jsou nejprve standardizovány tak, aby měly srovnatelné průměry a rozptyly. Srážky pro den  $t$  jsou standardizované vydělením srážkového úhrnu odhadem průměrného srážkového úhrnu ze dnů s deštěm  $m_{d,wet}$  pro den v roce  $d$ :

$$\tilde{x}_t = x_t / m_{d,wet} \quad (1)$$

$$t = 1, \dots, 365J, d = (t - 1) \bmod 365 + 1, \quad (2)$$

kde  $J$  je celkový počet let v původní časové řadě a  $d$  je zbytek po celočíselném dělení. Obdobně teplota je standardizována odečtením odhadu průměrné teploty ( $m_d$ ) a vydělením odhadem směrodatné odchylky ( $s_d$ ) pro den v roce  $d$ :

$$\tilde{x}_t = (x_t - m_d) / s_d \quad (3)$$

Odhady průměrů a směrodatných odchylek pro den  $d$  jsou vyhlazeny Gaussovským filtrem pro snížení vlivu extrémních denních hodnot.

Stavový prostor je pro každý den  $t$  popsán tzv. příznakovým vektorem  $\mathbf{D}_t$ . Pro resampling srážek a teploty na více stanicích je typicky příznakový vektor tvořen hodnotami srážek a teploty pro den  $t$ , popř. mohou být zahrnuty prostorové průměry srážek a teploty z resamplovaných stanic pro den  $t$  nebo srážkové úhrny a průměrné teploty za několik předcházejících dní. Permutace probíhá na základě podobnosti jednotlivých dní, jež je pro dny  $t$  a  $u$  dána váženou eukleidovskou vzdáleností příznakových vektorů:

$$\delta_{tu} = [\sum_{j=1}^q w_j (v_{tj} - v_{uj})^2]^{1/2}, \quad (4)$$

kde  $v_{ij}$  a  $v_{uj}$  jsou  $j$ té komponenty příznakových vektorů  $\mathbf{D}_t$  a  $\mathbf{D}_u$  a  $w_j$  jsou váhy, v této studii uvažované jako převrácená hodnota směrodatné odchylky  $j$ té komponenty příznakových vektorů.

Hodnota generovaných veličin pro den  $t$  je vybrána tak, že nejprve je identifikováno  $k$  dnů nejpodobnějších dnu předcházejícímu ( $t_j$  dnu  $t-1$ )

a jeden z těchto dní je náhodně vybrán s tím, že pravděpodobnost výběru  $j$ ého souseda je dána předpisem

$$p_j = \frac{1/j}{\sum_{i=1}^k 1/i} \quad (5)$$

Za generované hodnoty stavových veličin pro den  $t$  jsou pak zvoleny hodnoty těchto veličin pro den následující po tomto náhodně zvoleném dnu. Aby byla lépe zachována sezonalita veličin, jsou nejbližší sousedé voleni z časového okna zahrnujícího vždy předchozích a následujících  $n$  dní před resamplovaným kalendářním dnem, kdy  $n$  se řádově volí z rozsahu 10–60 dní.

Generované veličiny jsou následně agregovány do měsíčního kroku a využity k simulaci hydrologické bilance modelem Bilan (Tallaksen a van Lanen, 2004), jenž byl předem nakalibrován s využitím pozorovaných dat (srážek, teploty a průtoků). Hydrologický model Bilan schematizuje povodí na soustavu nádrží ve třech vertikálních úrovních – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody. Velikost toků mezi jednotlivými nádržemi je určována algoritmy modelu, které jsou řízeny osmi volnými parametry. Vstupem do modelu jsou pozorované časové řady srážek a teploty vzduchu. Potenciální evapotranspirace je vypočítána pomocí jednoduché metody (Oudin et al., 2005; Beran et al., 2011) vycházející z teploty vzduchu a množství slunečního záření dopadajícího na horní vrstvu atmosféry (ovlivněno zeměpisnou šířkou a dnem v roce). Bilance na povrchu půdy je určena vstupními srážkovými úhrny a územním výparem určeným na základě potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda infiltuje do půdní zóny, kde plní nádrž s kapacitou, která je jedním z kalibrovaných parametrů. Při překročení této kapacity voda přetéká a následně je dělena do dvou lineárních nádrží. Odtoky z nich představují pomalou (základní odtok) a rychlou (přímý odtok) odezvu povodí, celkový odtok je pak dán jejich součtem (Horáček et al., 2009).

## Aplikace

### Zájmové povodí a data

Výše zmíněná metodika byla aplikována na povodí Chrudimky pro pět subpovodí s vodoměrnými stanicemi 0480 až 0520 (obr. 1). Vstupní data byla získána plošnou interpolací z bodových měření srážek a teploty vzduchu. Pro odhad plošných srážek byla použita metoda Thiessenových polygonů zahrnující korekci na nadmořskou výšku. Srážky byly interpolovány z devíti stanic, teplota pouze ze stanic dvou (Pardubice a Svatouch). Vzhledem k délce časových řad v uvažovaných stanicích bylo dále pro resampling uvažováno referenční období 1. 1. 1963–31. 12. 1992, tj. 29 let. Resampling byl proveden simultánně pro všech pět subpovodí, v následujícím textu však pro přehlednost udáváme výsledky pouze pro subpovodí 0480. Výsledky pro ostatní povodí jsou srovnatelné.

### Parametry simulace

V rámci studie byla testována různá nastavení parametrů resamplovacího algoritmu a příznakových vektorů, zejména vliv volby počtu nejbližších sousedů  $k$  a velikosti časového okna  $n$ . Dále byly testovány různé příznakové vektory  $D_t$ , zahrnující různé kombinace hodnot srážek a teploty pro den  $t$ , prostorových průměrů srážek a teploty a srážkových úhrnů za 5, 10 a 20 předcházejících dnů. Generovány byly tisícileté sekvence denních hodnot. Parametry byly voleny v různých kombinacích tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody charakteristik mezi daty pozorovanými a resamplovanými. Počet sousedů  $k$  byl volen do deseti podle doporučení Buishanda a Brandsmý (2001), jelikož při menším počtu  $k$  je lépe zachována autokorelace v řadě, avšak pro velmi malá  $k = 1$  nebo 2 se již jen opakují v dlouhé řadě stejné sekvence a nevytvářejí se sekvence nové. Velikost časového okna byla volena v rozmezí 15 až 61 dní. Nejlepší shoda byla dosažena pro parametry  $k = 4$ ,  $n = 31$  a příznakový vektor  $D_t$ , tvořený pouze srážkami a teplotou pro den  $t$ .

### Výsledky simulace

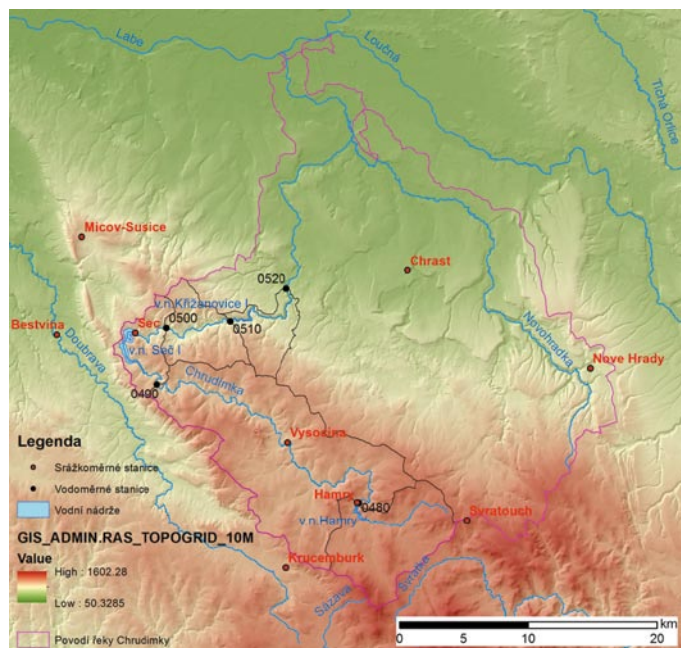
Dlouhodobé průměry denních srážek a teploty odvozené z pozorovaných dat a tisícileté resamplované řady jsou zobrazeny na obr. 2. Je vidět, že sezonní chod je dobře zachován, nicméně jisté rozdíly lze pozorovat u srážek v letním období. Z tabulky 1 je vidět, že generované srážky jsou mírně podhodnoceny (v průměru o 5,5 %), naopak generovaná teplota je mírně nadhodnocena (v průměru o 4,5 %). Variabilita (koeficient variace  $cv$  u srážek a směrodatná odchylka  $sd$  u teploty) je v generované řadě v denním kroku věrně zachována (relativní chyba u srážek je kolem 3 %, u teploty je zcela zanedbatelná). Při agregaci do měsíčního kroku je v generované tisícileté řadě variabilita o 11,5 % vyšší než pro pozorovaná data. To souvisí s výskytem nepozorovaných měsíčních úhrnů v generované řadě.

**Tabulka 1.** Porovnání průměru a ukazatelů variability (koeficient variace pro srážky a směrodatná odchylka pro teplotu) v denním a měsíčním kroku pro pozorovanou (29letou) a generovanou (tisíciletou) řadu

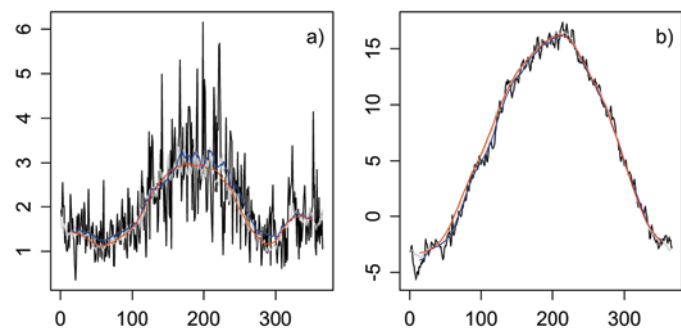
	Průměr		Variabilita			
	srážky denní	teplota denní	srážky (cv) denní	srážky (cv) měsíční	teplota (sd) denní	teplota (sd) měsíční
Pozorované	2,01	6,26	2,14	0,61	8,00	7,16
Generované	1,90	6,53	2,21	0,68	8,00	7,18
Relativní odchylka [-]	-0,055	0,04	0,033	0,11	0	0,003

Generované tisícileté řady teploty a srážek v denním kroku byly agregovány do kroku měsíčního a tyto měsíční časové řady byly dále využity jako vstupy do modelu hydrologické bilance Bilan. Následně byly porovnávány vybrané charakteristiky měsíčních srážek, teploty a simulovaných průtoků. Pro vyhodnocení rozdílů charakteristik pozorovaných a generovaných řad a posouzení variability v resamplované řadě byly sledované charakteristiky z pozorovaných 29letých řad porovnávány s charakteristikami 500 náhodně vybraných 29letých úseků z resamplované řady, jež byly, kde to bylo vhodné, sumarizovány formou boxplotů vyznačujících 5, 25, 50, 75 a 95% kvantily rozdělení těchto charakteristik. Odtoky simulované hydrologickým modelem na základě generovaných dat byly porovnávány s odtoky simulovanými na základě dat pozorovaných (tj. ne se samotnými pozorováními). Mluvíme-li o porovnání generované a pozorované řady v dalším textu, máme vždy na mysli porovnání pozorovaných srážek a teploty se srážkami a teplotou generovanou; v případě odtoků jde vždy o porovnání odtoků simulovaných modelem Bilan na základě pozorovaných dat s odtoky simulovanými na základě generovaných dat.

Obrázek 3 porovnává průměrné měsíční srážkové úhrny, teplotu a odtokové výšky mezi pozorovanými a generovanými řadami. Pro většinu měsíců leží pozorovaný průměr v interkvartilovém rozpětí (mezi 25% a 75%



**Obr. 1.** Zájmové území



**Obr. 2.** Dlouhodobé průměry a) denních srážek [mm], b) denní teploty [°C]; pozorované hodnoty jsou znázorněny černě, simulované šedě, třicetidenní klouzavé průměry z pozorovaných dat modře a ze simulovaných dat červeně; vodorovná osa odpovídá dnům v roce



kvantilem) průměrů z generované řady, a lze tedy konstatovat přijatelnou shodu. Sezonní cyklus je dobře reprodukován, nicméně v případě jarní teploty dochází v generované řadě k mírnému nadhodnocení. V důsledku podhodnocení denních srážek v letním období (viz i obr. 2) dochází i k podhodnocení průtoků, zejména na konci léta a na podzim.

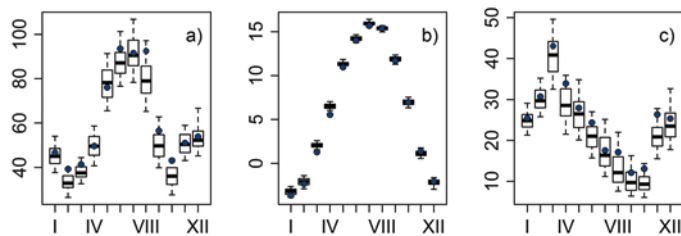
Srovnání charakteristik variability (koeficientu variace srážek a průtoků a směrodatné odchylky teploty) udává obr. 4. Přestože rozdíly jsou místy o něco větší než u průměrů, řádově jsou charakteristiky variability a jejich sezonní cyklus dobře zachyceny. Nicméně pro tři měsíce v roce u srážek i teploty se pozorované hodnoty nacházejí mimo rozmezí 5% a 95% kvantilu. Na druhé straně, u průtoků můžeme konstatovat až překvapivě dobrou shodu. Autokorelační koeficienty srážek, teploty i průtoků (obr. 5) jsou rovněž zachovány uspokojivě.

Do jaké míry si generované řady zachovávají rozdělení původního výběru, bylo sledováno kvantilovými grafy na obr. 6, kde jsou proti sobě vyneseny kvantily 500 náhodně vybraných 29letých úseků z generovaných řad a kvantily pozorovaných 29letých řad. V případě dokonalé shody by průměrné kvantily z generované řady (červená čára) ležely na diagonále grafu. Rozdělení generované řady je v případě srážek, teploty i odtoků podobné rozdělení pozorovanému. Nicméně dochází k mírnému podhodnocení nižších kvantilů srážek a průtoků, vyšší kvantily jsou reprodukovány dobře.

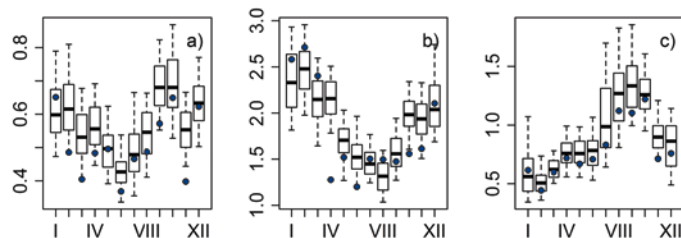
Porovnání maxim a minim srážek a průtoků bylo provedeno pomocí tzv. Gumbelových grafů, jež zobrazují vztah kvantilů rozdělení maxim nebo minim k tzv. Gumbelově redukované hodnotě  $r_i$ , jež je dána vztahem  $r_i = -\log(-\log(p_i))$ , kde  $p_i$  je odhad empirické pravděpodobnosti pro bod  $i$ .

Pokud by měly extrémny Gumbelovo rozdělení, potom by graf byl lineární, v případě vychýlení směrem nahoru (dolů) jde o rozdělení Frchetovo (obrácené Weibullovo). K pravděpodobnosti  $p_i$  je možno přiřadit dobu opakování. Gumbelovy grafy pro maxima a minima srážek a průtoků z pozorované 29leté a generované tisícileté řady jsou zobrazeny na obr. 7. Pozorované a generované řady jsou evidentně konzistentní, navíc v důsledku permutace denních srážkových úhrnů dochází k výskytu nepozorovaných srážek i odtoků, a to jak na straně maxim, tak na straně minim.

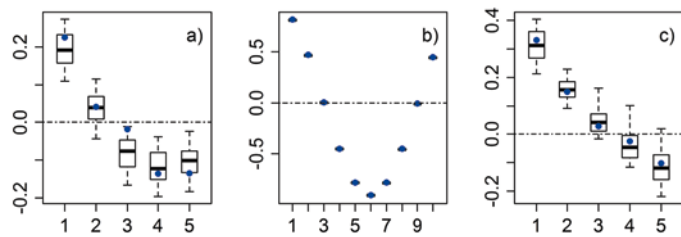
Na závěr byly porovnány charakteristiky deficitních objemů mezi pozorovanou řadou a 500 náhodnými 29letými výběry z generované řady. Jako deficitní událost byla definována situace, kdy odtok klesl pod 80% kvantil z čáry překročení měsíčních průtoků. Jako základní charakteristiky každé deficitní události byly uvažovány deficitní objem a doba trvání deficitního období. V každé 29leté řadě byl pak sledován medián a maximum deficitních objemů, průměrná délka trvání deficitního období a počet deficitních událostí. Výsledky porovnání udává obr. 8. Medián, průměrná délka trvání a počet deficitních událostí jsou v generované řadě zachyceny velmi dobře,



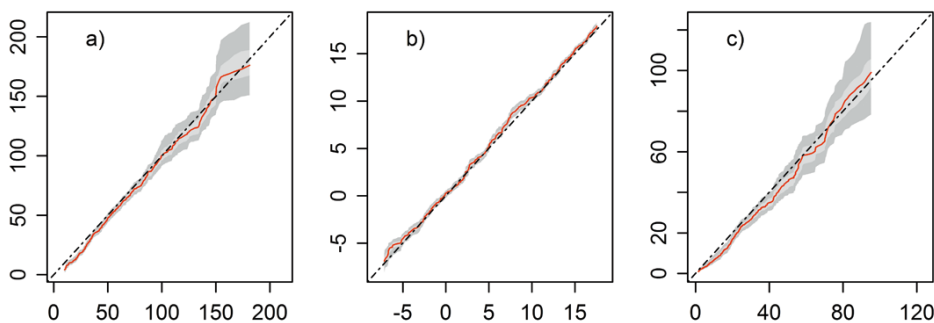
Obr. 3. Měsíční průměry a) srážek [mm], b) teploty [°C] a c) odtoků [mm]; boxploty zobrazují hodnoty simulované, modré tečky hodnoty pozorované; vodorovná osa odpovídá měsícům v roce



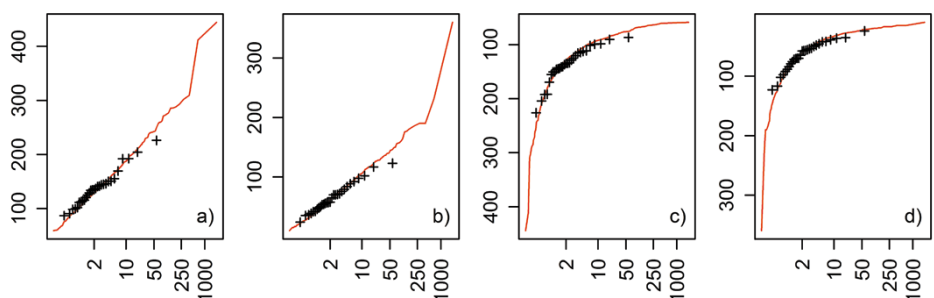
Obr. 4. a) Koeficient variace srážek, b) směrodatná odchylka teploty a c) koeficient variace odtoků; boxploty zobrazují hodnoty simulované, modré tečky hodnoty pozorované; vodorovná osa odpovídá měsícům v roce



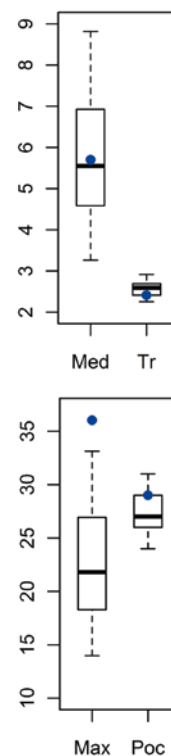
Obr. 5. Autokorelační koeficienty měsíčních a) srážek, b) teploty a c) odtoků; boxploty zobrazují hodnoty simulované, modré tečky hodnoty pozorované



Obr. 6. Kvantilové grafy měsíčních a) srážek, b) teploty, c) odtoků; svislá osa označuje hodnoty simulované, vodorovná hodnoty pozorované; červená čára odpovídá průměrným kvantilům z 500 náhodných výběrů z generované řady, světle (tmavě) šedý polygon ohraničuje oblast, v níž leží 50% (90%) generovaných hodnot



Obr. 7. Gumbelovy grafy a) maxim srážek [mm], b) maxim odtoků [mm], c) minim srážek [mm] a d) minim odtoků [mm]; svislá osa označuje hodnoty, vodorovná dobu opakování v letech, černé jsou vyznačeny hodnoty z referenčního období, červené z resamplované řady



Obr. 8. Medián deficitních objemů (Med) [mm], průměrná doba trvání deficitního období (Tr) [měsíce], maximální deficitní objem (Max) [mm] a počet deficitních událostí (Poc) [-]; body zobrazují hodnoty řady pozorované, boxploty hodnoty z generované řady

maximální deficitní objem je výrazně podhodnocen, což může být způsobeno jeho extremitou nebo neschopností postihnout dlouhodobou variabilitu ve formulaci příznakového vektoru.

## Diskuse a závěr

Neparametrický generátor denních srážek a teploty byl použit pro modelování hydrologické bilance v měsíčním kroku pomocí hydrologického modelu Bilan. Porovnání charakteristik pozorovaných řad ukázalo, že obecně jsou v simulovaných řadách přijatelně reprodukovány měsíční průměry, charakteristiky variability a autokorelace, nicméně měsíční průměry zejména u srážek jsou místy podhodnoceny, což se projevuje i na podhodnocení odtoků v některých měsících. Pravděpodobnou příčinou tohoto podhodnocení je velká šířka smplovacího okna  $n$  v letních měsících. Pomocí experimentů bylo však ověřeno, že menší  $n$ , použité pro všechny kalendářní dny, vede k horším výsledkům. Řešením by mohlo být použití proměnné délky smplovacího okna např. tak, aby jeho délka byla závislá na kalendářním dnu, popř. aby reflektovala proměnnou míru autokorelace srážek nebo proměnnou velikost směrodatné odchylky standardizovaných srážek během roku. Velikost těchto odchylek je na druhé straně srovnatelná s odchylkami jiných standardních generátorů počasí, např. Semenov a Barrow (1997) při generování časových řad srážek pomocí generátoru LARS-WG uvádějí pro některé stanice a měsíce i odchylky v řádu několika desítek procent.

Charakteristiky variability srážek, teploty a zejména průtoků jsou zachovány pro většinu měsíců uspokojivě. V měsících, pro které měsíční charakteristiky pozorovaných řad vykazují významné odlišnosti (koeficient variace listopadových srážek, směrodatná odchylka dubnové teploty), je pravděpodobně minimálně část těchto rozdílů způsobena výskytem výrazně extrémních hodnot v těchto měsících v pozorované řadě, což naznačuje skutečnost, že charakteristiky variability odvozené z pozorovaných dat v těchto měsících vybočují ze sezonního cyklu těchto charakteristik (obr. 4), pro což nemáme uspokojivě fyzikální vysvětlení.

Roční maxima a minima srážek a průtoků jsou v resamplované řadě reprodukována velmi dobře, navíc permutace denních hodnot při generování veličin vede k výskytu nepozorovaných měsíčních hodnot na obou koncích jejich rozdělení pravděpodobnosti a tyto hodnoty jsou konzistentní s hodnotami pozorovanými.

Ze sledovaných charakteristik deficitních objemů jsou v generované řadě dobře zachovány mediány deficitních objemů, počty deficitních událostí a jejich průměrná délka. Rozdělení deficitních objemů je značně asymetrické (protažené směrem k maximálním hodnotám). Extrémní deficity se v generované řadě nedaří zcela reprodukovat. Důvodem může být nezahrnutí indexů popisujících dlouhodobou meziroční variabilitu v příznakovém vektoru nebo extremita pozorované události. Na druhé straně se tak v celé tisícileté řadě vyskytuje 11 deficitních objemů vyšších než pozorované maximum.

Je nutně zdůraznit, že přestože výsledky byly demonstrovány pouze pro jednu stanici, podstata resamplovacího algoritmu zaručuje, že korelační struktura mezi různými stanicemi a veličinami je věrně zachována. Přes drobné nedostatky v reprodukci některých charakteristik lze obecně konstatovat, že uvažovaný generátor je (při znalosti limitů a předpokladů) dobře využitelný pro vodohospodářské aplikace.

Popsaný generátor může být výhodně použit pro analýzy v měsíčním (obecně vícedenním) časovém kroku. Při aplikaci na denní data je vhodné uvážit rozšíření metody způsobem zaručujícím výskyt hodnot ležících mimo rozsah pozorovaných dat, viz např. Leander a Buishand (2009) aj.

### Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu NAZV 6451 „Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech České republiky“; číslo projektu MZe ČR: QH81331.

## ZJEDNODUŠENÍ METODY VÝPOČTU POTENCIÁLNÍ EVAPOTRANSPIRACE V NOVÉ VERZI MODELU BILAN

Adam Beran, Stanislav Horáček, Martin Hanel

### Klíčová slova

potenciální evapotranspirace – modelování hydrologické bilance – model BILAN

### Souhrn

Potenciální evapotranspirace je jedním ze základních podkladů pro určení hydrologické bilance povodí. Vzhledem k obtížnosti přímého měření je zjišťována ze vzorců na základě jiných meteorologických veličin. V příspěvku jsou srovnány dvě metody pro stanovení potenciální evapo-

## Literatura

- Beran, A., Horáček, S. a Hanel, M. (2011) Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu BILAN. *VTEI*, 53, toto číslo (III), příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2011.
- Buishand, TA. and Brandsma, T. (2001) Multisite simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine basin by nearest-neighbor resampling. *Water Resources Research*, 37, 11, 2761–2776.
- Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L. a Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance – BILAN. *VTEI*, 51, mimořádné číslo, s. 2–5, příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2009.
- Hwang, Y. and Carbone, GJ. (2009) Ensemble forecasts of drought indices using a conditional residual resampling technique. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 1289–1301.
- Lall, U. and Sharma, A. (1996) A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resources Research*, 32, 679–693.
- Leander, R. and Buishand, TA. (2009) A daily weather generator based on a two-stage resampling algorithm. *Journal of Hydrology*, 374, 185–195.
- Leander, R. and Buishand, TA. (2007) Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332, 487–496.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. (2005) Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303, 1–4, 290–306.
- R Development Core Team (2010) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Semenov, M. and Barrow, EM. (1997) Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35, 4, 397–414.
- Tallaksen, LM. and van Lanen, HAJ. (2004) Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam : Elsevier.

Ing. Martin Hanel<sup>1,2</sup>, Ing. Roman Kožín<sup>1,2</sup>,  
Ing. Adam Beran<sup>1,2</sup>, Ing. Magdalena Mrkvičková<sup>1</sup>

<sup>1</sup>VUV TGM, v.v.i., Praha

<sup>2</sup>Fakulta životního prostředí ČZU v Praze  
martin\_hanel@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Validation of rainfall-temperature generator for simulation of water balance in the Chrudimka basin (Hanel, M.; Kožín, R.; Beran, A.; Mrkvičková, M.)*

### Key words

rainfall-temperature generator – Chrudimka basin – non-parametric resampling

**A thousand years time series of rainfall and temperature for the Chrudimka basin were generated using the nearest neighbor resampling algorithm. Generated time series were subsequently used for the assessment of hydrological balance with the Bilan model. The present paper is aimed on validation of several characteristics of generated rainfall and temperature and simulated runoff with respect to the observed data. We focus mainly at reproduction of averages, standard deviations and autocorrelation and in addition, for runoff the deficit volumes, the average length and number of droughts are also considered. The results show that the statistical generator is useful for water management applications, however, some difficulties have been identified and possible solutions proposed.**

transpirace – metoda podle Oudina (využívající pouze teploty vzduchu) a metoda vycházející z vegetační zóny (využívající teploty a vlhkosti vzduchu). Použití těchto dvou metod pro modelování denních odtoků na 13 různých povodích v České republice ukázalo, že na data méně náročná metoda podle Oudina vede k podobným modelovaným odtokům jako při použití metody vycházející z vegetační zóny. Vzhledem k tomu byla metoda podle Oudina začleněna do modelu hydrologické bilance BILAN a při té příležitosti byla připravena nová softwarová aplikace tohoto modelu, jejíž popis je také obsahem tohoto příspěvku.

### Úvod

Evapotranspirace, souhrnné označení pro výpar vody ze zemského povrchu a výdej vody vegetací, je jedním ze základních procesů oběhu vody v přírodě, probíhá na všech vlhkých površích. Potenciální evapotranspirace udává, jaké množství vody by se z povrchu a vegetace dostalo do atmosféry, pokud by byl v půdě stálý dostatek vody. Její hodnota závisí na množství

dostupné energie a stavu atmosféry, které mohou být vyjádřeny celou řadou faktorů, z nichž nejdůležitější jsou teplota, radiční bilance slunečního záření, vlhkost a proudění vzduchu. Skutečně pozorovaná evapotranspirace (územní výpar) je pak limitovaná zásobou dostupné půdní vody.

Jako vstupní informace do modelů hydrologické bilance hraje časové a plošné rozdělení evapotranspirace nezastupitelnou roli při bilancování zásob vody v půdě (Knozová et al., 2005), a proto je její stanovení pro hydrologii jedním ze stěžejních úkolů. Množství faktorů, které evapotranspiraci ovlivňuje, způsobuje složitost jejího přímého měření. Je proto zpravidla určována výpočtem na základě vzorců, které obsahují snadněji změřitelné meteorologické veličiny.

Cílem práce bylo porovnat výsledky výpočtu potenciální evapotranspirace ze vzorce ze studie Oudina et al. (2010), který vyžaduje jako vstupní data pouze teplotu vzduchu, s výsledky metody vycházející z vegetační zóny pro dané povodí a hodnoty sytostního doplňku, jež vyžaduje teplotu i vlhkost vzduchu. Tato druhá metoda je původní součástí modelu hydrologické bilance BILAN (Tallaksen a van Lanen, 2004). V případě úspěšného testování by bylo možno stávající metodu v modelu BILAN nahradit metodou podle Oudina, jejíž výhodou je menší náročnost na vstupní data.

## Metody a data

### Metoda vycházející z empirických grafů získaných z pozorování pro vegetační zóny

Tato metoda stanovuje hodnoty potenciální evapotranspirace na základě sytostního doplňku, vypočteného z pozorované teploty a relativní vlhkosti vzduchu. K tomu se využívá tabulkových hodnot odečtených z grafů uvedených v publikaci Gidrometeoizdatu (1976), která uvádí měsíční hodnoty potenciální evapotranspirace (pro každý měsíc jiný graf) rozdílné pro vegetační (geobotanické) zóny – od tundry až po poušť. Ty jsou obecně charakterizovány rozmezím průměrných teplot vzduchu a průměrných ročních úhrnů srážek. V klimatických podmínkách ČR jsou určeny jen teplotou, srážky jsou všude větší než mezní hodnota 400 mm. Při použití této metody v původní verzi je potřeba jednoznačně zadat bioklimatickou zónu, ve které se zkoumané povodí nachází.

Pro výpočty eliminující skokovou změnu evapotranspirace při přechodu z jedné zóny do druhé byla původní metoda modifikována tak, že výsledná hodnota evapotranspirace je interpolována mezi výsledky pro sousední vegetační zóny (Krejčová et al., 1993). Každé vegetační zóně je přiřazena charakteristická (střední) průměrná roční teplota vzduchu. Podle průměrné roční teploty  $T$ , zjištěné podle pozorování na posuzovaném povodí, se naleznou nejbližší nižší a nejbližší vyšší charakteristické teploty  $T_{ZD}$  a  $T_{ZH}$ . Pro tyto teploty se vypočítají odpovídající hodnoty evapotranspirace z tabulek pro příslušné zóny.

$$PE_{ZD}(i) = f_{ZD}(t(i), H(i)) \quad (1)$$

$$PE_{ZH}(i) = f_{ZH}(t(i), H(i)) \quad (2)$$

$f_{ZD}, f_{ZH}$  – tabelované hodnoty potenciální evapotranspirace odpovídající grafu pro danou zónu,  
 $i$  – pořadí měsíce v řadě,  
 $t(i)$  – průměrná teplota na povodí v měsíci  $i$ ,  
 $H(i)$  – průměrná relativní vlhkost na povodí v měsíci  $i$

a provede se interpolace mezi údaji pro užitě zóny:

$$PE(i) = PE_{ZD}(i) + (T - T_{ZD}) \frac{PE_{ZH}(i) - PE_{ZD}(i)}{T_{ZH} - T_{ZD}} \quad (3)$$

Denní hodnoty jsou poté zjišťovány jednoduše jako rovnoměrný podíl z měsíčních hodnot, protože rozdíl oproti interpolaci mezi jednotlivými měsíci se zachováním měsíčních průměrů se ukázal jako nevýznamný (Horáček et al., 2009).

### Metoda podle Oudina

Použitý vzorec pro výpočet potenciální evapotranspirace  $PE$  je založen pouze na změřené teplotě vzduchu  $t$ :

$$PE = \frac{0,408R_e(t+5)}{100} \text{ pro } (t+5) > 0 \quad (4)$$

$$PE = 0 \text{ pro } (t+5) \leq 0 \quad (5)$$

Rovnice byla odvozena na základě studie, která porovnávala více než 25 existujících vzorců pro výpočet potenciální evapotranspirace na více než 300 povodích. Řady potenciální evapotranspirace pak byly použity s uspokojivým výsledkem jako vstupní data do čtyř odlišných hydrologických modelů (Oudin et al., 2010).

$R_e$  je extraterrestrická radiace ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), množství dopadajícího slunečního záření; může být pro každý den v roce a pro danou zeměpisnou šířku odvozena ze sluneční konstanty, deklinace Slunce a období v roce (Allen et al., 1998):

$$R_e = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (6)$$

$R_e$  – extraterrestrická radiace [ $\text{MJ m}^{-2}\text{den}^{-1}$ ],  
 $G_{sc}$  – sluneční konstanta =  $0,0820 \text{ MJ m}^{-2}\text{min}^{-1}$ ,  
 $d_r$  – inverzní relativní vzdálenost Země–Slunce (7),  
 $\delta$  – deklinace Slunce (úhlová vzdálenost Slunce od rovníku) [rad] (8),  
 $\omega_s$  – hodinový úhel západu Slunce [rad] (9),  
 $\varphi$  – zeměpisná šířka [rad]

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (7)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (8)$$

$J$  – číslo dnu v roce od 1 (1. leden) po 365 nebo 366 (31. prosinec)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (9)$$

## Softwarová implementace v modelu BILAN

Model BILAN byl původně připraven ve formě dvou softwarových aplikací napsaných v jazyku Object Pascal vytvořených v prostředí Delphi, a to zvlášť aplikace pro verzi v denním a měsíčním časovém kroku (popsány byly v příspěvcích Tallaksena a van Lanena, 2004 a Horáčka et al., 2009). Za účelem sjednocení těchto aplikací do jedné a zjednodušení dalšího vývoje byl model přepsán do jazyka C++, ke stávajícím algoritmům byly přidány některé další funkce, mezi nimiž výše uvedená metoda podle Oudina pro stanovení potenciální evapotranspirace.

Nová implementace modelu BILAN se skládá z jádra a případných rozhraní, která umožňují uživateli přistupovat k funkcím jádra. Připravena byla dvě taková rozhraní, grafické uživatelské rozhraní (GUI) a balík pro prostředí R (R Development Core Team, 2010).

Grafické uživatelské rozhraní nahrazuje původní aplikace pro měsíční a denní verzi. Jeho účelem je umožnit uživateli přehledně zadat vstupní údaje do modelu a po výpočtu exportovat výsledky. Rozhraní je rozčleněno na tři záložky (panely): v první je třeba zvolit verzi modelu (denní nebo měsíční) a načíst ze souboru vstupní data, druhá obsahuje nastavení výpočtu (počáteční hodnoty a meze parametrů, metody výpočtu potenciální evapotranspirace, nastavení optimalizace), ve třetí se zobrazí výsledné hodnoty parametrů a veličin, které je možno uložit do souboru. Ve stávajícím rozhraní lze najednou zpracovat pouze jedno povodí. Po technické stránce je GUI založeno na multiplatformní knihovně Qt.

Druhým rozhraním je balík „bilan“ připravený pro statistické a programovací prostředí R (R Development Core Team, 2010), které je ve výzkumu často využíváno díky širokému uplatnění při přípravě dat, jejich analýze a vizualizaci. Rozhraní využívá jako přechodovou vrstvu balík Rcpp (Eddelbuettel a Francois, 2011). Po instalaci a nahrání balíku je uživateli zpřístupněna sada funkcí zahrnující vstupy do modelu (přiřazení dat nebo jejich načtení ze souboru, nastavení parametrů, optimalizace), vlastní výpočet (zvlášť potenciální evapotranspirace a běh modelu) a získání výsledků včetně případného exportu do souboru. Výhoda tohoto rozhraní spočívá zejména v možnosti skriptování a hromadného zpracování dat v kombinaci s potenciálem samotného prostředí R. Součástí balíku je vestavěná nápověda pro jednotlivé funkce. Balík pro prostředí R je volně šiřitelný po domluvě s autory článku.

### Vstupní data a metoda srovnání

Jako vstupní data do modelu BILAN byly zvoleny hodnoty v denním kroku ze 13 povodí na území ČR (obr. 1) o různé velikosti ( $130\text{--}1\,800 \text{ km}^2$ ) a o různé délce trvání (10–45 let). Vstupními daty do modelu byly řady srážek, odtoků, teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu.



Obr. 1. Testovaná povodí

Modelem byly doloženy hodnoty potenciální evapotranspirace, a to jednak metodou vycházející z vegetační zóny (s využitím teplot a vlhkosti) a jednak metodou podle Oudina (s využitím teplot). Následně byl model kalibrován na shodu měřených a modelovaných odtoků.

Obě modelované řady odtoků byly vzájemně porovnány mezi sebou a s měřenými hodnotami. Jako ukazatele pro srovnání byly použity střední absolutní chyba (MAE), která uvádí střední velikost absolutních reziduí, a průměrná relativní odchylka (MRE), která uvádí průměrnou hodnotu absolutních procentuálních rozdílů mezi hodnotami odtoku.

## Výsledky

Průměrná relativní odchylka mezi modelovanými odtoky (s využitím různých metod výpočtu potenciální evapotranspirace) se pohybuje do 13 %, pro sedm ze 13 povodí je odchylka do 5 %. Srovnání modelovaných a pozorovaných odtoků ukázalo, že při použití metody podle Oudina byla střední absolutní chyba menší v devíti ze 13 případů, avšak průměrná střední absolutní chyba pro obě metody ze všech modelovaných povodí je téměř totožná. Průměrná relativní odchylka od měřených hodnot se pro obě metody pohybuje od 8 do 25 %, průměrná relativní odchylka mezi oběma metodami je výrazně menší než odchylky od měřených hodnot. Celkový průměr relativních odchylek od měřených odtoků je 15 % pro metodu výpočtu potenciální evapotranspirace vycházející z vegetační zóny a 14 % pro metodu podle Oudina. Veškeré výsledky jsou shrnuté v *tabulce 1*, příklady dlouhodobých denních odtoků jsou zobrazeny na *obr. 2* a *3*.

## Závěr

Metoda výpočtu potenciální evapotranspirace pomocí vzorce v metodě podle Oudina, založená pouze na pozorované teplotě vzduchu, se ukázala být pro účely modelování denních odtoků na zvolených povodích podobně úspěšná jako metoda vycházející z vegetační zóny, která je založená na změřené teplotě a relativní vlhkosti vzduchu. Navíc při porovnání pozorovaných odtoků s odtoky modelovanými těmito dvěma metodami vycházejí při pohledu na střední absolutní chyby a průměrné relativní odchylky lepší výsledky pro metodu podle Oudina pro většinu povodí.

Na základě úspěšného testování byla metoda podle Oudina začleněna do nové verze modelu BILAN, oproti původní metodě vycházející z vegetační zóny je tedy možné modelovat hydrologickou bilanci povodí s menšími nároky na vstupní data (nejsou potřeba relativní vlhkosti vzduchu). Zároveň byl model BILAN softwarově přepsán a bylo pro něj vytvořeno grafické uživatelské rozhraní a balík pro prostředí R.

**Tabulka 1.** Přehled výsledků porovnání měřených a dvěma metodami modelovaných odtoků; MAE (střední absolutní chyba), MRE (střední relativní odchylka), max RE (maximální relativní odchylka)

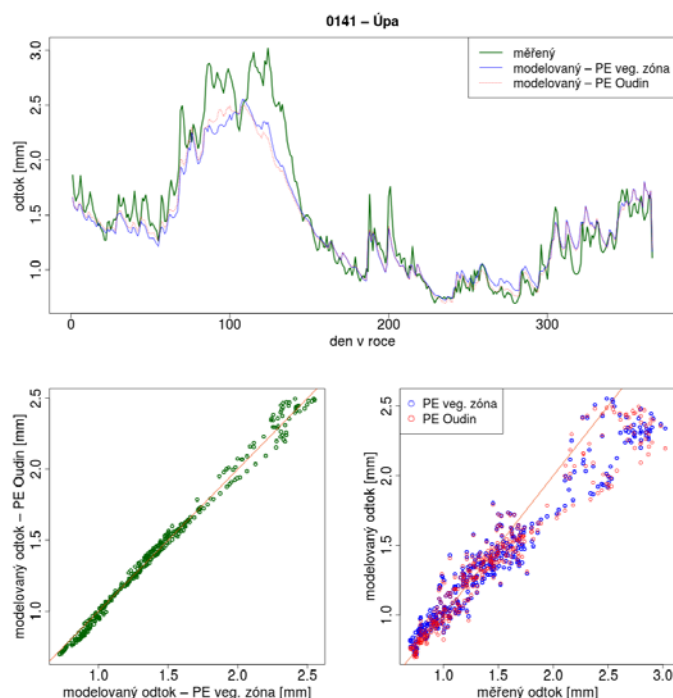
Vodometná stanice	MAE [mm]		MRE		max RE	MRE
	veg. zóna	Oudin	veg. zóna	Oudin	veg. zóna / Oudin	veg. zóna / Oudin
0141 Úpa	0,151	0,139	9,30 %	8,30 %	8 %	2,40 %
0240 Divoká Orlice	0,183	0,264	9,90 %	14,10 %	27 %	9,40 %
0700 Cidlina	0,107	0,114	18,80 %	20 %	25 %	8,70 %
0840 Jizera	0,396	0,487	13 %	17 %	58 %	13 %
1000 Kaplice	0,137	0,118	21,20 %	16,90 %	15 %	4,70 %
1060 Teplá Vltava	0,190	0,174	14 %	12,30 %	36 %	8,30 %
1110 Vltava	0,156	0,151	14 %	13,50 %	16 %	2,80 %
1120 Malše	0,165	0,126	25,10 %	18 %	19 %	6,20 %
1370 Otava	0,322	0,273	14,70 %	11,30 %	14 %	4,30 %
1410 Otava	0,225	0,196	12,70 %	10,80 %	28 %	6,30 %
1530 Skalice	0,112	0,113	13,10 %	14 %	12 %	2,90 %
1550 Sázava	0,131	0,125	16 %	15,60 %	13 %	3,50 %
2110 Teplá	0,118	0,11	13,70 %	12,50 %	14 %	3,30 %
PRŮMĚR	0,184	0,1837	15 %	14 %	22 %	7,10 %

## Poděkování

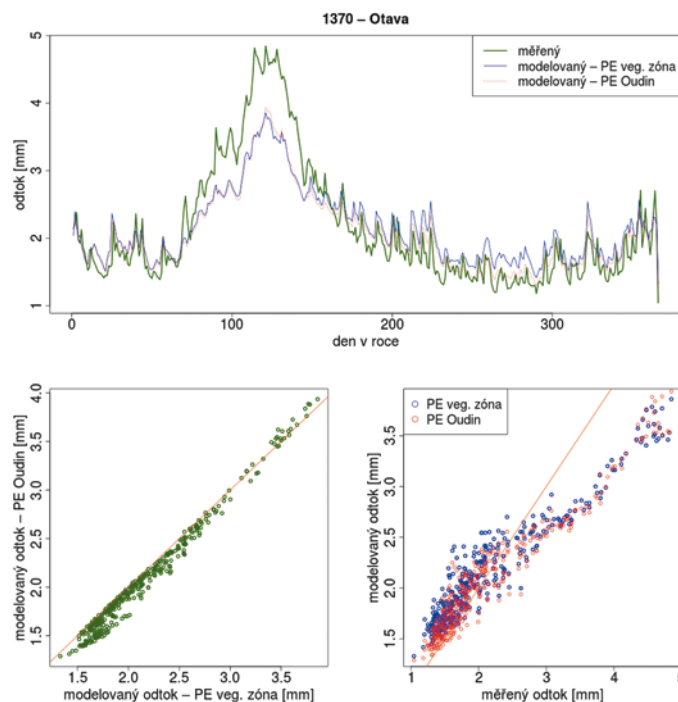
Článek vznikl v rámci výzkumného záměru MZP0002071101 Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů, financovaného Ministerstvem životního prostředí České republiky. Článek vychází z výsledků části Vývoj matematických modelů hydrologické bilance, identifikace jejich parametrů a ověřování experimentálním výzkumem zahrnuté do oddílu A (hydrologie).

## Literatura

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Reas, D., and Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. ISBN 92-5-104219-5.
- Eddelbuettel, D. and Francois, R. (2011) Rcpp: Seamless R and C++ Integration. *Journal of Statistical Software*, 40(8), 1–18. URL <http://www.jstatsoft.org/v40/i08/>.
- Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L. a Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance – BILAN. *VTEI*, 51, 2009, mimoř. č. I, příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2009.
- Gidrometeoizdat (1976) Rekomendacii po rasčotu isparenija s poverchnosti suši. Leningrad.
- Knozová, G., Rožnovský, J. a Kohut, M. (2005) Srovnání časových řad výparu naměřeného výparoměrem GGI 3000 a vypočítaného podle metodiky FAO. In Rožnovský, J. a Litschman, T. (eds) *Bioklimatologie současnosti a budoucnosti*. Křtiny, 12.–14. 9. 2005. ISBN 80-86 690-31-08.



**Obr. 2.** Vodometná stanice Úpa, dlouhodobé denní odtoky – průběh měřených a modelovaných (nahore), vztah mezi odtoky modelovanými s využitím dvou uvažovaných metod stanovení potenciální evapotranspirace (vlevo dole) a vztah mezi modelovanými a měřenými odtoky (vpravo dole)



**Obr. 3.** Vodometná stanice Otava 1370, dlouhodobé denní odtoky – průběh měřených a modelovaných (nahore), vztah mezi odtoky modelovanými s využitím dvou uvažovaných metod stanovení potenciální evapotranspirace (vlevo dole) a vztah mezi modelovanými a měřenými odtoky (vpravo dole)

Krejčová, K., Kašpárek, L., Polák, M., Řičica, J. a Zahradníček, J. (1993) Vliv antropogenní činnosti na změny odtokového režimu a vydatnost zdrojů vody. Zpráva o výsledcích řešení resortního úkolu za rok 1993. Chronologická hydrologická bilance, dílčí část 01. Praha, listopad 1993, 154 s.

Oudin, L., Moulin, L., Bendjoudi, H., and Ribstein, P. (2010) Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulation. *Hydrological Sciences Journal*, 55, 2, 209–222.

R Development Core Team (2010) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Tallaksen, LM. and van Lanen, HAJ. (eds) (2004) *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Amsterdam.

*Simplification of the estimation method of potential evapotranspiration in the new version of the BILAN model (Beran, A.; Horáček, S.; Hanel, M.)*

#### Keywords

potential evapotranspiration – modelling of hydrological balance – BILAN model

Potential evapotranspiration is one of the key inputs for determination of the hydrological balance of river basins. Since the direct measurement is difficult, it is often estimated by empirical formulas based on meteorological variables. The paper compares two methods for determination of potential evapotranspiration, the method according to Oudin (requiring only air temperature) and the method based on the vegetation zone (requiring air temperature and humidity). Application of these two methods for modelling of daily runoff in 13 river basins in the Czech Republic showed that the less data demanding method of Oudin leads to similar results. Since the method of Oudin was incorporated into the hydrological balance model BILAN and on that occasion new software application of this model was prepared, its description is also discussed in this paper.

Adam Beran<sup>1,2</sup>, Stanislav Horáček<sup>1,2</sup>, Martin Hanel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>VÚV TGM, v.v.i.

<sup>2</sup>Fakulta životního prostředí ČZU v Praze

adam\_beran@vuv.cz,

stanislav\_horacek@vuv.cz,

martin\_hanel@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

## ELIMINACE OVLIVNĚNÍ PRŮTOKU POMOCÍ PROPOJENÉHO MODELU HYDROLOGICKÉ A VODOHOSPODÁŘSKÉ BILANCE

Adam Vizina, Martin Hanel

#### Klíčová slova

model hydrologické bilance – model vodohospodářské bilance – průtok – užívání vod – model BILAN

#### Souhrn

Příspěvek pojednává o možnostech eliminace ovlivnění (užívání) průtoků v měsíčním časovém kroku na území České republiky pomocí modelů hydrologické bilance (BILAN) (Horáček, 2009) a modelu bilance vodohospodářské. Pro posouzení byly použity měsíční časové řady průtoků, srážkových úhrnů, teplot vzduchu, relativních vlhkostí vzduchu a užívání vod na povodí Berounky z období 1980–2009. Řešení hydrologické bilance v soustavě říční sítě propojené s vodohospodářským modelem vede ke snížení nejistot u přirozených průtoků. V řešené soustavě bude zajištěna chronologie průtoků. Tímto řešením jsou dále kvantifikovány drobní uživatelé vody, kteří podle zákona nemají ohlašovací povinnost. Podle vyhlášky č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci, souhrnnou vodní bilanci zpracovává Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. (VÚV TGM).

#### Úvod

Vodní hospodářství je v návaznosti na změny klimatu jedním z globálně řešených problémů. Výzkumu uvedených problematiky je proto nutné věnovat prvořadou pozornost. Jednou ze základních činností vodohospodářů je stanovení hydrologické a vodohospodářské bilance. V současné době v České republice hydrologickou bilanci pro každý kalendářní rok sestavuje Český hydrometeorologický ústav a bilanci vodohospodářskou Výzkumný ústav vodohospodářský TGM. Z důvodu očekávaných extrémnějších klimatických, a tedy i hydrologických situací (Hanel, 2010) je potřeba přesněji kvantifikovat přirozené hydrologické podmínky v povodích, kde je vyvíjena antropogenní činnost, a to především v nepříznivých podmínkách (období nedostatku vody). Na základě upřesnění skutečných hodnot o hospodaření s vodou a v součinnosti s jinými projekty by měla být navržena nová opatření a metodika o užívání vody.

Prvním dílčím cílem práce je reálná kvantifikace hodnot o užívání vod (v současné době

jsou evidováni pouze uživatelé s odběrem nad 5 000 m<sup>3</sup>/měsíc nebo 60 000 m<sup>3</sup>/rok) a z těchto hodnot následně určit neovlivněné průtoky pro dané povodí. Druhým cílem je zachování chronologie průtoků po toku. V současné době v některých případech odovlivnění průtoků vede k negativním hodnotám na mezipovodích.

#### Metody a data

##### Vstupní data

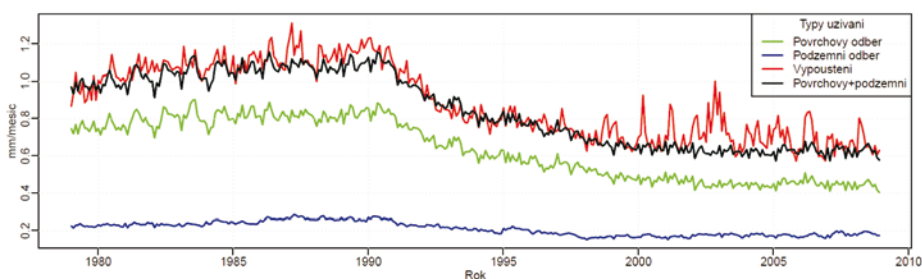
Jako vstupní data byly použity měsíční časové řady klimatologických veličin (teplot vzduchu, srážkových úhrnů a relativních vlhkostí vzduchu) a průtoků pro 13 povodí Berounky. Identifikační údaje (DBC – databázové číslo profilu, Q<sub>a</sub> – průměrný roční průtok) pro jednotlivá povodí jsou uvedeny v tabulce 1. Dále byla použita měsíční data o užívání vody (tj. odběry z podzemních a povrchových vod a vypouštění do povrchových vod) z období 1980–2009, která jsou znázorněna pro povodí Berounky po Beroun (DBC 1980) na obr. 1.

##### Popis propojeného modelu

Postup vychází z výsledků řešení výzkumného záměru (MZP0002071101) a dílčího subprojektu „Vývoj matematických modelů hydrologické bilance, identifikace jejich parametrů a ověřování experimentálním výzkumem“, který řeší rozvoj modelovacích technik, jejich kalibrace a ověřování a jehož součástí je i dlouhodobé experimentální sledování a vyhodnocování vývoje

Tabulka 1. Seznam řešených profilů

DBC	Profil	Číslo hydrologického pořadí	Vodní tok	Říční km	Plocha (km <sup>2</sup> )	Srážka (mm)	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
1740	Stříbro	1-10-01-128	Mže	44,10	1144,88	652	6,72
1799	Lhota	1-10-01-102	Radbuza	15,10	1179,38	637	5,32
1820	Klatovy	1-10-03-036	Úhlava	64,30	338,81	800	3,93
1830	Štěnovice	1-10-03-086	Úhlava	12,70	893,18	683	7,47
1860	Plzeň-Bílá Hora	1-10-04-002	Berounka	136,90	4016,55	640	20,02
1870	Plzeň-Koterov	1-10-05-061	Úslava	9,10	733,95	628	3,52
1880	Nová Huť	1-11-01-038	Klabava	7,00	359,40	676	2,15
1900	Plasy	1-11-02-069	Střela	16,40	775,02	566	3,05
1910	Liblín	1-11-02-088	Berounka	102,60	6454,88	520	
1901	Rakovník	1-11-03-037	Rakovnický p.	17,70	302,30	526	0,867
1945	Zbečno	1-11-03-050	Berounka	53,50	7518,96	612	32,82
1973	Beroun-Litavka	1-11-04-055	Litavka	0,10	626,02	611	2,576
1980	Beroun	1-11-04-056	Berounka	34,15	8284,7	611	35,59



Obr. 1. Hodnoty užívání vody pro povodí Berounky po Beroun

prvků hydrologické bilance v pozorovací soustavě povrchových a podzemních vod.

Vstupem do propojeného modelu jsou průměrné měsíční hodnoty teplot vzduchu, srážkových úhrnů, relativních vlhkostí vzduchu, údaje o užívání vod a ovlivněné průtokové řady. V prvním kroku dojde v modelu vodohospodářské bilance k očištění průtokových řad (vzniknou teoretické neovlivněné průtoky), které jsou vstupem do modelu hydrologické bilance (BILAN). V tomto modelu jsou dále simulovány jednotlivé složky vodního režimu daného povodí a tím jsou získány modelované neovlivněné průtokové řady pro dané období. Tyto řady jsou dále zpětně převedeny na ovlivněné. Následně jsou porovnány se vstupní ovlivněnou řadou průtoků. Kriteriaální funkcí z čar překročení určíme, zda jsme dosáhli věrohodného odovlivnění (eliminací) průtokových řad (Homa, 2005). Za relevantní se považují průtoky v intervalu 5–95 %. Pokud nedojde ke splnění zvoleného kritéria, celý proces se opakuje. K jediné změně dojde v případě údajů o užívání vod, a to kvantifikací tzv. balastních vod a užívání vod drobnými uživateli. Schéma modelu je znázorněno na obr. 2. K negativním či nevěrohodným hodnotám může docházet i změnou měrné křivky či mechanickou změnou na měřeném profilu, proto je důležité nejdříve vstupní data analyzovat.

K modelování hydrologické bilance byl použit model BILAN (Tallaksen a van Lanen, 2004), který byl vyvinut a je vyvíjen ve VÚV TGM (Horáček, 2009). Model počítá v denním a měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí – v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí, a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Potenciální evapotranspirace je odečtena jako tabulková hodnota z grafu na základě tří veličin: typu vegetační zóny, teploty vzduchu a srážkového úhrnu (Gidrometeoizdat, 1976). Odtok je modelován jako součet tří složek: dvou složek přímého odtoku (zahrnující i hypodermický odtok) a základního odtoku. Model vodohospodářské bilance je založen na klasické bilanční rovnici. Vstupem jsou údaje o užívání vod (povrchové odběry a vypouštění) a ovlivněné (měřené) průtoky v měsíčním časovém kroku.

### Zapojení modelu do soustavy

Model BILAN má v měsíčním kroku osm parametrů a právě jejich optimalizace zpětnou vazbou mezi jednotlivými povodími je zásadní pro zajištění chronologie průtoků na sebe navazujících profilů. Tyto parametry určují distribuci vody mezi jednotlivými modelovanými složkami, a proto by se neměly mezi sousedními povodími diametrálně lišit. Parametry jsou optimalizovány automaticky se zadáním počátečních a okrajových podmínek, v určitých případech je však zapotřebí některé parametry zadávat ručně s ohledem na různé geografické a geologické podmínky. Jednotlivá dílčí povodí jsou identifikována a propojena pomocí čísla hydrologického pořadí, podle kterého jsou sumarizovány i hodnoty o užívání vody.

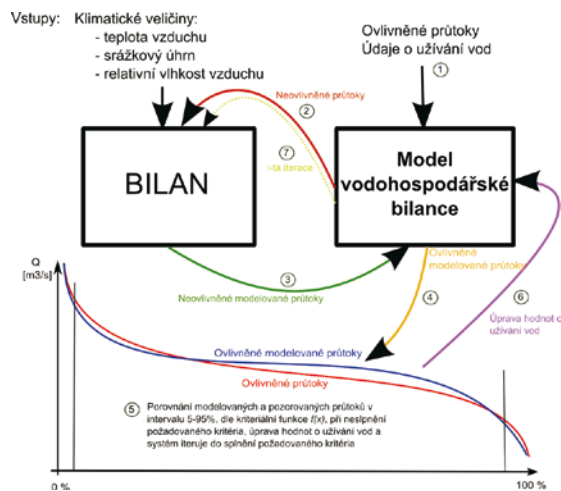
### Softwarové prostředky

Pro modelování bylo použito statistické a programovací prostředí R (R Development Core Team, 2010), které je v akademickém sektoru často využíváno pro přípravu dat, analýzu časových řad a vizualizaci výsledků. V tomto prostředí byl naprogramován balík „bilan“, který je volně šiřitelný po dohodě s autory. Tento balík zahrnuje model hydrologické bilance BILAN v denním a měsíčním časovém kroku. V prostředí R byly dále naprogramovány funkce, které zajišťují propojení modelu BILAN a modelu vodohospodářské bilance a které zaštitovaly celý výpočetní proces.

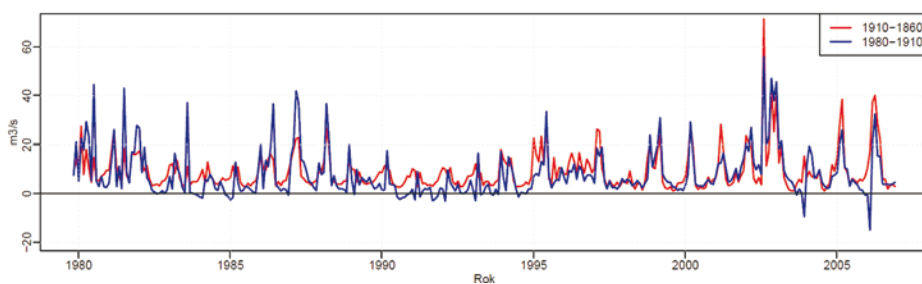
### Výsledky

Na některých řešených povodích docházelo v určitých obdobích k deficitům vody na mezipovodích, tyto deficity jsou znázorněny pro mezipovodí DBC 1980–1910 (modře) a DBC 1910–1860 (červeně) na obr. 3, kde je v obou případech plocha mezipovodí kolem 2 000 km<sup>2</sup>, což odpovídá při odtokové výšce 10 mm/měsíc průtoků cca 0,8 m<sup>3</sup>/s pro tuto plochu povodí.

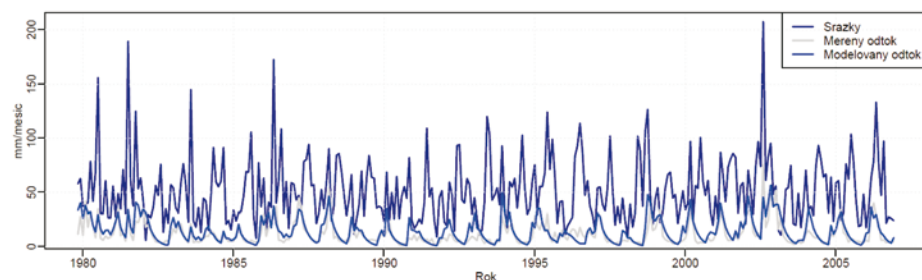
Porovnání modelovaného a pozorovaného odtoku (obr. 4 a obr. 5) ukázalo, že již samotné modelování hydrologické bilance s podobnou sadou parametrů pro navzájem navazující povodí eliminuje do velké míry negativní průtoky na mezipovodí, což je také způsobeno eliminací extrémních hodnot povodňových stavů, při kterých dochází k nepřesnému odhadu průtokových stavů.



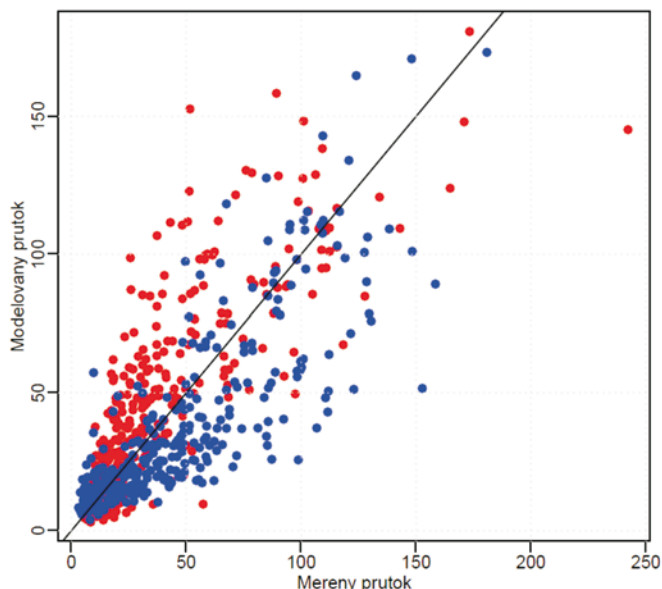
Obr. 2. Schéma propojeného modelu hydrologické a vodohospodářské bilance



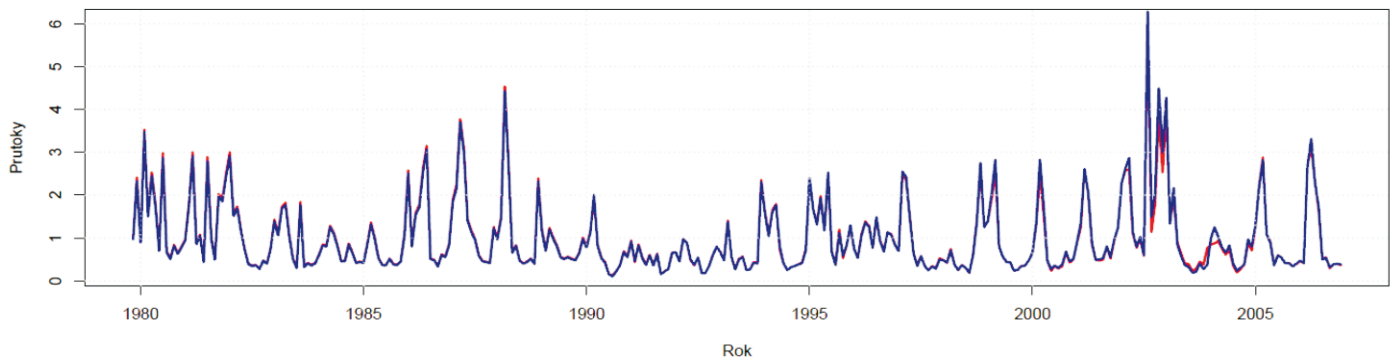
Obr. 3. Rozdíl měřených průtoků



Obr. 4. Srážkový úhrn, měřený a modelovaný odtok pro povodí Berounky v Berouně



Obr. 5. Vztah mezi modelovanými a měřenými odtokovými výškami pro povodí Berounky po Beroun



**Obr. 6.** Opravené standardizované průtokové řady pro povodí Berounky po Beroun

Na obr. 6 jsou znázorněny opravené průtokové řady pro povodí Berounky po Beroun. Pozorované průtoky byly analyzovány, modelovány propojeným modelem a nakonec standardizovány.

Výsledky na modelovaných povodích dávají určité upřesnění, avšak ne přímou kvantifikaci balastních vod. Ta se podařila vyčísřit především na malých povodích. Mnohem zásadnější je zapojení povodí do soustavy, čímž je zachována distribuce vody po toku.

### Závěr a diskuse

Propojený model hydrologické a vodohospodářské bilance v měsíčním časovém kroku zapojený do soustavy povodí koriguje negativní hodnoty na mezipovodí a do určité míry eliminuje nejistoty v ovlivnění průtoků. Jeho uplatnění je však pouze na větších povodích a na povodích, na kterých je vykonávána hospodářská činnost, a to z důvodu zanedbatelných hodnot na některých povodích, avšak má význam pro kontrolu chronologie průtoků. Ze získaných výsledků je zřejmé, že je třeba vytvořit metodiku pro hospodaření s vodou hlavně pro období nedostatku vody, kdy se tato období dají očekávat s větší četností.

Do budoucna se uvažuje o zahrnutí užívání podzemních vod do modelu BILAN jako jeho dílčí složky, která bude přímo ovlivňovat zásobu podzemních vod, a z toho důvodu bude redukován základní odtok, který je esenciální složkou odtoku v nepříznivých obdobích (sucho).

### Poděkování

Článek vznikl v rámci výzkumného záměru MZP0002071101 Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů, financovaného Ministerstvem životního prostředí České republiky. Článek vychází z výsledků části Vývoj matematických modelů hydrologické bilance, identifikace jejich parametrů a ověřování experimentálním výzkumem zahrnuté do oddílu A (hydrologie).

### Literatura

- Becker, RA., Chambers, JM., and Wilks, AR. (1988) The New S Language. Wadsworth & Brooks/Cole.
- Gidrometeozdat (1976) Rekomendacii po rasčotu isparenija s poverchnosti suši. Leningrad.
- Hanel, M. a Vizina, A. (2010) Hydrologické modelování dopadů změn klimatu v denním kroku: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. *VTEI*, 52, 2010, mimoř. č. II, příl. *Vodního hospodářství* č. 11/2010.
- Homa, ES. (2005) An Optimization Approach for Balancing Human and Ecological Flow

Leeds. EWRI 2005 World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Anchorage, Alaska.

Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L. a Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance – BILAN. *VTEI*, 51, 2009, mimoř. č. I, příl. *Vodního hospodářství* č. 11/2009.

Li Wen (2009) Reconstruction natural flow in a regulated system, the Murrumbidgee River, Australia, using time series analysis. *Journal of Hydrology*, vol. 364.

R Development Core Team (2010): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Tallaksen, LM. and van Lanen, HAJ. (eds) (2004) Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam.

**Ing. Adam Vizina<sup>1,2</sup>, Ing. Martin Hanel<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>VÚV TGM, v.v.i., Praha

<sup>2</sup>Fakulta životního prostředí, ČZU v Praze  
adam\_vizina@vuv.cz, martin\_hanel@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

*Elimination of discharge uncertainties by linked model of hydrological balance model and water management model (Vizina, A.; Hanel, M.)*

### Keywords

hydrological balance model – water management model – discharge – water supply – model BILAN

**In the present time, derivation of natural flows is done only in monthly time step in the Czech Republic. For the impact of changing climate on water regime and for the proposal of the adaptation natural daily and monthly time series are needed. Natural flows are computed from the water using database, where only major water users are reported. Elimination of these uncertainties are based on the linked water management model and coupled hydrologic balance model BILAN, which was originally developed for simulation of water cycle in daily and monthly time step. Linked model can eliminate errors in water using and can quantify the likely amount of water use in the basin. Inputs to the model are time series of observed discharges, air temperature, precipitations, relative air humidity, and monthly time series of water use in the basin.**

**VTEI** **VODOHOSPODÁŘSKÉ  
TECHNICKO-EKONOMICKÉ  
INFORMACE**

**Water Management Technical and Economical Information**

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

**Redakční rada:** RNDr. D. Baudišová, Ph.D., Ing. Š. Blažková, DrSc.,  
Ing. P. Bouška, Ph.D., prof. Ing. A. Grünwald, CSc.,  
doc. Ing. A. Havlík, CSc., prof. Ing. P. Pitter, DrSc.,  
prof. RNDr. A. Sládečková, CSc., prof. Ing. J. Zezulák, DrSc.

**Ročník 53**

Kontakt: Mgr. S. Garciova  
Tel.: 220 197 282, e-mail: [garciova@vuv.cz](mailto:garciova@vuv.cz)

**ISSN 0322 - 8916  
MK ČR 6365**

**VÚV  
TGM**

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



**Auři fotografií na obálce:  
Tomáš Hrdinka,  
Adéla Poláková,  
Josef V. Datel**



**VÚV  
TGM**