

## VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

# Možné dopady klimatické změny na vodní zdroje

První studie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka k dopadům klimatické změny v oblasti vody, uskutečněné v devadesátých letech minulého století a založené na tzv. přírůstkových scénářích klimatické změny, byly zaměřeny především na průměrné a minimální průtoky. S postupným vývojem v oblasti modelování časových řad složek hydrologické bilance a s vývojem dalších generací modelů a scénářů klimatických změn docházelo k upřesňování prvotních odhadů a studie dopadů klimatické změny na vodní režim zahrnovaly další složky vodní bilance. Pozornost se soustředila i na dopady klimatických změn na podzemní vody, v první fázi prostřednictvím výsledků simulací základního odtoku modelem hydrologické chronologické bilance Bilan [11] vyvinutým ve VÚV T.G.M. a později jeho propojením s modelem proudění podzemní vody Modflow (United States Geological Survey).

Další výzkum v České republice se obdobně jako celosvětová pozornost přesouval na možné dopady klimatické změny na vodní zdroje. Ve VÚV T.G.M. bylo k tomuto účelu využito propojení modelu Bilan s dalším produktem ústavu – modelem vodohospodářské soustavy. Rychlý vývoj nástrojů v těchto oblastech umožněný především výzkumnými projekty sponzorovanými Ministerstvem životního prostředí a Ministerstvem zemědělství České republiky představuje mimořádný pokrok v této výzkumné oblasti v porovnání nejen s evropským, ale i celosvětovým měřítkem. Svědčí o tom skutečnost, že v současné době je celá Česká republika pokryta zpracováním základních studií o možných dopadech klimatické změny na vodní zdroje a rozvíjejí se podrobné studie dílčích povodí, jež řeší konkrétní problémy spojené s nedostatkem vody a sucha v jednotlivých oblastech. Výsledky studií VÚV T.G.M. v této oblasti byly v posledních letech přijaty k prezentaci na nejvýznamnějších celosvětových konferencích [1–10].

Články zahrnuté do tohoto mimořádného čísla časopisu VTEI se snaží alespoň částečně vynahradiť dluh, který má oddělení hydrologie VÚV T.G.M. vůči zájemcům o tuto problematiku v České republice. Z hlediska tematické náplně byly vybrány tak, aby pokrývaly co největší spektrum problémů souvisejících s možnými dopady klimatických změn na vodní režim a vodní zdroje a i některé další aktuální problémy řešené v současné době v rámci výzkumných projektů oddělení hydrologie.

V rámci části výzkumného záměru (sponzorovaného Ministerstvem životního prostředí ČR) věnované hydrologii je soustředěna pozornost také na další vývoj modelu Bilan, který zahrnuje i dokončení vývoje a ověření jeho verze simulující složky vodní bilance v denním kroku (původní verze pracuje s měsíčním krokem). Tato verze modelu a první zkušenosti s její aplikací jsou popsány v článku **Vývoj modelu hydrologické bilance – Bilan**.

Dosavadní scénáře klimatické změny byly pro Českou republiku sestaveny z výsledků zahraničních projektů, v poslední době projektu PRUDENCE, jež je sponzorován Evropskou komisí. Od letošního roku dochází k dalšímu zpřesnění odhadů možných dopadů klimatické změny na vodní režim a vodní zdroje využitím národních klimatických scénářů, jež byly vyvinuty prostřednictvím simulací modelem ALADIN v rámci řešení projektu Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření, který je koordinován Českým hydrometeorologickým ústavem a financně zajištěn Ministerstvem životního prostředí ČR. První zkušenosti s aplikací těchto scénářů jsou popsány v článku **Zpřesnění odhadů klimatické změny na vodní zdroje s využitím scénářů založených na simulacích modelem ALADIN-CLIMATE/CZ**.

Simulace složek hydrologické bilance prostřednictvím modelu Bilan vychází ze vstupních řad průměrných srážek, teplot vzduchu a relativní vlhkosti na povodí. Pro stanovení míry vlivu těchto proměnných na důsledky klimatické změny je třeba zpracovat příslušné citlivostní ana-

lyzy. Výsledky jedné z nich jsou popsány v článku **Vliv relativní vlhkosti vzduchu na celkový odtok v podmínkách klimatické změny**.

Parametry modelu Bilan jsou kalibrovány na základě optimalizace shody pozorovaného a simulovaného celkového odtoku v závěrovém vodoměrném profilu studovaného povodí. Úspěch kalibrace závisí na kvalitě pozorovaných řad vstupních hydrometeorologických veličin. Z tohoto

důvodu je často potřeba zejména u podrobných studií provést před vlastním modelováním ověření těchto řad, především řad průtokových. Možné problémy a možnosti související s ověřením a rekonstrukcí řad průměrných denních průtoků jsou popsány v článku **O možnostech rekonstrukce vyčíslení řad průtoků**, jež je výstupem projektu Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulačních schopností v povodí Rakovnického potoka, sponzorovaného Ministerstvem zemědělství ČR.

Největší dopady změn klimatu na dostupnost vodních zdrojů se přirozeně projeví v období sucha. Hodnocení suchých období patří k nejsložitějším otázkám hydrologie. Za účelem řešení těchto problémů iniciovalo Ministerstvo životního prostředí výzkumný projekt s názvem Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území ČR. Jeden z výstupů tohoto projektu je popsán v článku **Variabilita nedostatkových objemů na českých tocích ve vztahu k fyzicko-geografickým charakteristikám povodí**.

Příklad řešení konkrétních problémů souvisejících se suchem a nedostatkem vody v České republice je popsán v článku **Studie dopadů klimatické změny na hydrologické poměry v povodí Blšanky a návrh adaptačních opatření**.

Studie a polemiky o možných vlivech klimatické změny na četnost a velikost povodňových průtoků dosud nedošly k jednoznačným závěrům. Katastrofální povodně, které se vyskytly v České republice od roku 1997, však ukazují, že je třeba řešit i otázky protipovodňových opatření. Této problematice je věnován článek **Metody hodnocení účinků protipovodňových opatření na N-leté průtoky**, jež je výstupem dílčího projektu výzkumného záměru sponzorovaného Ministerstvem životního prostředí České republiky.

Do nedávné doby byla hlavní pozornost v oblasti dopadů klimatických změn věnována problémům souvisejícím s množstvím vodních zdrojů. K této otázce se v posledních letech připojuje i neméně závažná problematika možných dopadů na kvalitu vod. Ukázkou závažnosti tohoto problému jsou výsledky studie popsány v článku **Možné zvýšení teploty vody na území České republiky**.

### Literatura

- [1] Kašpárek, L., Mrkvíčková, M., and Novický, O. (2007) Advanced tool for statistical testing and its application for detecting impacts of climate change on evaporation (příspěvek přednesený na konferenci IUGG XXIV, Perugia, Itálie).
- [2] Novický, O. (2005) Climate variability and EU water policy. In World Water Week, Workshop 2: Coping with Climate Variability and Water-Related Hazards, Stockholm, Švédsko.
- [3] Novický, O. (2008) Vulnerability of groundwater resources in different hydrogeological conditions to climate change (příspěvek přednesený na 21. symposiu IAH, Toyama, Japonsko).
- [4] Novický, O. and Kašpárek, L. (2006) Grouping of extreme runoff events in Central Europe. In Climate change, consequences for water resources management, Wasser Berlin 2006 – International DWA symposium on water resources management, Berlín.
- [5] Novický, O., Kašpárek, L., and Peláková, M. (2006) Climate change impacts and responses in the Czech Republic and Europe (příspěvek přednesený na 5th World FRIEND Conference, La Habana, Cuba, 2006).
- [6] Novický, O., Kašpárek, L., and Krejčí, J. (2008) Potentials for flood flow reduction by retention capacities in reservoirs and flood plain areas. In Water resource systems management under extreme conditions, Moskva, 2008. ISBN 978-5-9900677-6-9.



- [7] Novický, O., Kašpárek, L., and Uhlík, J. (2007) Possible impacts of climate change on groundwater resources and groundwater flow in well developed water bearing aquifers. In Heinonen, M. Climate and water. Helsinki : Finish Environment Institute, 2007, p. 358–364. ISBN 978-95-21127-90-8.
- [8] Novický, O., Kašpárek, L., Vaculík, M., Fridrichová, R., and Treml, P. (2009) Flow trends in observed data and climate change scenarios (příspěvek přednesený na 33. sympoziu IAHR, Vancouver, Kanada).
- [9] Novický, O., Kašpárek, L., and Vyskoč, P. (2008) Integrated simulation by hydrological, hydraulic and water management modelling techniques in support of water resources management in the Czech Republic. In Taniguchi, M. et al. (eds) From headwaters to the ocean. Kyoto (Japonsko), Leiden (NL) : CRC Press/Balkema, 2008, p. 243–248. ISBN 978-0-415-47279-1.
- [10] Novický, O., Vyskoč, P., Kašpárek, L., Treml, P., and Mrkvíčková, M. (2008) Assessment of possible impacts of climate change on water resources in the Vltava River basin (příspěvek přednesený na Magdeburském semináři o ochraně vod, Magdeburg, Německo).
- [11] Tallaksen, LM. and van Lanen, HAJ. (eds) (2004) Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam : Developments in Water Sciences 48, Elsevier B.V.

Ing. Oldřich Novický  
Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.

## VÝVOJ MODELU HYDROLOGICKÉ BILANCE – BILAN

Stanislav Horáček, Oldřich Rakovec, Ladislav Kašpárek, Adam Vizina

### Klíčová slova

hydrologická bilance, hydrologický model, Bilan, hydrologické sucho, klimatická změna

### Souhrn

Článek se zabývá vývojem modelu hydrologické bilance Bilan v denním kroku, který vychází ze stávající měsíční verze. Tento konceptuální model je představován systémem zásob a toků ve třech úrovních (povrch, půda, podzemní voda); procesy jsou řízeny šesti parametry a podle vnějších podmínek jsou rozlišeny tři režimy výpočtu. Spolu s odtokem z povodí jsou modelovány také další prvky hydrologické bilance (územní výpar, zásoba vody ve sněhu a v půdě apod.).

Model Bilan v denním kroku byl použit pro popis současného stavu a odhad dopadů klimatické změny v dlouhodobém výhledu (rok 2085) pro deset vybraných povodí v České republice. Potvrdila se možnost významného poklesu odtoků v jarních a letních měsících, naproti tomu zimní průtoky se zvyšují z důvodu vyšších srážek a dřívějšího tání sněhu. Další aplikací bylo modelování hydrologické bilance se zaměřením na výskyt a šíření hydrologického sucha pro povodí horní Metuje, při kterém byly výsledky modelu Bilan v denním kroku porovnány s hodnotami simulovanými modelem HBV. Studie ukázaly, že denní Bilan umožňuje dostatečně popsat hydrologickou bilanci a chování povodí a že vzájemně odpovídají jak výsledky měsíční a denní verze, tak výsledky z Bilanu a HBV.

### Úvod

Model chronologické hydrologické bilance Bilan [1] je v měsíční verzi od 90. let 20. století běžně používán pro hydrologické analýzy povodí v České republice. Simulace hydrologické bilance na daném povodí, které je uvažováno jako jeden celek, jsou prováděny pro současné podmínky i pro výhledové scénáře klimatické změny. Pro detailnější informaci o časovém rozložení bilancovaných veličin a jejich extrémeh je však třeba použít kratší časový krok.

V posledních letech proto byly testovány vývojové verze modelující hydrologickou bilanci v denním kroku, a to v rámci oddílu Hydrologie 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“ [2], který je financován Ministerstvem životního prostředí ČR. Výsledkem výzkumu je verze v denním kroku připravená pro řešení podobných problémů, k jakým se používá měsíční verze.

Na souboru deseti povodí z různých regionů ČR bylo pro denní verzi ověřováno, zda její výstupy odpovídají výstupům získaným použitím měsíční verze. Dále byla denní verze použita pro analýzu výskytu a šíření hydrologického sucha na povodí horní Metuje [3], která byla součástí výzkumu na testovacích povodích projektu WATCH (WATER and Global CHange), financovaného v 6. rámcovém programu Evropské unie.

Článek seznamuje s použitými metodickými postupy pro modelování hydrologické bilance, vyhodnocení sucha a odhad dopadů klimatické změny. Výsledky získané pomocí denního Bilanu jsou za účelem posouzení jeho věrohodnosti srovnávány s pozorovanými daty, s výsledky z měsíční verze Bilanu a z modelu HBV.

### Metodika

#### Popis modelu Bilan v denním kroku

Vyvinutá denní verze konceptuálního modelu hydrologické bilance Bilan, parametrizující hydrologické chování povodí, vychází z měsíční verze. Základní struktura modelu a principy výpočtu jsou shodné v denní

i měsíční verzi, stejně jako to, že povodí jsou uvažována jako celistvá. Povodí je schematizováno na soustavu nádrží, vertikálně jsou rozlišeny tři úrovně – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody (obr. 1). Velikosti toků mezi jednotlivými nádržemi jsou určovány algoritmy modelu, které jsou řízeny šesti volnými parametry (o dva méně než v měsíční verzi), považovanými za časově invariantní. Společně pro obě verze je odlišen třetí režim závislosti na teplotě (zima, tání sněhu, léto).

Vstupem do modelu jsou pozorované časové řady srážek, teploty vzduchu a potenciální evapotranspirace nebo vlhkosti vzduchu. Pokud nejsou vstupní řady potenciální evapotranspirace zadány, jsou dopočítány na základě sytostního doplnku (pro danou teplotu a vlhkost vzduchu). K tomu se využívá metodiky [4], která uvádí měsíční hodnoty pro různé vegetační zóny. Pro použití v denní verzi byly tyto hodnoty převedeny na denní pomocí interpolace zachovávající měsíční průměry [5].

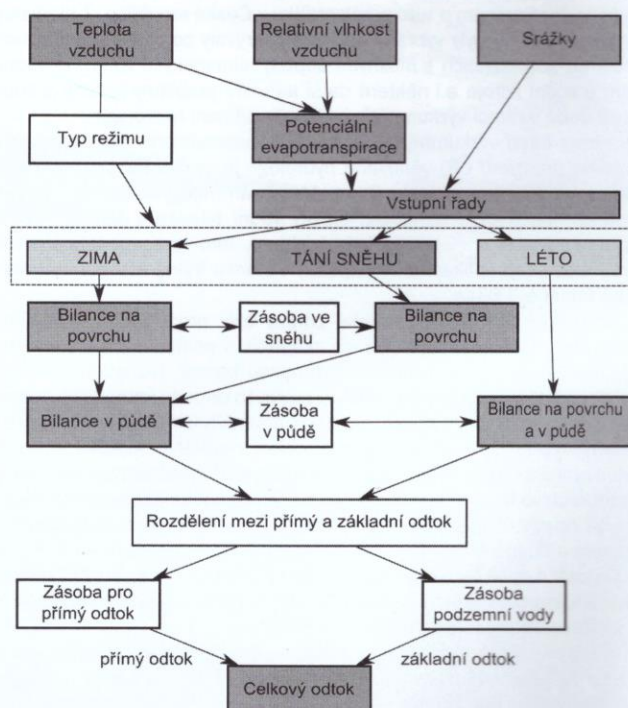
Obecně je bilance vody v určité nádrži počítána podle vztahu

$$S(d) = S(d-1) + IN(d) - OUT(d),$$

velikost zásoby vody  $S(d)$  je tedy pro daný den  $d$  zjištěna ze zásoby v předchozím dni  $S(d-1)$  a vstupů do nádrže  $IN(d)$  a výstupů z nádrže  $OUT(d)$  v aktuálním dni.

Pro bilanci na povrchu půdy hrají zásadní roli vstupní srážkový úhrn a územní výpar, jehož velikost je určována podle potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody (v létě se do ní zahrnuje také voda v půdním profilu). Intercepce je v bilanci uvažována jako součást vody v půdním profilu. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu také zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda infiltruje 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. Kromě odtokových dat poskytuje model výstupní časové řady zásob v jednotlivých nádržích a ve sněhu.

Model je kalibrován na řadu neovlivněných průtoků a neřeší ovlivnění hydrologické bilance vodohospodářskými operacemi v povodí. Pro tyto potřeby je možno aplikovat simulační model vodohospodářských soustav a jako jeho vstupy využít výsledné neovlivněné řady z Bilanu.



Obr. 1. Schéma modelu Bilan v denním kroku



Algoritmus modelu byl napsán v jazyku Object Pascal a začleněn do stávajícího rozhraní pro měsíční verzi. Díky tomu je možno pro kalibraci využívat stejnou dvoustupňovou optimalizační metodu jako v měsíční verzi. Stejně zůstaly také ostatní možnosti programu (transformace vstupních dat, stanovení mezí parametrů, tvorba výstupů apod.). Jako další kritériální funkce byl přidán Nashův-Sutcliffův koeficient determinace, včetně jeho varianty pro logaritmované průtoky vhodné pro kalibraci se zaměřením na oblast malých průtoků.

### Identifikace a modelování hydrologického sucha

Pouze pro povodí horní Metuje byla provedena analýza meteorologického a hydrologického sucha, které bylo stanoveno poklesem hodnot daných veličin pod prahovou hodnotu odvozenou z 80% kvantilu každého měsíce. Meteorologické sucho bylo posouzeno z průměrných srážkových úhrnů třiceti předcházejících dnů. Hydrologické sucho bylo hodnoceno z pohledu zásoby vody v půdě, zásoby podzemní vody a simulovaného odtoku. Výsledky simulované modelem Bilan byly nejprve verifikovány tím, že byly porovnány s pozorovanými odtoky a zásobou podzemní vody odhadnutou podle údajů z pozorovaných vrtů. Poté byly použity pro identifikaci jednotlivých typů sucha a analýzu šíření sucha hydrologickým cyklem. Výsledky byly následně srovnány s výsledky studie [6], ve které bylo zkoumáno také povodí horní Metuje za použití stejné metodiky, avšak pomocí konceptuálního semidistributovaného modelu HBV [7], podobného svou strukturou modelu Bilan.

### Odhad dopadů klimatické změny

Pro přípravu scénářů klimatické změny byly použity výsledky projektu PRUDENCE, konkrétně výstupy z regionálních klimatických modelů HIRHAM a RCOA. Výstupy obou modelů se vztahují k budoucímu období 2071–2100 s referenčním obdobím 1961–1990. Výpočtové body modelů tvoří síť přibližně 50 km × 50 km, která zachycuje hrubou orografii ČR (menší pohoří jsou již zanedbána). V kombinaci se dvěma scénáři vývoje emisí podle SRES [8] („pesimistický“ A2 a „optimistický“ B2) byly připraveny celkem čtyři varianty scénářů vstupních meteorologických řad, obsahujících srážkové úhrny, teploty vzduchu a vlhkosti vzduchu, zjištěné z teploty rosného bodu [9].

Hodnoty pro dané povodí byly interpolovány z okolních výpočtových bodů metodou vážené inverzní vzdálenosti (IDW). Scénáře pro povodí pak byly připraveny tak, že k pozorovaným meteorologickým datům byla přičtena změna mezi výstupy klimatického modelu pro budoucí a referenční období. Tato změna byla uvažována konstantní pro jednotlivé měsíce. Zohledněna tak byla průměrná změna, nikoli variabilita změn. Navíc byla korigována vstupní vlhkost vzduchu tak, aby nebyly překročeny maximální hodnoty sytostního doplnku, ze kterého je určována potenciální evapotranspirace.

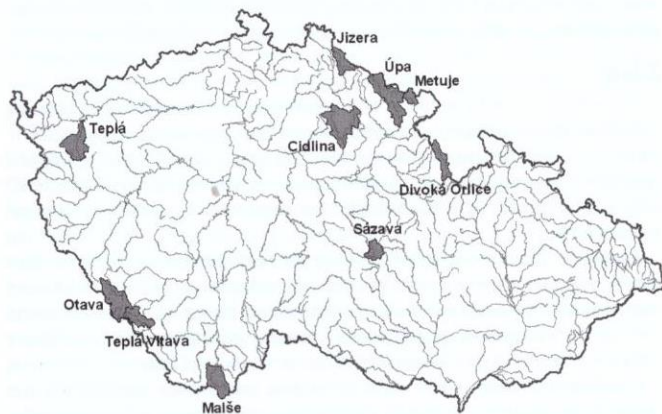
Scénáře tvořily vstup do modelu Bilan, jehož parametry byly kalibrovány na datech pozorovaných v současnosti. Hodnocení dopadu klimatické změny spočívalo ve srovnání výsledků modelovaných pro současnost a pro dlouhodobý výhled s časovým horizontem v roce 2085.

### Data

Denní verze Bilanu byla testována na datech z deseti malých a středních povodí (plochy povodí od 74 do 450 km<sup>2</sup>) nacházejících se v různých regionech v povodí Labe, Vltavy a Ohře (obr. 2). Data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem s výjimkou horní Metuje, která je experimentálním povodím Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka.

Kromě řad neovlivněných průtoků byly využity meteorologické řady (srážky, teploty vzduchu, vlhkosti vzduchu), které byly pro povodí zjištěny pomocí váženého průměru ze stanic na povodí a blízkého okolí. Ve většině případů byl k dispozici záznam z let 1962–2006.

Tyto časové řady byly rozděleny na část pro kalibraci a část pro validaci, která byla zpravidla tvořena závěrečným úsekem o délce 5–10 let.



Obr. 2. Testovaná povodí

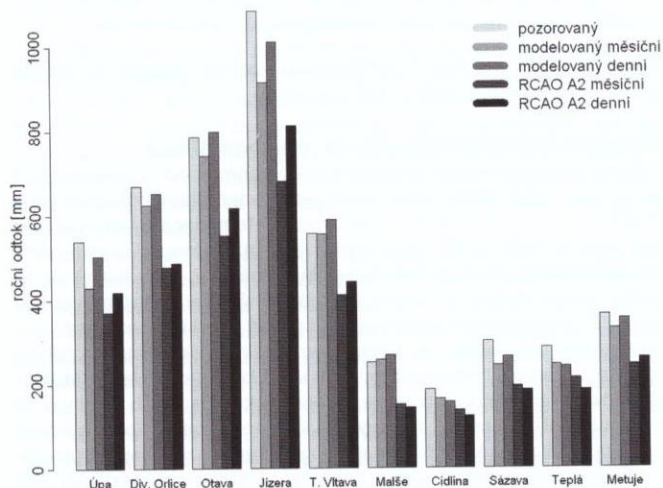
Studie zaměřená na sucha se týkala pouze povodí horní Metuje, použito v ní bylo kalibrační období 1982–1993 a validační období 1994–2006.

## Výsledky a diskuse

### Srovnání denní verze s ostatními modely

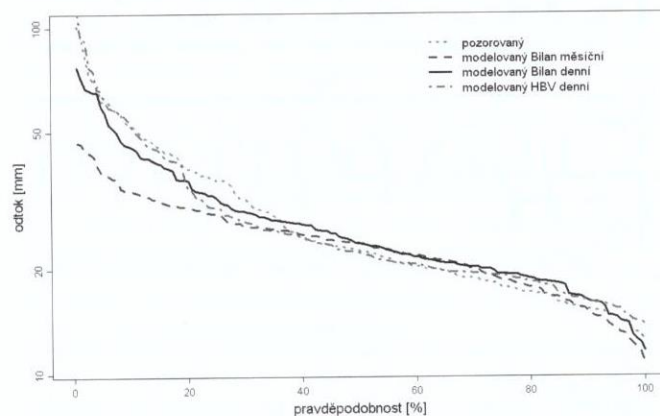
Při kalibraci a validaci oběma verzemi modelu Bilan bylo dosaženo příznivějších hodnot kritériální funkce zpravidla pro měsíční řady. Příčinou je samotný charakter denních dat, která mají vyšší variabilitu než měsíční. Rozdíly mezi hodnotami kritéria pro kalibrovanou a validovanou část byly podobné pro denní i měsíční verzi.

Pro obě verze modelu byly porovnány hodnoty v měsíčním časovém kroku, simulované denní řady proto byly převedeny na měsíční. V případech, kdy měsíční verze celkový odtok podhodnocuje (především v jarních měsících), dosahuje většinou denní verze lepší shody. Důvodem je vyšší modelovaný základní odtok, který je dán jinou strukturou denní verze. Týká se to zejména vodnějších povodí, jak ukazuje srovnání hodnot průměrného ročního odtoku na obr. 3.



Obr. 3. Průměrné roční odtoky pro všechna povodí – pozorovaný, modelovaný oběma verzemi Bilanu pro současnost a podmínky klimatické změny (scénář RCOA A2)

Srovnání čar překročení modelovaných a pozorovaných hodnot (obr. 4) potvrzuje, že Bilan je určen především k modelování nízkých a středních průtoků. V oblasti vyšších průtoků jsou pak blíže skutečnosti čáry překročení z denních agregovaných dat než z měsíčních.

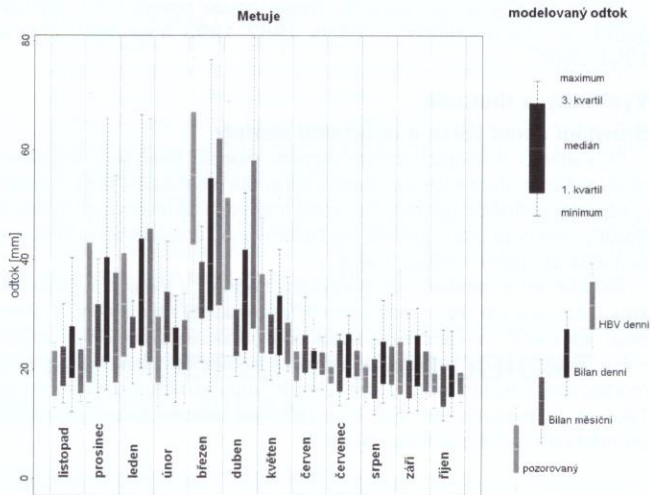


Obr. 4. Čára překročení měsíčních odtoků pro povodí Metuje (období 1982–1993), pozorovaná a podle různých modelů

Rozptyl hodnot odtoku pro daný měsíc vychází vyšší v denní verzi než v měsíční a více odpovídá rozptylu pozorovaných dat. Platí to zejména pro zimní měsíce, kdy jsou měsíční odtoky rozkolísanější (obr. 5).

Průměrné měsíční hodnoty ostatních modelovaných prvků hydrologické bilance se dají díky detailnější informaci obsažené v denních datech považovat za zpřesnění údajů modelovaných z měsíčních řad. Rozdíl je v zásobě podzemní vody, generující základní odtok – v denní verzi je pro většinu povodí nižší a rozkolísanější. Zásoba vody v půdě vykazuje stejnou tendenci v obou verzích, liší se v kalibrované maximální hodnotě. Zásoba vody ve sněhové pokrývce bývá často výrazně vyšší u denní verze, což přispívá k lepší simulaci jarních odtoků.

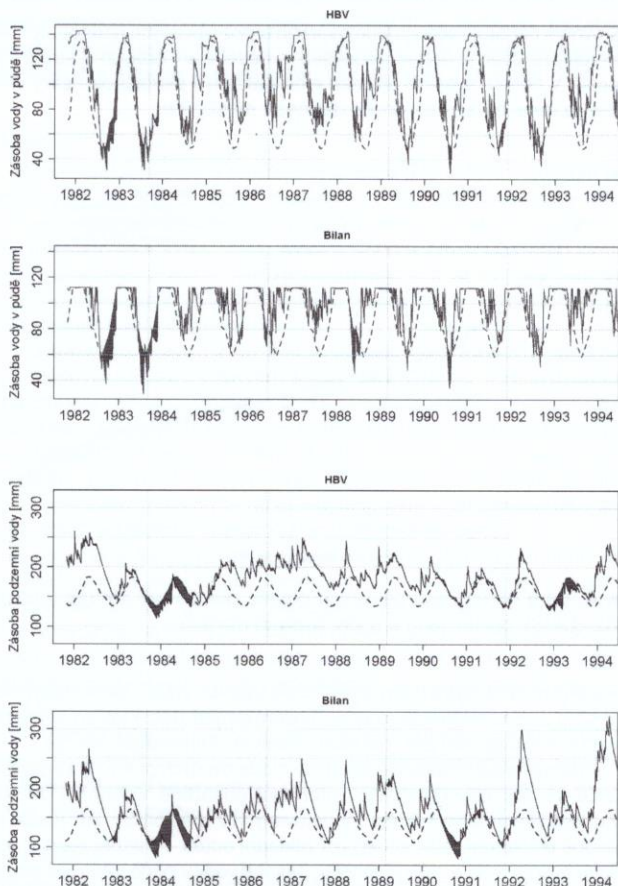




Obr. 5. Variabilita měsíčních odtoků pro povodí Metuje (období 1982 až 1993), pozorovaná a podle různých modelů

### Simulace hydrologického sucha pro horní Metuji

Simulace pro povodí horní Metuje poskytnuté denním Bilanem a HBV se od sebe příliš nelišily, což je pro agregované denní odtokové výšky ukázáno na obr. 5. Hodnota koeficientu determinace (Nash-Sutcliffe) byla lepší pro HBV (0,68) než pro Bilan (0,50). Možnou příčinou je větší počet parametrů HBV (31) v semidistribované verzi, než v Bilanu (6). Na druhou stranu je Bilan s menším počtem volných parametrů robustnější než HBV. Bilan byl například schopen úspěšně simulovat sestupné větve hydrogramu bez ohledu na vybranou kritériální funkci, zatímco HBV je zachytil jen při kalibraci logaritmickou verzí koeficientu Nash-Sutcliffe. Simulované absolutní hodnoty a sezónní fluktuace zásob vody v půdě a v podzemní vodě se pro oba modely víceméně shodují. Rozdíl byl pozorován pouze v maximálních hodnotách způsobených rozdílnou strukturou modelů, nicméně deficit vody v půdě byl identifikován měsíčním 80% kvantilem téměř shodně. Výrazné sucho v zásobě podzemní vody v roce 1984 bylo zachyceno oběma modely, v roce 1990 však bylo zaznamenáno pouze Bilanem a v roce 1993 jen v případě HBV (obr. 6).

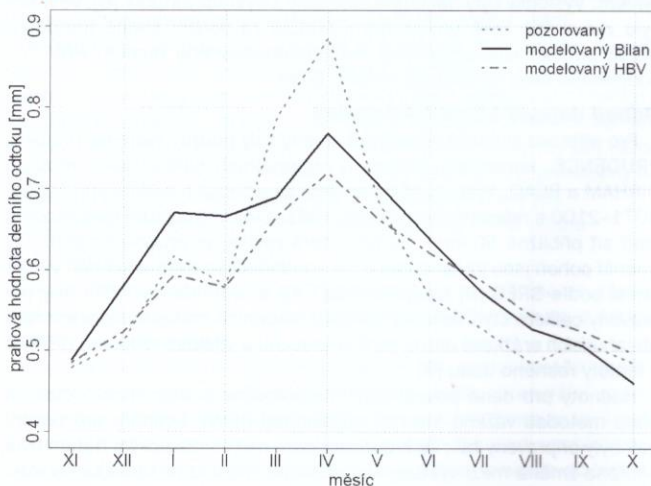


Obr. 6. Simulace zásob vody v půdě a podzemní vodě pomocí denního Bilanu a HBV s vyznačeným deficitem pod 80% měsíční kvantil

Tabulka 1. Přehled vybraných charakteristik sucha pro horní Metuji

Typ sucha	Počet událostí		Průměrná délka [dny]	
	Bilan	HBV	Bilan	HBV
Meteorologické	50	54	15	15
Zásoba v půdě	42	41	15	17
Zásoba v podzemní vodě	22	21	39	40
Simulovaný odtok	35	51	25	17
Pozorovaný odtok	49		17	

Výsledky analýzy sucha pomocí obou modelů shrnuje tabulka 1. Pro jednotlivé typy sucha jsou oba modely podobné z hlediska počtu událostí i jejich průměrné délky, výjimku tvoří simulovaný odtok (podle Bilanu 35 událostí, podle HBV 51, podle pozorovaného odtoku 49). Bilan simuluje především déle trvající události s vyšší průměrnou délkou (25 dní) než model HBV (17 dní). Je to způsobeno také tím, že pro identifikaci sucha jsou pro každou řadu použity jiné prahové hodnoty, které vycházejí z měsíčních 80% kvantilů (obr. 7).



Obr. 7. Prahové hodnoty pro identifikaci sucha na povodí Metuje založené na 80% kvantilu měsíčních hodnot, určené podle pozorované řady, denního Bilanu a HBV

### Odhad dopadů klimatické změny

Pro podmínky klimatické změny byly srovnány výsledky z modelování měsíčních řad s agregovanými výsledky modelování denních řad. Stejně jako pro současnost byly měsíční hodnoty a průměry spočítané denní verzi variabilnější než u měsíční. Dále byly srovnány poměry průměrných ročních odtoků pro jednotlivá povodí. Výsledky z denní verze odpovídají měsíční jak z hlediska velikosti tohoto poměru, tak podle jeho prostorové variability. V rozdělení četností měsíčních odtoků je pro obě verze zřetelný posun do nižších hodnot, rozdíly ve velikostech odtoku modelovaných měsíčních a denních verzí vyplývají už z rozdílu pro modelování současného stavu.

Průměrné snížení ročního odtoku činilo pro nejvíce pesimistický scénář (klimatický model HIRHAM a emisní scénář A2) v denní verzi 38 % (v měsíční 35 %), pro neoptimističtější (model RCOA a emisní scénář B2) je toto snížení 14 % pro denní a 13 % pro měsíční verzi. Průměrné roční odtoky pro střední scénář RCOA A2 jsou uvedeny na obr. 3.

V porovnání s měsíční verzí představují výsledky z denní verze menší snížení odtoku pro vodná horská povodí (Otava po Rejstejn, Jizera po Vilémov, Teplá Vltava po Lenoru) a větší snížení pro povodí s nižší průměrnou roční odtokovou výškou (Cidlina po Nový Bydžov, Teplá po Cihelny).

### Závěr

Provedené první rozsáhlejší vyhodnocení výstupů verze modelu Bilan v denním kroku ukázalo, že výstup modelu odpovídají pozorovaným datům a výsledkům modelovaným měsíční verzí. Obecně platí, že denní verze dosahuje zpravidla lepší shody s pozorovanými daty než měsíční, a to jak v průměrných hodnotách, tak zejména v rozdělení četností a variabilitě.

Z modelování hydrologické bilance za podmínek klimatické změny vyplývá, že vliv změny meteorologických vstupů na změnu měsíčních hodnot prvků hydrologické bilance je modelován obdobně při použití denní i měsíční verze Bilanu. Rozdíly mezi výsledky jsou dány spíše rozdílem mezi simulacemi denní a měsíční verze pro stávající stav.

Použitelnost denní verze byla potvrzena také studií zaměřenou na výskyt hydrologického sucha. V ní byl kromě modelování pomocí modelu Bilan použit i model HBV, který poskytoval podobné výsledky.



Další vývoj modelu je zaměřen na možnost použití Bilanu v soustavě povodí, kdy je třeba kalibrovat soustavu jako celek, aby nebyly výstupy z jednotlivých povodí ve vzájemném rozporu. Pozornost by měla být věnována také významu parametrů, možnostem jejich identifikace a s ní související neurčitostí modelu.

#### 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

- [1] Tallaksen, LM. and van Lanen, HAJ. (eds) Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam, 2004.
- [2] Novický, O. aj. 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. Oddíl A. Hydrologie. Výzkumný záměr MZP0002071101. Praha : VÚV T.G.M., 2008.
- [3] Rakovec, O. Analysis of hydrological drought using the Bilan model (diplomová práce). Praha : ČZU, 2009.
- [4] Rekomendacii po rasčotu isparenija s poverchnosti suši. Leningrad : Gidrometeorizdat, 1976.
- [5] Rymes, MD. and Myers, DR. Mean preserving algorithm for smoothly interpolating averaged data. *Solar Energy*, 71(4), 2001, s. 225–231.
- [6] Rakovec, O., Van Loon, AF., Horáček, S., Van Lanen, HAJ., and Novický, O. Drought analysis for the Upper Metuje and Upper Sázava catchments (the Czech Republic) using the hydrological model HBV. WATCH Technical Report (in press).
- [7] Seibert, J. HBV light version 2, User's manual. 2005, dostupné online: <http://people.su.se/~jseib/HBV/HBV manual 2005.pdf>, citováno 24. 3. 2009.
- [8] IPCC: Special Report on Emissions Scenarios – SRES. 2000, dostupné online: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>, citováno 22. 4. 2008.
- [9] Kalvová, J. aj. Vytvoření scénářů klimatické změny, kap. 2.3 zprávy Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, oriento-

vaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů. Oddíl A: Hydrologie, Výzkumný záměr MZP0002071101. Praha : VÚV T.G.M., 2005.

Ing. Stanislav Horáček, Ing. Oldřich Rakovec,  
Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Adam Vizina  
VÚV T.G.M., v.v.i., Praha  
e-mail: adam\_vizina@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

#### Key words

hydrological balance, hydrological model, Bilan, hydrological drought, climate change

*The development of Bilan water balance model (Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L., Vizina, A.)*

This paper deals with development of water balance model Bilan in daily time step, which is based on the original monthly version. This lumped conceptual model simulates the water balance in a catchment (surface, soil moisture reservoir, groundwater reservoir), the hydrological system is characterised by 6 model parameters and the three regimes can be distinguished according to the air temperature. Furthermore, it calculates runoff besides other variables (evapotranspiration, amount of water stored in the snow pack, storage in soil and groundwater).

The Bilan model was applied to simulate the present climate and future climate scenarios (year 2085) for 10 Czech catchments. Generally, significant decrease in runoff season is expected during spring and summer seasons, while the runoff in winter is assumed to increase because of higher precipitation and earlier snowmelt. Drought analysis represents another application, which was carried out by the daily Bilan for the Upper Metuje catchment. The performance of the Bilan model was compared with the HBV model, which has a similar structure. It was shown that the daily Bilan is suitable for description of hydrological behaviour of given catchment and that the results correspond with results provided by both monthly Bilan and HBV model.

## ZPŘESNĚNÍ ODHADŮ DOPADŮ KLIMATICKÉ ZMĚNY NA VODNÍ ZDROJE S VYUŽITÍM SCÉNÁŘŮ ZALOŽENÝCH NA SIMULACÍCH MODELEM ALADIN-CLIMATE/CZ

Adam Vizina, Stanislav Horáček

#### Klíčová slova

klimatická změna, hydrologický model Bilan, ALADIN-Climate/CZ

#### Souhrn

Studie dopadů klimatické změny na hydrologické poměry v daném povodí jsou založeny na modelování vodní bilance pro současné podmínky a pro podmínky ovlivněné klimatickou změnou. V prezentované studii byl použit model hydrologické bilance Bilan v měsíčním kroku, jehož vstupy jsou časové řady srážkového úhrnu, teploty a relativní vlhkosti vzduchu spolu s měřeními průtoky. Model je vždy kalibrován pro dané povodí a simuluje jednotlivé prvky hydrologické bilance (potenciální evapotranspirace, územní výpar, zásoba vody v půdě, zásoba podzemní vody apod.), z nichž nejvýznamnější je celkový odtok složený z odtoku přímého, povrchového a základního.

Představeny jsou výsledky studie odhadu dopadů klimatické změny v krátkodobém výhledu (časový horizont 2025) pro 56 povodí z území ČR. Časové řady ovlivněné změnou klimatu byly připraveny z výstupů regionálního klimatického modelu ALADIN-CLIMATE/CZ pro emisní scénář SRES A1B. U vybraných povodí byly navíc použity scénáře získané extrapolací současných trendů meteorologických veličin. Parametry modelu Bilan byly kalibrovány pro současné poměry. Pro vstupní meteorologické řady upravené podle příslušného scénáře pak byla modelem s takto kalibrovanými parametry vypočítána hydrologická bilance za podmínek klimatické změny. Srovnání výsledků pro stávající poměry a pro podmínky klimatické změny ukázalo možný pokles průměrných ročních průtoků, změnu v ročním chodu bilančních veličin, jejich větší rozkolísanost a zvýšenou četnost období sucha.

#### Úvod

Klimatická změna, její dopady na různé oblasti lidské činnosti a příprava zmírňujících a adaptačních opatření se stávají důležitým předmětem celosvětové politiky, a tedy i politiky v České republice. Vodní hospodářství je podle výsledků výzkumu jednou z nejméně zranitelných oblastí, a proto by mu měla být věnována prvořadá pozornost.

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., se této problematice dlouhodobě věnuje. S tím, jak jsou postupně zdokonalovány scénáře klimatické změny, založené na výsledcích modelování globální cirkulace atmosféry, jsou zpracovávány odpovídající modelová řešení hydrologické bilance a odhady změn hydrologického režimu. V návaznosti jsou řešeny dopady na vodní zdroje a vodní hospodářství, zejména na zásobování vodou.

V současné době jsou k dispozici regionální scénáře klimatické změny, které jsou zpracovány pro podstatně jemnější plošné rozlišení než předchozí scénáře globální. Ve Výzkumném ústavu vodohospodářském se používají scénáře založené na simulacích regionálními modely HIRHAM a RCAO v rozlišení 50 km × 50 km (pro časový horizont 2085) a nově také výstupy regionálního modelu ALADIN-Climate/CZ v rozlišení 25 km × 25 km (zatím pro časový horizont 2025).

Příprava výstupů modelu ALADIN-Climate/CZ a jejich následná aplikace pro odhad dopadů klimatické změny v různých oblastech jsou náplní komplexního projektu „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ [1], financovaného Ministerstvem životního prostředí ČR. Tento příspěvek vychází z výsledků části projektu, která se zabývá dopady na hydrologickou bilanci a vodní zdroje.

#### Metodika

Nejprve jsou popsány emisní scénáře a regionální klimatický model, které slouží k modelování řad meteorologických veličin za podmínek klimatické změny. Následně je uveden postup při přípravě těchto řad pro povodí a při hydrologickém modelování, které umožňuje zkoumat dopad změných podmínek na hydrologickou bilanci.

#### Emisní scénáře klimatické změny

Jednou z hlavních příčin probíhajících změn klimatu jsou emise skleníkových plynů. Jejich produkce je ovlivněna širokou škálou faktorů – zejména technologickými změnami a socioekonomickým a demografickým vývojem společnosti. Jelikož předpověď vývoje takto komplexního



**Tabulka 1.** Přehled použitých scénářů

Kód	Rok	Popis	Změna teploty	Změna srážek	Změna vlhkosti
A_2020	2020	extrapolace současných trendů s přihlédnutím k výhledu pro 2085 – „pesimistická“ varianta	+1,1 °C	-4 %	–
O_2020	2020	extrapolace současných trendů s přihlédnutím k výhledu pro rok 2085 – střední varianta	+0,9 °C	-2 %	–
B_2020	2020	extrapolace současných trendů s přihlédnutím k výhledu pro rok 2085 – „optimistická“ varianta	+0,7 °C	–	–
C_2020	2020	extrapolace současného trendu	+1,1 °C	+4 %	+2 %
A_2025	2025	prostorově a časově variabilní změny podle výstupů ALADIN-CLIMATE/CZ a scénář A1B	do 2 °C	–	do -2 %

systemu je prakticky nemožná, byly Mezivládním panelem pro klimatickou změnu (IPCC) navrženy ve zprávě SRES (Special Report on Emission Scenarios [2]) scénáře produkce skleníkových plynů založené na různých variantách vývoje společnosti. Systém scénářů má čtyři hlavní skupiny označené jako A1, B1, A2 a B2. Pro běh modelu ALADIN-Climate/CZ byl použit scénář A1B, spadající do skupiny A1.

Skupina scénářů A1 popisuje budoucí svět s velmi rychlým ekonomickým růstem, kde globální počet obyvatel dosáhne maxima v polovině století a poté klesne. Předpokládá se rychlé zavádění nových výkonnějších technologií, zvýšená kulturní a sociální interakce a snížení regionálních rozdílů v příjmech obyvatel. Skupina A1 se dělí na tři scénáře, které popisují různý směr změn v energetice. Scénář A1B je charakterizován vyváženou kombinací energetických zdrojů (fosilních i nefosilních).

### Regionální klimatický model ALADIN-Climate/CZ

V roce 2008 byl na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy integrován regionální klimatický model ALADIN-Climate/CZ (dále jen „ALADIN“) s emisním scénářem A1B (pro období 1961–2050) [3]. Model má horizontální rozlišení 25 km × 25 km. V současnosti jsou výstupy modelu ALADIN k dispozici pro referenční období 1961–1990 a pro budoucnost 2010–2039 (časový horizont 2025), v obou případech byly výstupní veličiny přepočteny z časového rozlišení modelu (6 hodin) na denní data. Vypočtené hodnoty pro referenční období byly srovnány se souborem naměřených hodnot získaných převedením dostupných staničních dat do sítě modelu ALADIN.

Změny meteorologických veličin simulované modelem ALADIN pro úroveň roku 2025 mají poměrně výraznou prostorovou i sezónní proměnlivost. U teplot vzduchu se předpokládá pro rok 2025 zvýšení přibližně o 1 °C, přičemž k největšímu oteplení dojde v podzimních měsících, kdy by mohl nastat nárůst zhruba o 1,5 °C. U změn sezónních srážek je situace složitější. V zimě by na většině území ČR mělo dojít k poklesu srážek (v rozmezí 0–15 %), na jaře by měly vzrůst (o 0–10 %); v létě a na podzim se situace v různých částech ČR liší.

### Scénáře použité pro hydrologickou analýzu

Pozorované řady meteorologických veličin byly upraveny o hodnoty dané scénářů klimatické změny, pro celou řadu byla uvažována pro daný měsíc konstantní změna. Takto vytvořené řady veličin představovaly vstup do modelu Bilan, pro výpočet byly použity parametry kalibrované pro referenční podmínky (současnost). Pro odhad dopadů klimatické změny pak byly srovnány výsledky modelování hydrologické bilance pro současnost a pro budoucnost.

Pro všechna hodnocená povodí byly připraveny scénáře vycházející z výstupů klimatického modelu ALADIN. Změny meteorologických veličin pro jednotlivé měsíce byly pro dané povodí zjištěny váženým průměrem podle velikosti plochy povodí příslušné k výpočtovému bodu klimatického modelu.

Pro porovnání byly pro vybraná povodí vytvořeny k roku 2020 také scénáře využívající extrapolaci současného trendu s přihlédnutím k dlouhodobému výhledu (rok 2085) získanému pomocí regionálních klimatických modelů HIRHAM a RCAO a emisních scénářů A2 a B2. Takto byly získány tři scénáře – střední a dvě krajní varianty možných změn. Další scénář byl odvozen prostou extrapolací trendu z období 1980–2006.

Přehled všech použitých scénářů uvádí tabulka 1.

### Model hydrologické bilance Bilan

K modelování hydrologické bilance byl použit model Bilan [4], vyvinutý ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G.M. a ověřený na desít-

kách povodí z ČR i dalších evropských států. Model 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. Odtok je modelován jako součet tří složek: dvou složek přímého odtoku (zahrnujících i hypodermický odtok) a základního odtoku.

Vstupem do modelu jsou měsíční srážkové úhrny, měsíční průměrné teploty, průměrná

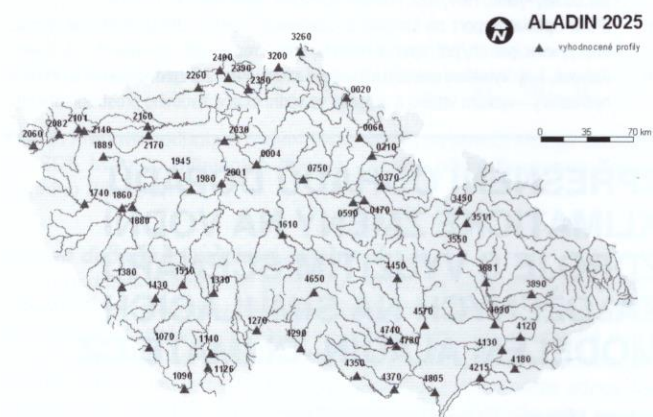
měsíční vlhkost vzduchu a měsíční průměrný odtok potřebný pro kalibraci.

Model Bilan byl pro jednotlivá povodí kalibrován pro pozorované řady. Model nebyl verifikován, protože při rozdělení dostupných řad na úseky pro kalibraci a verifikaci by již byla zkrácena délka úseků na nepřijatelnou míru.

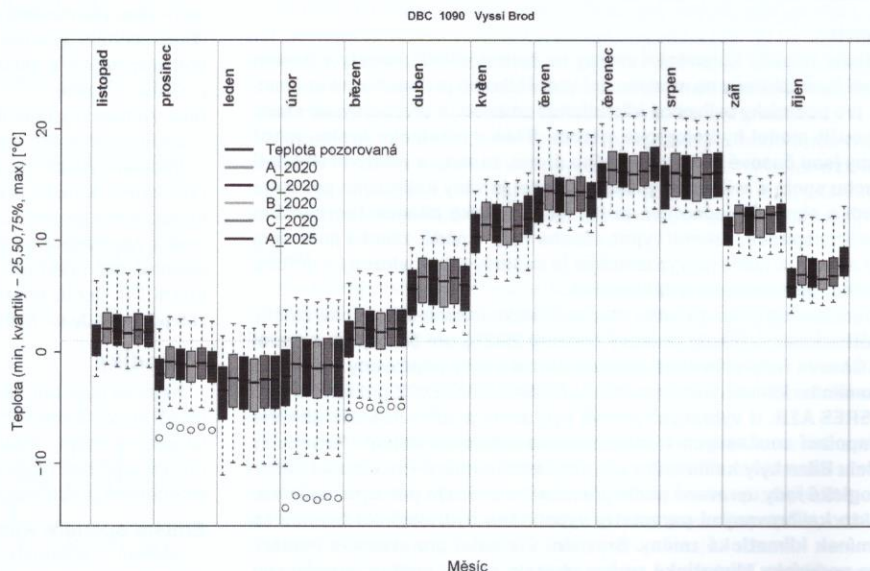
### Data

Dopady klimatické změny na hydrologickou bilanci byly posouzeny pro 56 povodí v České republice, jejichž uzavírající profily (vodoměrné stanice) ukazuje obr. 1.

Data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem. Použity byly časové řady meteorologických veličin (srážek, teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu) a průtoků, které byly přepočítány na neovlivněný stav pomocí údajů o odběrech a vypouštění vody a o manipulacích na příslušných vodních nádržích. Pro většinu hodnocených profilů byla dostupná meteorologická i hydrologická data z období 1980–2006.



**Obr. 1.** Uzavírající profily vyhodnocených povodí



**Obr. 2.** Průměrná měsíční teplota vzduchu pro povodí Vltavy po Vyšší Brod – pozorovaná a podle scénářů klimatické změny



Chybějící úseky řad byly dopočítány pomocí plošné korelace s blízkými srážkovými stanicemi v případě srážkových dat, lineární regresí v případě teploty a relativní vlhkosti vzduchu, popř. průtoků. U průtoků byl využit také přepočtení podle dlouhodobých průměrů na blízkých profilech, tzv. analogonech.

## Výsledky

Pro prezentaci výsledků bylo vybráno povodí Vltavy s uzavírajícím profilem Vyšší Brod (data-bázové číslo 1090), pro které byly zpracovány všechny variantní scénáře klimatické změny. Nejprve je ukázán vliv změny klimatu na meteorologické veličiny, následně je popsáno, jak se tyto změny promítanou do změn odtokových výšek a dalších složek hydrologické bilance.

### Změny meteorologických veličin

Hodnoty průměrných měsíčních teplot ovlivněných změnou klimatu se liší pro jednotlivé měsíce (obr. 2). Největší oteplení nastává v létě s maximálním nárůstem v srpnu (o 2 °C). V období listopad–červen je nárůst teploty pro všechny scénáře víceméně konstantní. Rozpětí změn je v zimních měsících větší než v letních.

Průměrné měsíční srážkové úhrny jsou znázorněny na obr. 3. Nárůst srážkového úhrnu lze pro všechny uvažované scénáře sledovat v zimních měsících. Naopak v letních měsících se předpokládá pokles srážkového úhrnu, což ve spojení s nárůstem teplot zvýší četnost výskytu a intenzitu suchých období.

### Změny odtokových výšek

Odtoky pro referenční rok 2025 spočtené podle jednotlivých scénářů jsou ovlivněny zejména změnou rozložení srážek v průběhu roku a změnou teploty vzduchu. U většiny modelovaných řad je pro podmínky klimatické změny simulován odtok menší než v současnosti. Výjimkou je období prosinec až únor, kdy se projevuje vliv zimního zvýšení srážek, tak teplot – kratší období se zápornou teplotou způsobí, že voda nebude výrazněji zadržována ve sněhové pokrývce. Na některých povodích tak v zimě dojde ke zvětšení odtoku nad současné hodnoty, nebo pokles nebude výrazný. S tím souvisí zmenšení odtoku v dubnu, způsobené posunem období tání sněhu směrem k zimě. V důsledku zvýšení teploty a poklesu srážek klesnou pro všechny uvažované scénáře odtoky v měsících duben až listopad.

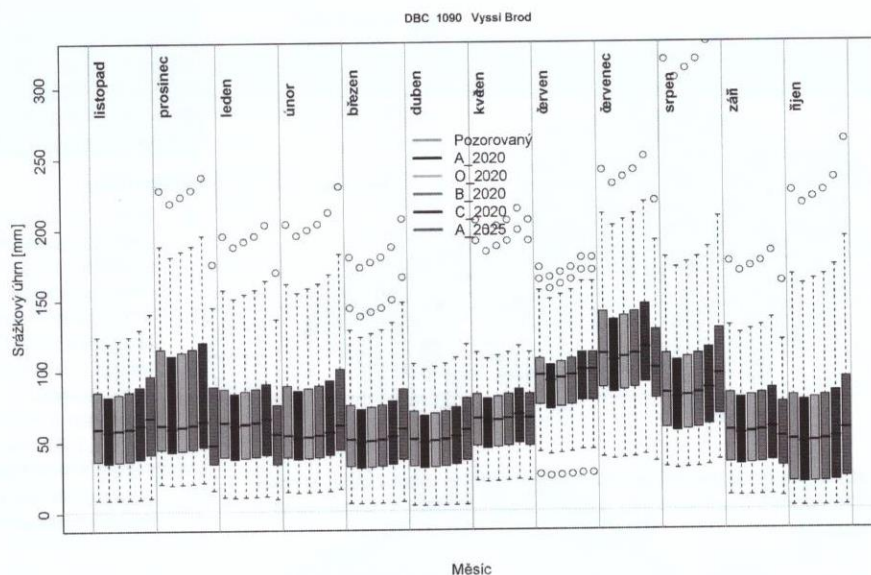
Změny odtoku zjištěné pomocí scénáře dle modelu ALADIN se pohybují ve středu spektra ostatních scénářů. Odtokové výšky pro prezentovaný profil ukazuje obr. 4 a poměr modelovaných hodnot pro podmínky klimatické změny a současnost je zachycen na obr. 5.

Změna průměrných ročních odtokových výšek (zjištěná podle scénáře ALADIN) pro všech 56 povodí v různých regionech ČR je znázorněna na obr. 6. Průměrný pokles vypočtený ze všech povodí činí 10 % s kvantily v 5 % a 14 %, v extrémních případech však může dojít až ke snížení o 23 %. Z hlediska rozložení změn se v souladu s předchozími studiemi ukázalo, že největší pokles odtoku nastane na tocích v nižších a středních polohách.

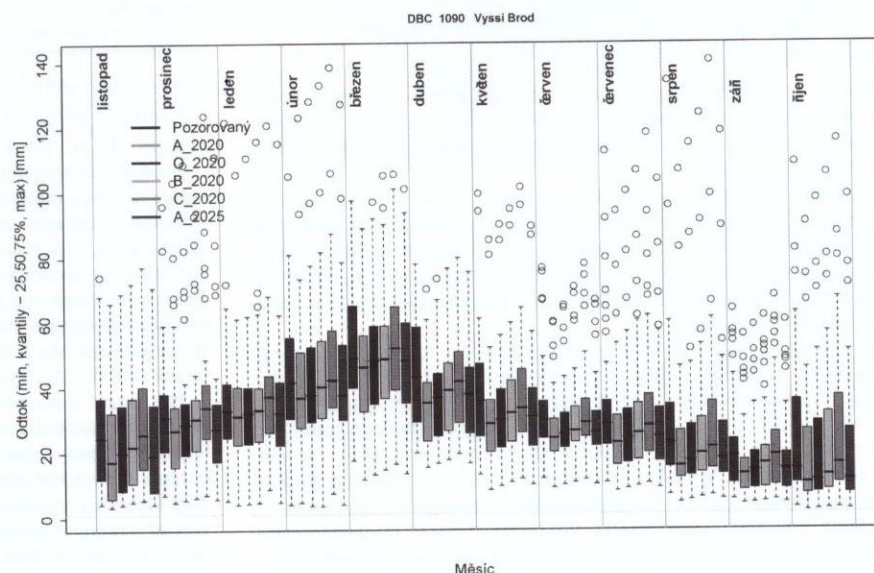
### Změny ostatních složek hydrologické bilance

Model Bilan simuluje také jednotlivé složky odtoku – základní, hypodermický a přímý. V průběhu roku se mění podle uvažovaných scénářů i skladba odtoku, největší změna je předpokládána u hypodermického odtoku. Nelze však stanovit obecné pravidlo, podle kterého se skladba odtoku mění.

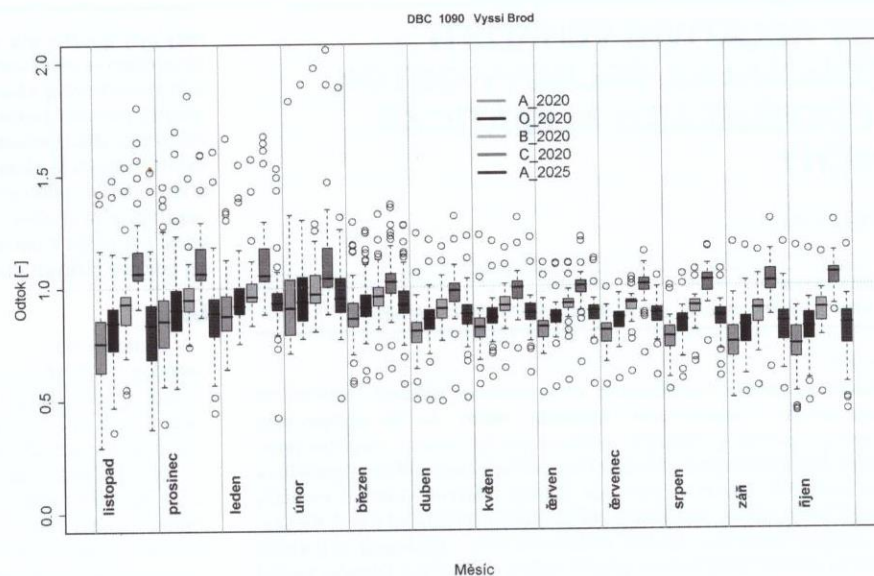
Zásoba podzemní vody pro většinu hodnocených povodí klesá. Zásoba vody ve sněhu se z důvodu zvyšujících se zimních teplot



Obr. 3. Měsíční srážkový úhrn pro povodí Vltavy po Vyšší Brod – pozorovaný a podle scénářů klimatické změny

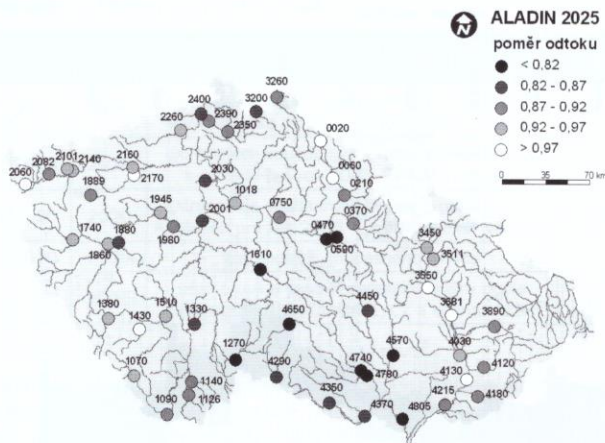


Obr. 4. Odtokové výšky pro povodí Vltavy po Vyšší Brod – pozorované a podle scénářů klimatické změny



Obr. 5. Poměr odtoku modelovaného podle scénářů pro rok 2020/25 a modelovaného pro současnost





**Obr. 6.** Plošné rozdělení snížení průměrných ročních výšek odtoků v povodích ČR – poměr modelovaných podle scénáře ALADIN a modelovaných pro současnost

pro všechny scénáře snižuje a vzhledem k dlouhodobé predikci by byla ve 2. polovině 21. století téměř nulová. Z hlediska zásoby vody v půdě je předpovídán pokles v období květen až listopad, ve zbyvajícím období se příliš nemění.

Potenciální evapotranspirace a územní výpar pro všechny scénáře roste, a to především kvůli nárůstu průměrných teplot vzduchu.

## Závěr

Přes míru nejistoty zahrnutou v klimatických a hydrologických modelech je možno na modelovaných povodích ukázat negativní vliv změn klimatu na průtoky, a to již v případě zpracovaného krátkodobého výhledu (rok 2020, resp. 2025).

Pro hlavní zpracovávaný scénář, vycházející z výsledků regionálního klimatického modelu ALADIN-Climate/CZ, byly modelovány zřetelné změny hydrologického režimu projevující se poklesem průměrných ročních průtoků průměrně o 10 %, v krajních případech až o 23 %. Výsledky získané za použití ostatních scénářů byly v souladu s výsledky vycházejícími z modelu ALADIN.

Podle výsledků studie se změní rozložení odtoků v ročním cyklu a bude nutno počítat s četnějším výskytem období sucha, což bude mít důsledky pro zachování minimálních zůstatkových průtoků. Vlivem vyšších teplot v zimním období se bude redukovat zásoba vody ve sněhové pokrývce. Období zvýšených průtoků se posune z jara na konec zimy, přitom se velikost průtoků zmenší. V následujícím období od jara po podzim se většina srážek spotřebuje na územní výpar a odtoky budou převážně klesat.

Výzkum potvrzuje možné závažné důsledky klimatické změny pro vodní hospodářství a z toho vyplývající socioekonomické dopady. Řešený projekt bude pokračovat obdobnou analýzou pro delší časový horizont (rok 2050) a pro denní časový krok. Následně se zaměří na problematiku adaptačních opatření, která jsou nutná pro zmírnění či eliminaci předpovídaných dopadů.

## VLIV RELATIVNÍ VLHKOSTI VZDUCHU NA CELKOVÝ ODTOK V PODMÍNKÁCH KLIMATICKÉ ZMĚNY

Radek Vlnas

### Klíčová slova

relativní vlhkost vzduchu, citlivost modelu, detekce trendu

### Souhrn

Studie se zabývá hodnocením vlivu relativní vlhkosti vzduchu na proces odtoku v podmínkách klimatické změny. Za tím účelem bylo vybráno 10 povodí s odlišným režimem tvorby odtoku. Nejdříve jsme v těchto povodích zkoumali pomocí neparametrického Mann-Kendalova testu existenci trendu v časových řadách relativní vlhkosti vzduchu v období 1961–2006. Nebyl detekován žádný převládající trend. Klesající či rostoucí tendence vlhkosti vzduchu se lišila v závislosti na lokalitě a ročním období. Poté byl pro stejné období kalibrován bilanční model Bilan. Předpokládaný vývoj klimatu podle scénáře A2 a B2, který jsme obdrželi ze simulací regionálních klimatických modelů, byl promítnut do časových řad meteorologických prvků jednotlivých povodí a tyto

### Poděkování

Článek vznikl v rámci projektu VaV SP/1a6/108/07 Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření, který je koordinován Českým hydrometeorologickým ústavem a je financován Ministerstvem životního prostředí České republiky.

### Literatura

- [1] Pretel, J. aj. Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření. Závěrečná zpráva o řešení projektu VaV – SP/1a6/108/07 v roce 2008. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2008.
- [2] IPCC: Special Report on Emissions Scenarios – SRES. 2000, dostupné online: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>, citováno 2008-04-22.
- [3] Metelka, L. a Kalvová, J. Zpřesnění a aktualizace regionálních scénářů klimatické změny. In Pretel, J. aj. Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření. Závěrečná zpráva o řešení projektu VaV – SP/1a6/108/07 v roce 2008. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2008.
- [4] Tallaksen, LM. and van Lanen, HAJ. (eds) Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam, 2004.

Ing. Adam Vizina, Ing. Stanislav Horáček

VÚV T.G.M., v.v.i., Praha

e-mail: adam\_vizina@vuv.cz

Příspěvek posel lektorským řízením.

### Key words

climate change, hydrological model Bilan, ALADIN-Climate/CZ

*Improved estimation of climate change impact on water resources by using scenarios based on ALADIN model simulations (Vizina, A., Horáček, S.)*

Studies of climate change impact on given catchment are based on water balance modelling for both current conditions and conditions affected by climate change. The water balance was assessed by using Bilan model, which requires input time series of precipitation, air temperature, air humidity and observed runoff. The model is calibrated for given catchment and simulates water balance components (potential evapotranspiration, basin evaporation, soil moisture storage, groundwater storage etc.), including total river flow, which is composed by direct runoff, interflow and base flow.

This paper presents results of study of climate change impact for short-term outlook (year 2025) for 56 river basins across the Czech Republic. Time series affected by climate change are obtained from outputs of regional climate model ALADIN-Climate/CZ driven by SRES A1B emission scenario. The alternative scenarios based on extrapolation of observed trends of meteorological variables were applied for selected basins. Affected time series and basin parameters were used as an input for the model Bilan, which simulates the hydrological balance. The comparison of results for affected and unaffected conditions shows significant decrease of annual runoff and changes in water balance including more frequent drought periods.

řady byly použity pro simulaci odtoku modelem Bilan. Odtok byl dále simulován ve dvou variantách: v první byly podle předpovědi ve scénářích modifikovány všechny veličiny vstupující do modelu, ve druhé byly použity původní skutečně měřené hodnoty relativní vlhkosti vzduchu. Porovnání obou variant neukázalo významnou změnu celkového odtoku. Tvorba odtoku je závislá především na úhrnu srážek a teplotě vzduchu a vliv relativní vlhkosti vzduchu není tak významný. Nicméně v období podzimu a rané zimy, kdy obvykle dochází k dotaci zásob podzemní vody, byl rozdíl v odtoku obou variant zřetelný a mohl by mít význam při udržení nízkých průtoků.

### Úvod

V posledních době se např. Koutsoyannis et al. (2008) zaměřili na hodnocení spolehlivosti budoucích projekcí klimatu, když porovnávali výstupy mnoha různých klimatických modelů s dlouhými pozorovanými řadami (více než 100 let) teplot a srážkových úhrnů v osmi stanicích umístěných v různých částech světa. Jejich výsledky ukazují, že modelové klimatické předpovědi nejsou zatím úspěšné ani v klimatickém měřítku, tzn. v 30letých řadách. Globální cirkulační modely zcela selhaly v reprezentaci klimatu období uplynulých 100–140 let, které je charakteristické fluktuacemi ve velkém měřítku (střídáním rostoucích a klesajících trendů trvajících několik desetiletí). Tato pozorovaná kolísání se velmi liší od monotónního trendu, který udávají klimatické modely.

Douglass et al. (2007) srovnávali trendy teplot troposféry tropického pásma s údaji, které poskytují klimatické modely. Ve své práci využili



rozsáhlou databází pozemního i satelitního měření a výstupy téměř všech hlavních klimatických modelů (PCMDI, 2005). Troposférické teploty tropického pásma byly vybrány z toho důvodu, že v těchto zeměpisných šířkách mají z velké části původ změny teplot globálních. Bylo zjištěno, že modely udávají až 4krát větší trend změny teploty, než bylo pozorováno.

Mrkvičková (2007) zkoumala pozorování meteorologických prvků ve vztahu k přímo měřenému výparu z volné hladiny ve stanici Hlasivo za období padesáti let (1957–2007). V časových řadách výparu byla potvrzena existence rostoucího trendu s počátkem v roce 1983. Trend však nebyl nalezen v řadách teplot a relativní vlhkosti vzduchu. V řadách solární radiace nebyla přítomnost trendu šetřena vzhledem ke krátké časové řadě měření. V období, kdy je k dispozici i měření solární radiace, mají meteorologické prvky vliv na velikost výparu v následujícím pořadí: radiace, teplota a nakonec vlhkost.

Vzhledem k nejistotě, kterou jsou zatíženy předpovědi klimatických prvků a vzhledem k významným změnám odtoku, je lze předpokládat při změnách režimu teplot a úhrny srážek, jsme se pokusili kvantifikovat vliv relativní vlhkosti vzduchu v současném režimu i podle odhadu budoucího chování klimatu na průběh odtoku.

### Výběr povodí

Abychom postihli různé hydrologické podmínky, vybrali jsme deset povodí odlišných geograficky a klimaticky: (typ 1) horská povodí s vysokými úhrny srážek v horninách krystalinika, (typ 2) povodí v krystaliniku ve střední nadmořské výšce, (typ 3) povodí s mimořádně nízkými srážkovými úhrny, (typ 4) povodí ve vyšší střední nadmořské výšce s málo propustným půdním horizontem a rychlým odtokem (obr. 1). Plocha vybraných povodí se pohybuje mezi 150 a 330 km<sup>2</sup>. Kromě povodí vodoměrných stanic 1901 Rakovník a 2170 Holeděč jde o povodí toků neovlivněných či jen málo ovlivněných odběry vody a jinými antropogenními vlivy. Povodí stanice 1750 Trpisty se řadí také částečně do skupiny povodí typu 3, tedy s nízkými úhrny srážek. Roční srážkové úhrny jsou zde přibližně o 300 mm nižší, než by odpovídalo srovnáním nadmořské výšky s povodími v Beskydech a Podkrkonoší. Tato skutečnost je způsobena polohou povodí ve srážkovém stínu Krušných hor, který je dán orograficky návětrím Krušných hor ve směru převládajícího SZ proudění (tabulka 1).

### Model Bilan

Bilan byl vyvinut ve VÚV T.G.M. jako nedistribovaný model srážkovodkové bilance (Tallaksen and van Lanen, 2004; Kašpárek et al., 2006). Mimo jiné je používán při odhadech možných dopadů změny klimatu na vodní zdroje. Model zpracovává srážkové úhrny, teplotu, relativní vlhkost vzduchu a pozorovaný odtok v měsíčním kroku. Vodní bilanci model simuluje ve třech vertikálních rovinách: na povrchu půdy, v půdním profilu a ve zvodní podzemní vody. Podmínky odtoku v zimním a letním období a během tání sněhu jsou algoritmovány samostatně. Bilance vody na povrchu půdy je závislá na míře evapotranspirace, která je podmíněna teplotou a vlhkostí vzduchu za použití empirických hodnot evapotranspirace získaných pro různé klimatické oblasti (Rekomendacii, 1976). Přebytek vody po evapotranspiraci tvoří částečně povrchový odtok a částečně infiltruje do hlubší zóny, kde se dále dělí na podpovrchový odtok a dotaci zásoby podzemní vody. Parametry modelu se odvozují pomocí dvoufázové optimalizace, jejímž cílem je dosáhnout co možná nejtěsnější shody mezi celkovým odtokem pozorovaným a modelovaným. Parametry, které silně ovlivňují celkový odtok, jsou laděny v první fázi optimalizace, zatímco ve druhé fázi se hledají ty parametry, které řídí vazby mezi jednotlivými složkami odtoku, tzn. povrchovým, podpovrchovým a podzemním (základním) odtokem. Dále je možné použít také variantu, kdy se model optimalizuje kromě celkového odtoku i na základní odtok, popř. vydatnost pramene nebo kolísání hladiny ve vrtu, který danou zveřejňuje sleduje.

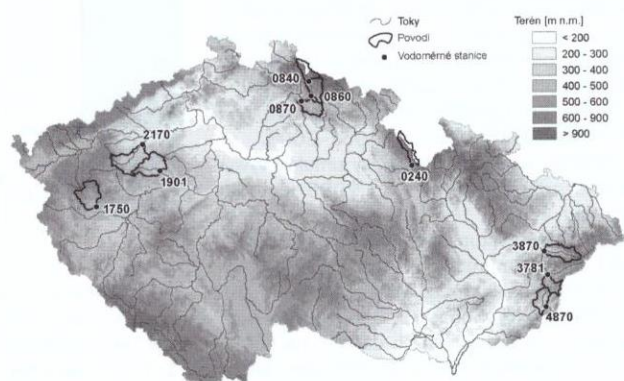
### Klimatické scénáře

Klimatické veličiny potřebné k běhu modelu jsme extrahovali z výsledků projektu PRUDENCE Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze. Projekt byl založen na simulacích vytvořených regionálním klimatickým modelem RCO vyvinutým v Rossby Centre ve Švédsku (Döschner et al., 2002). Regionální model RCO je založen na simulacích globálních cirkulačních modelů ECHAM4 (Roeckner et al., 1996) a OPGC (Ocean and IsoPYCnal coordinates) s tzv. teplým startem, kde je zakomponován vliv emisí skleníkových plynů již v průběhu 19. století (IPCC, 2000).

Klimatická data byla během projektu PRUDENCE připravena ve formě měsíčních časových řad absolutních změn teploty vzduchu a rosného bodu a relativních změn srážek (Kalvová, 2005). Prostorové rozlišení

Tabulka 1. Charakteristika povodí

Typ	Číslo stanice	Název stanice	Tok	Plocha povodí [km <sup>2</sup> ]	Nadm. výška [m n.m.]	Roční srážkový úhrn [mm]
1	0240	Kláštepec n. O.	Divoká Orlice	153	720	1189
	0840	Vilémov	Jizera	147	890	1534
	0860	Dolní Sytová	Jizera	322	755	1353
2	0870	Slaná	Oleška	169	474	872
	1750	Trpisty	Úterský p.	298	577	605
3	1901	Rakovník	Rakovnický p.	302	409	513
	2170	Holeděč	Blišanka	375	408	503
	3781	Ústí	Senice	135	550	914
4	3870	Krásno	Rožnovská Bečva	253	560	1 016
	4870	Popov	Vlára	170	443	836



Obr. 1. Poloha vybraných povodí v ČR

regionálního modelu bylo přibližně 50 × 50 km. To znamená, že plocha ČR byla pokryta 50 uzlovými body.

V této práci jsme uvažovali dva scénáře emisí skleníkových plynů, které odrážejí různé alternativy socioekonomického vývoje společnosti: (a) scénář SRES A2 předpokládá stálý růst emisí, zatímco (b) scénář SRES B2 je založen na předpokladu snížení emisí během tohoto století (Nakicenovic et al., 2000). Všechny simulace podle scénářů předpokládaného vývoje klimatu byly provedeny pro období 2071–2100 s tím, že model Bilan byl kalibrován na období 1961–2006.

### Vstupní data

Model Bilan zpracovává měsíční úhrny srážek na povodí, průměrnou měsíční teplotu a relativní vlhkost vzduchu. Tato vstupní data jsou nezbytná pro stanovení složek vodní bilance, procesu evapotranspirace a pohybu vody v půdním profilu. Průměrný měsíční pozorovaný odtok ve vodoměrné stanici je v modelu používán ke stanovení kritéria shody měřeného a simulovaného odtoku. Veškerá použitá data jsou založena na měření ve staniční síti Českého hydrometeorologického ústavu.

Klimatická data pro jednotlivá povodí byla spočtena metodou OroKriging (Šercl a Lett, 2002; Šercl, 2008). Metoda je založena na předpokladu lineární závislosti mezi měřenou klimatickou veličinou a nadmořskou výškou terénu. Nejdříve se v každé srážkoměrné (klimatické) stanici vyhodnotí parametry lineární regrese mezi srážkovými úhrny (teplotou, vlhkostí vzduchu) a nadmořskou výškou v definovaném okolí stanice, stejně jako koeficienty determinace a odchylky mezi úhrny spočtenými regresí a měřenými hodnotami. Tyto údaje, stejně jako vlastní hodnoty srážek, resp. teplot či vlhkosti, jsou poté interpolovány v ploše v prostředí ArcGis metodou IDW nebo TOPO. Rastr dané klimatické veličiny je dán kombinací hodnot poskytnutých lineární regrese a těch interpolovaných, přičemž koeficienty determinace poskytují váhy, podle nichž se upřednostňuje jedna či druhá metoda. Výsledný rastr je vždy korigován odchylkami mezi spočtenými a měřenými hodnotami, které jsou také interpolovány v ploše. Tímto způsobem je eliminován rozdíl mezi měřeními a počítanými hodnotami ve stanicích.

### Metodika

Vzhledem k tomu, že scénáře klimatické změny předpokládají v blízké budoucnosti na území ČR především v letních měsících pokles vlhkosti vzduchu, rozhodli jsme se nejdříve vyšetřit, zda jsou v dosud pozorovaných datech v období 1961–2006 již patrné známky takového trendu. Existence trendu byla šetřena pomocí neparametrického Mann-Kendallova testu a Senova testu.

Mann-Kendallův test je často používán pro analýzu trendu v datových sadách environmentálních systémů (Kendall, 1975; Libiseller and



Grimvall, 2002). Jde o test neparametrický, který nepředpokládá normalitu reziduí a není citlivý vůči tzv. outlierům a nelineárním trendům nízkého stupně. Test lze použít v případech, kdy je v datových sadách předpokládána spojitá monotónní rostoucí nebo klesající funkce času a rezidua rozložena s nulovou střední hodnotou. Jinými slovy za předpokladu, že rozptyl rozložení je v čase konstantní (stacionarita 2. stupně).

Pro zpracování měsíčních řad vlhkosti byla použita sezonní varianta Mann-Kendalova testu (Hirsch and Slack, 1984; Gilbert, 1987). V tomto testu jsou jednotlivé měsíce šetřeny zvlášť. Statistika testu je počítána jako suma statistik jednotlivých měsíců a celkový rozptyl rovněž jako suma měsíčních odhadů rozptylů.

Velikost trendu (velikost změny v čase) byla počítána podle Sena (1968). Směrnice trendu je tak mediánem směrnic všech párových srovnání s každým párovým rozdílem děleným počtem let mezi jednotlivými pozorováními.

Poté byl pro každé povodí kalibrován srážkoodtokový model Bilan v období 1961–2006.

Nakonec jsme použili výsledky simulací vývoje klimatu projektované k roku 2085 k modifikaci řad srážek, teplot a vlhkostí vzduchu použitých jako vstup do modelu Bilan v období 1961–2006, a tímto způsobem byly vytvořeny hypotetické budoucí řady pro období 2071–2100, přičemž jsme obdrželi několik variant: (0) 0 je simulací odtoku v období 1961–2006 založenou na pozorovaných datech, na něž byl model také kalibrován, (1) A2 představuje budoucí projekci pro období 2071–2100, kde srážky, teplota a vlhkost byly nastaveny podle scénáře A2, (2) A2H0 se liší od předcházející varianty tím, že vlhkost byla ponechána nezměněna podle scénáře, tedy zůstala shodná s hodnotami měření. Dále (3) varianta B2 pracuje s klimatickými prvky modifikovanými podle scénáře B2 a (4) varianta B2H0 je shodná s předešlou variantou s tím rozdílem, že využívá původní naměřenou vlhkost vzduchu. Poté proběhly simulace odtoku ve variantách 1 až 4 a bylo možné vyhodnotit, nakolik by mohla vlhkost vzduchu ovlivnit složky odtoku v podmínkách klimatické změny.

## Výsledky

Směrnice trendu v časových řadách relativní vlhkosti vzduchu v období 1961–2006 je uváděna v tabulce 2 s vyznačením hladin spolehlivosti  $< 0,2$  a  $< 0,05$ . V těchto řadách nebyl nalezen obecně převládající trend. Dokonce i v ročním měřítku byly nalezeny jak pozitivní, tak i negativní statisticky významné trendy. Je zřejmé, že obdobné trendy se objevují v podobných regionech ČR, tzn. že výskyt trendu je podmíněn lokálně. Zatímco některá povodí jeví slabou tendenci k poklesu vlhkosti, povodí stanic 1750 a 3781 mají opačnou tendenci. Povodí 1750 se liší zřetelně a růst vlhkosti je zde statisticky významný v sedmi po sobě jdoucích měsících. Je tedy pravděpodobné, že údaje klimatické stanice Konstantinovy Lázně nejsou zcela homogenní.

V jednotlivých měsících je situace také zajímavá: duben, srpen a předešlý únor a květen jeví tendenci k poklesu vlhkosti nejzřetelněji (obr. 2). Jenže simulace vývoje klimatu podle scénářů A2 a B2 v únoru, dubnu ani květnu žádný pokles neukazují. V srpnu je střední změna vlhkosti v pozorovaných datech uvažovaná pro 100leté období pouze -8 %, což je mnohem méně než předpokládají scénáře vývoje klimatu. Obecně scénáře udávají nárůst vlhkosti v březnu a dubnu v jednotlivých sledovaných

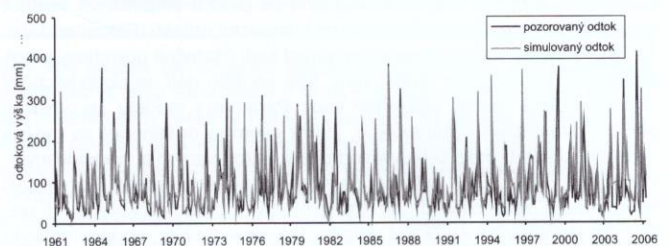
**Tabulka 2.** Směrnice trendu v průměrných měsíčních řadách relativní vlhkosti vzduchu v období 1961–2006, průměrná roční směrnice trendu a absolutní změna vlhkosti během 45 let šetřeného období na hladině spolehlivosti 80 % (tenký) a 95 % (silný rámeček)

	0240	0840	0860	0870	1750	1901	2170	3781	3870	4870
<b>I</b>	0,02	-0,07	-0,06	-0,03	0,04	-0,05	0,00	0,08	0,02	0,04
<b>II</b>	-0,01	-0,11	-0,11	-0,11	0,01	-0,11	-0,06	0,08	-0,02	0,03
<b>III</b>	0,04	-0,02	-0,02	-0,03	0,05	-0,07	-0,04	0,07	0,02	0,04
<b>IV</b>	-0,06	-0,08	-0,05	-0,05	-0,02	-0,09	-0,06	0,04	-0,03	0,04
<b>V</b>	-0,09	-0,13	-0,10	-0,11	0,00	-0,09	-0,09	-0,09	-0,10	-0,08
<b>VI</b>	0,02	0,00	0,01	-0,01	0,07	-0,06	-0,08	-0,05	-0,06	-0,05
<b>VII</b>	0,02	0,02	0,03	-0,03	0,14	-0,02	0,00	0,02	-0,09	-0,02
<b>VIII</b>	-0,08	-0,07	-0,04	-0,08	0,07	-0,08	-0,07	0,02	-0,10	0,03
<b>IX</b>	0,03	0,01	0,05	0,01	0,08	-0,04	-0,02	0,03	-0,02	0,03
<b>X</b>	0,09	0,04	0,08	0,08	0,14	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
<b>XI</b>	0,06	-0,05	-0,04	0,02	0,15	0,04	0,08	0,02	0,02	0,00
<b>XII</b>	0,06	-0,07	-0,08	-0,01	0,09	0,02	0,07	0,04	0,03	0,01
<b>A</b>	0,01	-0,04	-0,03	-0,03	0,07	-0,05	-0,02	0,02	-0,03	0,01
<b>1961–2006 [%]</b>	0,39	-2,02	-1,25	-1,38	3,07	-2,08	-0,98	1,01	-1,21	0,23

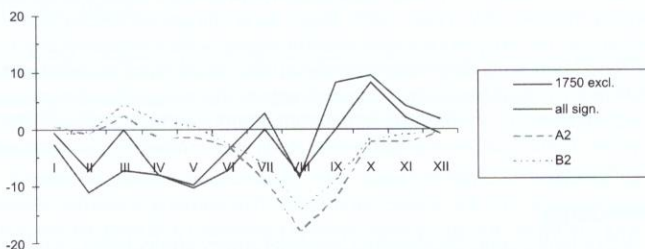
povodích mezi 2 a 5 %, zatímco v letních měsících předpokládají pokles s minimem v srpnu v rozmezí -13 % (povodí typu 1, scen. B2) až -22 % (typ 4, scen. A2). To by však znamenalo příchod aridního klimatu do střední Evropy. V pozorovaných datech byla poněkud překvapivě nalezena pozitivní tendence vlhkosti vzduchu v říjnu. Je namístě poznamenat, že relativní vlhkost vzduchu je prvkem, který je obtížně měřitelný, resp. je odvozován z jiných prvků a je prostorově velmi variabilní. V této studii jsme se však zabývali průměrnými měsíčními hodnotami vlhkosti v rastroch s rozlišením 1 km, a tak dochází k eliminaci lokálních odchylek a detekce trendu by měla být platná.

Poté byl pro jednotlivá povodí kalibrován srážkoodtokový model Bilan v období 1961–2006. Obrázek 3 ukazuje příklad shody pozorovaného a simulovaného odtoku, konkrétně ve stanici 0840 Vilémov na Jizeře. Sezonní chod složek odtoku ve stejné stanici je demonstrován na obr. 4.

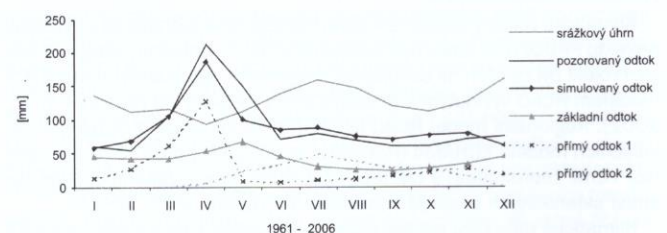
Dále byly vypracovány čtyři varianty simulací odtoku ve všech povodích kombinací vstupů klimatických veličin, jak vyplývají z předpovědi chování klimatu ve scénářích A2 a B2 s tím, že buď byly použity všechny prvky podle scénářů, nebo pouze srážky a teplota, zatímco vlhkost byla ponechána na úrovni skutečně pozorovaných hodnot. Tímto způsobem jsme se rozhodli zkoumat, zda a jakým způsobem by se popřípadě lišily odtoky z povodí, pokud by selhaly předpovědi regionálních modelů klimatu a k předpokládané změně vlhkosti vzduchu by nedošlo.



**Obr. 3.** Srovnání pozorovaného a simulovaného odtoku ve stanici 0840 Vilémov na Jizeře



**Obr. 2.** Srovnání změny relativní vlhkosti vzduchu (%), jak je předpokládána v klimatických scénářích A2 a B2 pro časový horizont roku 2085 se změnou vlhkosti založenou na průměrném trendu v pozorovaných hodnotách za předpokladu jeho pokračování až do roku 2085 (do výpočtu byly zahrnuty pouze signifikantní hodnoty trendu – tenká čára); graf uvádí i variantu (silná čára) s vyloučením stanice 1750 vzhledem k tomu, že v tomto povodí se hodnoty trendu silně liší od ostatních povodí



**Obr. 4.** Roční chod bilančních prvků ve stanici 0840 Vilémov na Jizeře simulovaný modelem Bilan



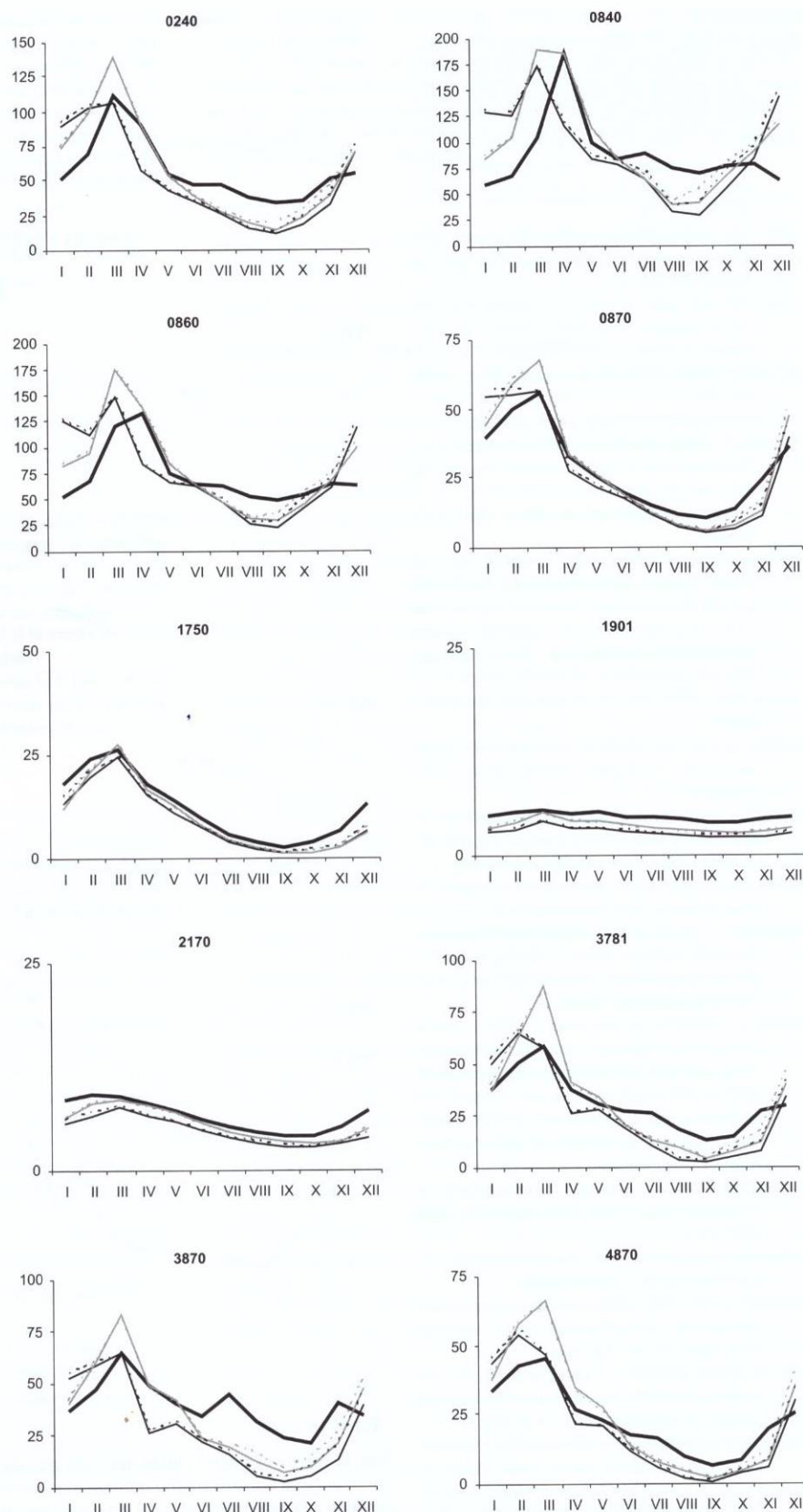
Obvykle se předpokládá, že vlivem klimatické změny by mohlo dojít k poměrně významné transformaci sezonního chodu odtoku (Novický, Kašpárek, and Uhlík, 2007). Tento předpoklad potvrzují i simulace provedené v rámci této práce (obr. 5). Mělo by dojít ke zvýšení zvláště zimních odtoků ve srážkově bohatších oblastech a jarní maxima by měla přicházet dříve, a to především ve vyšších nadmořských výškách. Naopak během léta, podzimu a podle scénáře A2 i během pozdního jara by mělo dojít k poklesu odtoku. Je možné konstatovat, že čím méně srážek spadne na povodí v současnosti, tím větší pokles odtoku během celého roku lze předpokládat v blízké budoucnosti. Například v povodích typu 3 s mimořádně nízkými srážkovými úhrny (1901 Rakovnický p., 2170 Blšanka) by mělo dojít během celého hydrologického roku pouze k poklesu odtoku. Pro všechna šetřená povodí platí, že minimální odtok by mohl dosáhnout pouze poloviny minim současných a v povodích typu 4 v oblastech beskydského flyše ještě mnohem méně.

## Závěr

Porovnání simulací odtoku ve variantách s použitím predikovaných a pozorovaných vlhkostí vzduchu nepotvrdilo podstatnou změnu odtoku, neboť velikost odtoku je především určována úhrnem srážek (hledisko dostupnosti vody pro výpar a transportní procesy) a teplotou vzduchu (intenzita evapotranspirace). Vliv vlhkosti vzduchu, který se rovněž projevuje intenzitou výparu, je vedlejší (obr. 5). K větším rozdílům dochází pouze během suchých období podzimu a následného období rané zimy. Tato skutečnost je lépe zřetelná na relativní škále (relativní vůči pozorovanému odtoku) na obr. 6.

Vzhledem k vývoji dotace a zásob podzemní vody dochází v tomto období k následujícímu procesu: v případě, že model zpracovává skutečně pozorované hodnoty vlhkosti, které jsou na podzim vyšší než ty predikované, potom obvykle s počátkem září a během tohoto měsíce, kdy už bývá při poklesu evapotranspirace dostatek vody k infiltraci do půdního profilu, začne docházet nejprve k naplnění zásoby půdní vody a po překročení plné polní kapacity začne určitý podíl přebytečné vody infiltrovat do hlubší zóny a doplňovat zásoby vody podzemní. Zvýšená zásoba podzemní vody znamená zvýšení základního odtoku, stejně jako vyšší zásoba půdní vody se projevuje zvýšením podpoверхového odtoku. Zásoby podzemní i půdní vody zůstávají zvýšené i během zimy a dále přispívají k navýšení odtoku. To znamená, že nedojde-li k naplnění předpovědí vývoje klimatu podle scénářů A2 a B2 co se týče vlhkosti vzduchu, mohly by být podzimní poklesy odtoku redukovány již slabě vlhčím klimatem – změna vlhkosti vzduchu udávaná v předpovědích pro období podzimu představuje pouze 2 až 3 % (během září i více než 10 %). Jak ale ukazuje model, pravděpodobně by tyto rozdíly ve vlhkosti vzduchu ovlivňovaly celkovou evapotranspiraci v podzimních měsících přibližně v rozmezí 10 až 30 % relativně vůči evapotranspiraci vypočtené pro období 1961–2006. Rozdíly v evapotranspiraci by podle simulací byly nejvyšší v povodích typu 3, kde se již v současnosti projevuje nedostatek zásoby půdní vody dostupné pro výpar a transpiraci rostlin a bude tomu tak i v případě poklesu vlhkosti vzduchu předpokládaného podle scénářů A2 a B2. To je také důvod, proč nejmenší rozdíly v odtoku je možné na obr. 6 pozorovat právě v povodí 3. typu, která jsou z hlediska tvorby zásob a jejich následného uvolňování formou podzemního odtoku zranitelná již nyní.

Zajímavé je, že zůstane-li v případě scénáře B2 vlhkost na úrovni pozorovaných hodnot (varianta B2H0), může v jarních měsících dojít i ke snížení odtoku vůči plně variantě B2. Tato skutečnost je způsobena zvýšením vlhkosti především ve scénáři B2 a ještě zesílena v povodích typu 3, kde jsou nízké úhrny srážek.



**Obr. 5.** Sezonní odtok [mm] v deseti vodoměrných stanicích pro pět variant: var. 0 – odtok simulovaný v období 1961–2006 (silná plná čára), A2 – odtok podle scénáře A2 (plná černá), A2H0 – odtok podle scénáře A2, ale s pozorovanou vlhkostí vzduchu (čárkovaná černá), B2 – odtok podle scénáře B2 (plná šedá), B2H0 – odtok podle scénáře B2, ale s pozorovanou vlhkostí vzduchu (čárkovaná šedá)

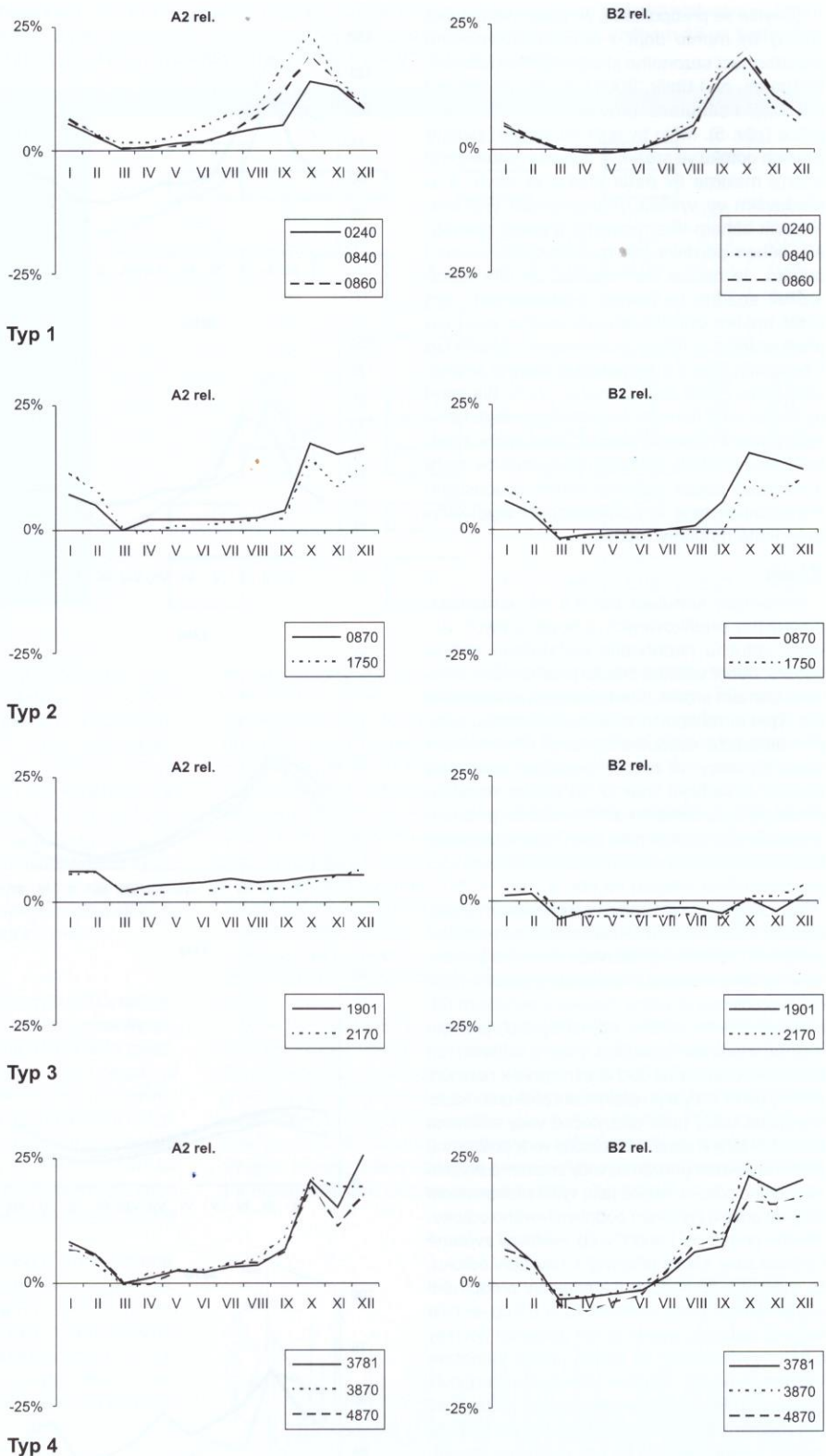
## Poděkování

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 ověření experimentálním výzkumem zahrnuté do oddílu A (hydrologie).



## Literatura

- Döscher, R., Willén, U., Jones, C., Rutgersson, A., Meier, HEM., Hansson, U., and Graham LP. (2002) The development of the coupled regional ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Env. Res.*, 7, 183–192.
- Douglass, DH., Christy, JR., Pearson, BJ., and Singer, SF. (2008) A comparison of tropical temperature trends with model prediction. *Int. Journal of Climatology*, 28, 1693–1701.
- Gilbert, RO. (1987) Statistical methods for environmental pollution monitoring. New York : Van Nostrand Rienhold Co. Inc.
- Hirsch, RM. and Slack, JR. (1984) A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20, 727–732.
- IPCC (2000) Special Report on Emissions Scenarios – SRES. Available from URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>. Cited 2008–22–4.
- Kalvová, J. (2005) Vytvoření klimatických scénářů pro ČR (Preparation of climate scenarios for the CR). *Research and protection of hydrosphere, Part A. Hydrology. Research report*. Praha : VÚV T.G.M., 22–46.
- Kašpárek, L., et al. (2006) Dopad klimatické změny na Českou republiku podle regionálních klimatických scénářů (Climate change impact in the Czech Republic by using regional climate scenarios) *Research and protection of hydrosphere, Part A. Hydrology. Research report*. Praha : VÚV T.G.M., 90–105.
- Kendall, MG. (1975) Rank correlation methods. London : Griffin.
- Koutsoyannis, D., et al. (2008) On the credibility of climate predictions. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 671–684.
- Libiseller, C. and Grimvall, A. (2002) Performance of partial Mann Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics*, 13, 71–84.
- Mrvčičková, M. (2007) Vyhodnocení měření na výparoměrné stanici Hlasivo. *Vodní hospodářství*, 2007, 7.
- Nakicenovic, N., et al. (2000) Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Novický, O., Kašpárek, L., and Uhlík, J. (2007) Possible impacts of climate change on groundwater resources and groundwater flow in well developed water bearing aquifers. *Proc. of the Third International Conference on Climate and Water (Helsinki, 3–6 September 2007, 358–364, ed. Heinonen, M. Finnish Environment Institute. Helsinki.*
- PCMDI (2005). Program for Climate Model Diagnosis and Comparison. <http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc>. Cited 2005–10–5.
- Rekomendací po rasčotu isparenja s poverchnosti suši. (1976) Leningrad : Gidrometeoizdat.
- Roeckner, E. et al. (1996) ENSO variability and atmospheric response in a global coupled atmosphere-ocean GCM. *Clim. Dyn.*, 12, 737–754.
- Sen, PK. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379–1389.
- Šercl, P. (2008) AGHydroInterpolace (Interpolating Procedures for ArcGIS). *Uživatelská příručka*. Praha : ČHMÚ.
- Šercl, P. a Lett, P. (2002) Výpočet rastu srážek v prostředí GIS. (GIS based computing of precipitation) (uživatelská příručka ČHMÚ). Praha : ČHMÚ.
- Tallaksen, LM. and van Lanen, HAJ. (2004) Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam : Elsevier.



**Obr. 6.** Relativní změna odtoku pro čtyři typy povodí v podmínkách měnícího se klimatu; jde o rozdíl (relativní vůči pozorovanému odtoku) mezi variantou tvorby odtoku s vlhkostí vzduchu neovlivněnou změnou klimatu a variantou s vlhkostí predikovanou regionálním klimatickým modelem (A2 rel. = (A2H0 – A2) / Q0, B2 rel. = (B2H0 – B2) / Q0); Q0 je odtok simulovaný v období 1961–2006 založený na pozorovaných klimatických datech (var. 0)

Ing. Radek Vlnas  
VÚV T. G. M., v.v.i., Praha  
e-mail: radek.vlnas@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

## Key words

air humidity, runoff model sensitivity, trend detection

*The impact of relative air humidity on runoff under the climate change conditions (Vlnas, R.)*

The submitted study is concerned with the assessment of the impact of relative air humidity on the runoff process under the conditions of climate change. To this purpose 10 catchments with four different runoff regimes have been selected. We observed the existence of trend in time series of relative air humidity within the catchments in the period 1961–2006 using non-parametric Mann-Kendall test. No



prevailing trend has been found. The tendency of humidity to rise or to decline varies both in the season and locality. Then, the Bilan water balance model has been calibrated and run for the period 1961–2006. Climate change scenarios A2 and B2, derived from simulations by regional climate models, have been reflected in meteorological time-series for a given catchment and subsequently used for simulations of water cycle components using the Bilan model. To simulate runoff two variants of scenarios have been carried out with relative air humidity

both unaffected and affected by climate change. The comparison of variants with different air humidity shows no significant change in total runoff as it is mainly driven by temperature and precipitation and the effect of air humidity is minor. However, within the autumn dry period and the following period of early winter when groundwater storage is usually supplied, the difference in minimum runoff is relatively distinct and might become considerable.

## O MOŽNOSTECH REKONSTRUKCE VYČÍSLENÍ ŘAD PRŮTOKŮ

Ladislav Kašpárek

### Klíčová slova

vyčíslení průtoků, řady průtoků, měrná křivka průtoků, vodoměrná stanice

### Souhrn

V článku je stručně popsán postup, jakým jsou na základě průběžného pozorování vodních stavů a občasného měření průtoků prostřednictvím měrných křivek průtoků vyčíslovány řady průměrných denních průtoků. Je poukázáno na problémy, které při tomto postupu nastávají následkem proměnlivosti hydraulických podmínek ve vodoměrné stanici, omezeného počtu hydrometrických měření a potřeby průtoky vyčíslovat aktuálně, v měsíčním či ročním intervalu.

Je navržen postup pro identifikaci úseků historických řad průměrných denních průtoků, jejichž přesnost je z uvedených příčin snížena, a postup rekonstrukce vyčíslení historických průtokových řad.

### Úvod

Řady průměrných denních průtoků ve vodoměrných stanicích jsou základem nejen pro zpracování většiny charakteristik hydrologického režimu, například m-denních průtoků, ale také podkladem pro řešení řady úloh z oblasti vodního hospodářství i ochrany životního prostředí. Míra jejich spolehlivosti má dalekosáhlé ekonomické důsledky, zejména pokud jsou použity pro posuzování zabezpečení odběrů vody, řešení vodních nádrží a stanovení povoleného ředění odpadních vod. Obdobný význam mají i při určování minimálních průtoků, které mají zajistit přežití vodních ekosystémů v obdobích hydrologického sucha.

Zkušenosti s užíváním průtokových řad prokázaly, že v historických řadách se v některých případech vyskytují úseky, které je vhodné ověřit, popř. provést rekonstrukci vyčíslení průtoků. Postup ověření a rekonstrukce vyčíslení průtokových řad popsán v následujícím textu naznačuje, jak lze při řešení uvedených úloh postupovat. Příklady, které ilustrují popisovaný postup, byly získány při ověření a rekonstrukci řady průměrných denních průtoků Rakovnického potoka ve vodoměrné stanici Rakovník. Rakovnický potok je levostranným přítokem Berounky, v profilu vodoměrné stanice má jeho povodí plochu cca 300 km<sup>2</sup>. Odtok z povodí má dlouhodobě silně klesající tendenci, a věrohodnost průtokové řady je zde proto zejména z hlediska možnosti posouzení dopadu změn klimatu velmi podstatná.

### Běžný postup vyhodnocování průměrných denních průtoků

Průměrné denní průtoky jsou obvykle vyhodnocovány na základě pozorování vodních stavů a měrných křivek průtoků postupem, který popsal Dub (1957). V minulosti byly vodní stavy ve většině stanic zapisovány spojitě limnigrafem, v některých stanicích byly pouze jednou nebo třikrát denně odečítány pozorovatelem. V současné době jsou vodní stavy v několikaminutovém intervalu zaznamenávány digitálně přímo na paměťová média.

Měrné křivky průtoků jsou konstruovány na základě hydrometrických měření v profilech vodoměrných stanic, někdy i s využitím jednoduchých hydraulických výpočtů na základě zaměření příčného a podélného profilu vodního toku ve vodoměrné stanici. Poprvé po povodni z roku 2002 byly ve větším počtu měrné křivky určovány pomocí hydraulických matematických modelů proudění v úseku toku v okolí vodoměrné stanice.

V minulosti byly měrné křivky prokládány do výsledků hydrometrických měření ve formě souřadnic (průtok, vodní stav) graficky, v posledních desetiletích jsou používány pro jejich vyjádření vhodné analytické funkce.

Od sedmdesátých let dvacátého století byly pro ověření, popř. úpravy vyčíslení průměrných denních průtoků v Českém hydrometeorologickém ústavu zaváděny postupy využívající bilanci průtoků v říční síti. Jsou efektivní při posuzování skladby průtoků na tocích řádově stejného průtoků, nepomohou však příliš při posuzování přítoků z menších povodí do podstatně většího hlavního toku. Jejich účinnost snižuje absence

údajů o užívání vod (manipulace nádrží, odběry a vypouštění vod), které nejsou dostupné v denním intervalu (evidence je v měsíčním kroku). Ve formě měsíčních řad jsou tato data obvykle k dispozici až v době, kdy je vyčíslení průtoků ukončeno.

### Problematika vyhodnocování průtoků

Hlavní příčiny, které ztěžují možnosti spolehlivého vyčíslení průtoků, jsou:

- absence nebo malá četnost hydrometrických měření, zejména za extrémních odtokových situací (povodně a období minimálních průtoků),
- proměnlivost morfologických a následně i hydraulických poměrů v toku u vodoměrné stanice,
- potřeba vyhodnocovat průtoky aktuálně v pravidelných intervalech – měsíčním a ročním.

Zvláštním případem jsou vodoměrné stanice na úsecích toků zarůstajících vodní vegetací. Výška hladiny zarostlého toku může být i o jeden řád vyšší než bez vegetace, takže vodoměrná pozorování jsou zde pro výpočet průtoků většinou nepoužitelná.

Na četnosti hydrometrických měření se v posledních letech příznivě projevuje zavedení moderních přístrojů ADCP. Podstatně se zvýšil počet průtoků zaměřených za povodní, z minulosti je jich však velmi málo. Příznivé je, že kulminační průtoky současných i historických povodní lze mnohdy odhadnout i zpětně podle informací o morfologii toku a výškách hladiny.

V případě extrémních minimálních průtoků taková možnost prakticky neexistuje. Pokud nejsou změřeny, je jejich stanovení v případě stanic nevybavených měrným přelivem zatíženo chybou srovnatelnou s jejich velikostí. To platí i pro profily, ve kterých je stabilizován příčný profil, protože sklon hladiny je ovlivňován změnami morfologie toku u podstatně delším úseku toku (zejména ukládáním splavenin nebo erozí dna či břehů).

Podstatný problém vyhodnocování průtoků je způsoben vzájemným působením všech tří uvedených příčin. Změnu hydraulických poměrů ve vodoměrném profilu je možné rozpoznat až na základě výsledku prvního hydrometrického měření, provedeného po této změně. Vzhledem k obvykle značnému intervalu mezi daty následujících hydrometrických měření je doba, kdy změna mohla nastat, v příznivějším případě několik málo měsíců, v minulosti však mohlo jít i o několik let.

Po prvním měření, které ukazuje na změnu měrné křivky, není jisté, zda nemůže jít o chybu měření, nebo jen nahodilou příčinu a krátkodobou dočasnou změnu hydraulických poměrů ve vodoměrné stanici. V této situaci je třeba provést další hydrometrická měření (nejlépe při různých vodních stavech), což se však většinou z různých důvodů nepodaří. Při vyčíslení průtoků v měsíčním i ročním intervalu je pak obvykle použita původní měrná křivka průtoků. Pokud další hydrometrická měření v dalších měsících či roce poskytnou dostatek informací pro změnu měrné křivky průtoků, je sestrojena nová změněná křivka. Zpětně však stanovení doby, kdy změna nastala, ani oprava již uzavřeného vyčíslení z minulého ročního období není provedena. Obdobně může dojít k opačné chybě, kdy měrná křivka průtoků je změněna na základě nedostatečného počtu měření. Později se ukáže, že nebyla správná, ale vyčíslené průtoky také zpětně nejsou opraveny. Výsledkem popsáných případů je, že se v průtokových řadách vytvoří úseky, ve kterých vyčíslené průměrné denní průtoky neodpovídají výsledkům hydrometrických měření v příslušných dnech a přesnost vyčíslených průtoků je zmenšena.

### Možnosti ověření a rekonstrukce průtokových řad

Při dodatečné rekonstrukci vyčíslení průtoků je výhodné, že na rozdíl od průběžného vyhodnocování máme k dispozici výsledky hydrometrických měření z celého posuzovaného období. Máme tedy více informací pro vymezení období, ve kterých lze s přijatelnou přesností vyhodnotit průtoky podle jedné měrné křivky průtoků i všechna hydrometrická měření z takového období. Podstatné také je, že lze poznatky o měrné křivce průtoků získané například hydraulickým výpočtem, hydraulickým modelem nebo zaměřené extrémně velké průtoky využít pro období před jejich získáním.

Pro ověření vyčíslení průtoků a jeho rekonstrukci potřebujeme tato data:

- řadu průměrných denních vodních stavů,
- řadu průměrných denních průtoků,
- soubor průtoků vypočtených z hydrometrických měření a jim odpovídajících vodních stavů.



Výhodné je, když je k dispozici i soubor archivovaných měrných křivek, s uvedením období jejich platnosti. V některých úsecích řady poslouží pro posouzení věrohodnosti nebo i pro doplnění chybějících nebo chybných dat průtoků ze vhodné vybraného analogonu, tj. geograficky blízkého a hydrologicky podobného povodí.

První úlohou, kterou řešíme při ověření správnosti vyčíslení průtoků, je rozčlenění posuzované řady na úseky, ve kterých má vztah vodních stavů a vyčíslených průtoků obdobný charakter. Zásadní poznatky lze zjistit z grafu, ve kterém jsou společně zobrazeny průměrné denní průtoky a vhodně lineárně transformované vodní stavy (obr. 1). Podstatně zřetelněji se změny vztahů mezi vodními stavy a průtoky (změny výšky vodočtu, změny vyčíslení průtoků) projeví na grafu, ve kterém je zobrazen rozdíl směrodatných proměnných průtoků a vodních stavů, kde

směrodatná proměnná = (hodnota proměnné – průměr z celého období) / směrodatná odchylka.

Příklad takového grafu je na obr. 2. Při dalším postupu ověření posuzujeme rozčleněné úseky odděleně.

Pro posouzení míry shody průměrných denních průtoků s výsledky hydrometrických měření (ze stejných období) je vhodné vytvořit dva typy grafů.

První typ grafu zobrazuje časový průběh průměrných denních průtoků společně s průtoky změřenými při hydrometrickém měření. Na tomto grafu lze posoudit, zda se vyčíslené průtoky v některém úseku neodchylují soustavně od průtoků změřených (viz příklad na obr. 3).

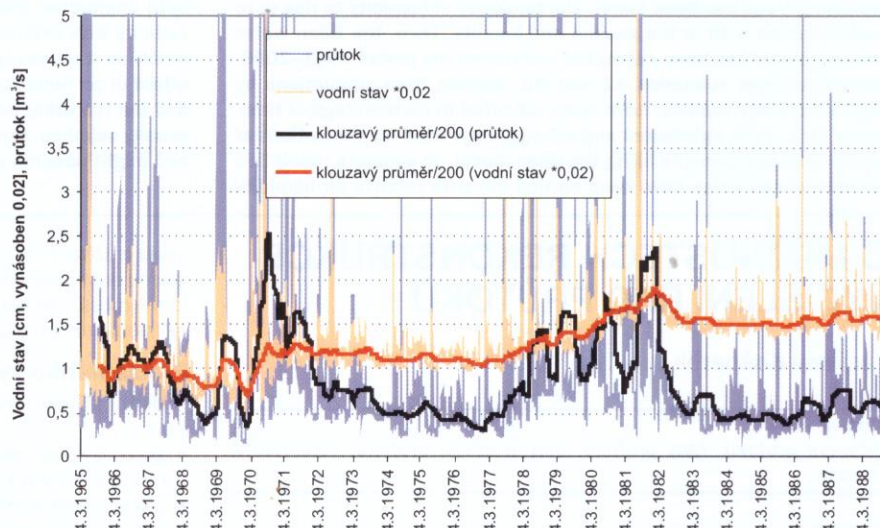
V druhém typu grafů jsou vyneseny body o souřadnicích: průměrný denní vodní stav, průměrný denní průtok – vodní stav odečtený při hydrometrickém měření, změřený průtok. Znázorněna je zde také měrná křivka průtoků platná podle historických údajů v zobrazeném období.

Tento typ grafu ukazuje, zda pro vyčíslení byla skutečně použita tato křivka, popř. v jakém rozmezí se vyčíslené průtoky od použité měrné křivky odchylují. Z porovnání s výsledky hydrometrických měření je pak vidět, do jaké míry jim použitá měrná křivka odpovídá. Příklad takového grafu je na obr. 4.

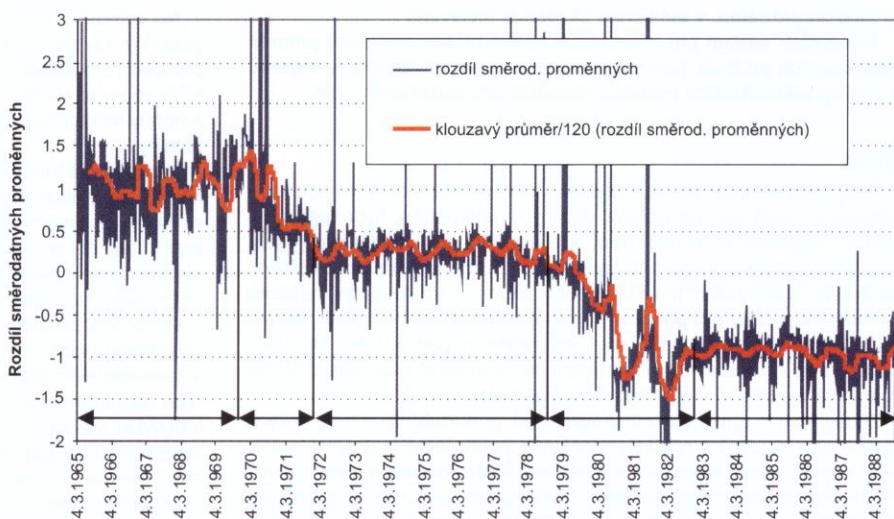
Součástí rekonstrukce vyčíslení průtoků může být v některých případech také ověření, zda se významně neliší průměrné vodní stavy ve dnech, kdy byl proveden odečet vodního stavu při hydrometrickém měření, a případná následující úprava vodních stavů použitých pro vyčíslení průtoků v přílehlém období. Tento případ odpovídá tomu, že měření vodního stavu limnigrafem nebo pozorovatelem bylo chybné a nebylo podle údajů o vodním stavu zjištěných při hydrometrických měřeních opraveno. Tento postup lze použít jen v případě, že rozdíly vodních stavů nelze přisoudit rychlé změně této veličiny ve dni měření, zejména na vzestupu průtokové vlny.

Základem pro rekonstrukci řady průměrných denních průtoků je soubor výsledků hydrometrických měření průtoků a z něj vycházející sestavení měrných křivek průtoků. Tato úloha má dvě části.

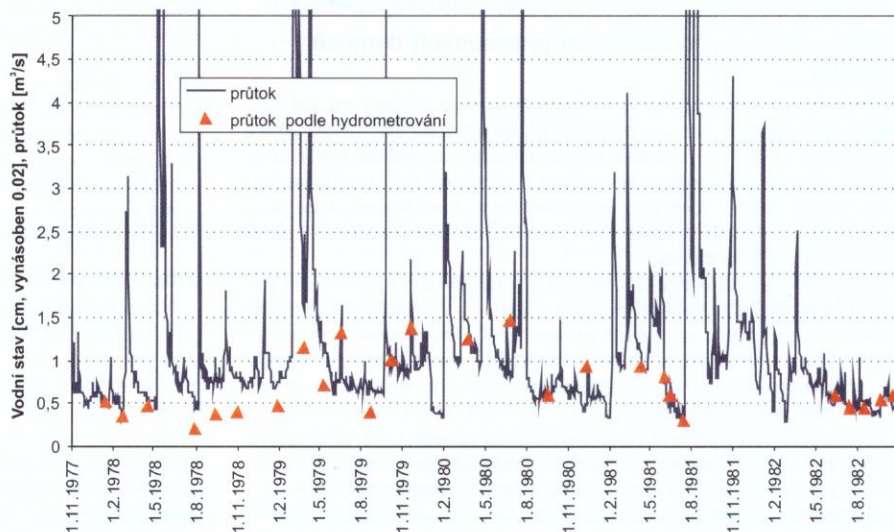
Nejprve je třeba nalézt hranice období, ve kterém výsledky hydrometrických měření ukazují, že měrný profil byl relativně stálý, takže vztah mezi vodním stavem a průtokem lze s přijatelnou nepřesností považovat za funkční. Ukázka, jak se na výsledcích hydrometrických měření projevují změny hydraulických podmínek ve vodoměrné stanici, je na obr. 5. Základem pro hledání období, pro které odvodíme jednu



**Obr. 1.** Průměrné denní průtoky a pro zobrazení vynásobením konstantou 0,02 lineárně transformované vodní stavy; v úsecích 1970–1971 a 1978–1982 se průběh kolísání průtoků jeví neúměrný kolísání vodních stavů



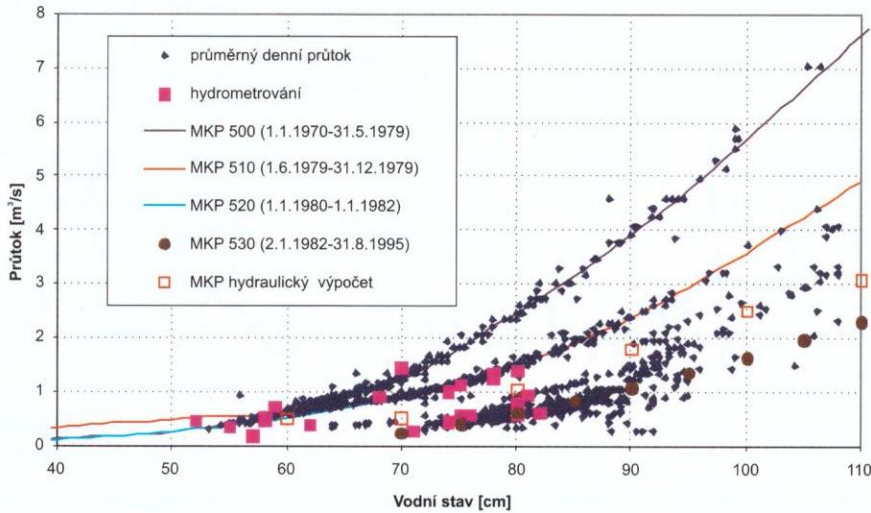
**Obr. 2.** Rozdíl směrodatných proměnných průtoků a vodních stavů, použitý pro rozčlenění na úseky řady s obdobným charakterem vztahu vodních stavů a průtoků (ustálený nebo vykazující trend); rozdělení na tyto úseky je použito při zpracování dalších grafů



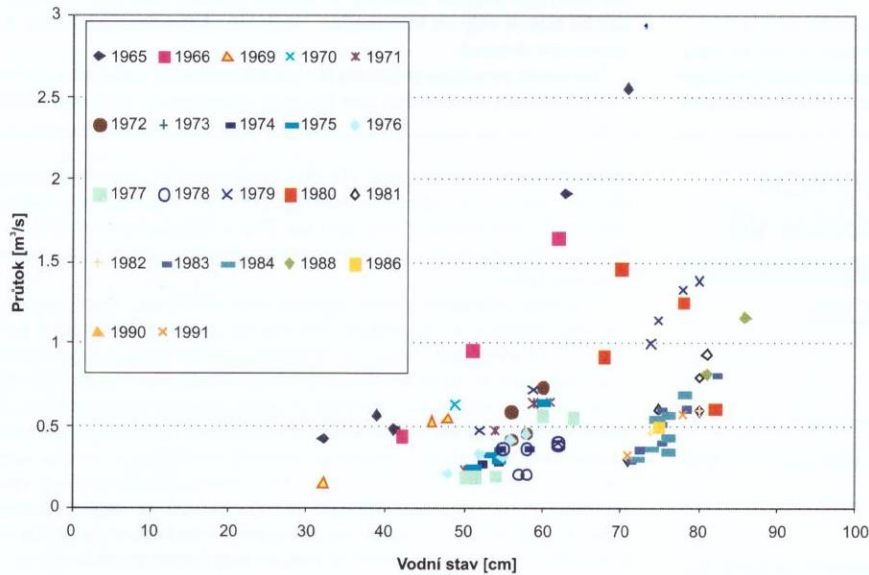
**Obr. 3.** Časový průběh průměrných denních průtoků z období hydrologických let 1978 až 1982, zobrazený společně s průtoky změřenými při hydrometrickém měření; v úseku řady 1. 8. 1978–22. 8. 1979 jsou vyčíslené průměrné denní průtoky podstatně větší, než průtoky z hydrometrických měření



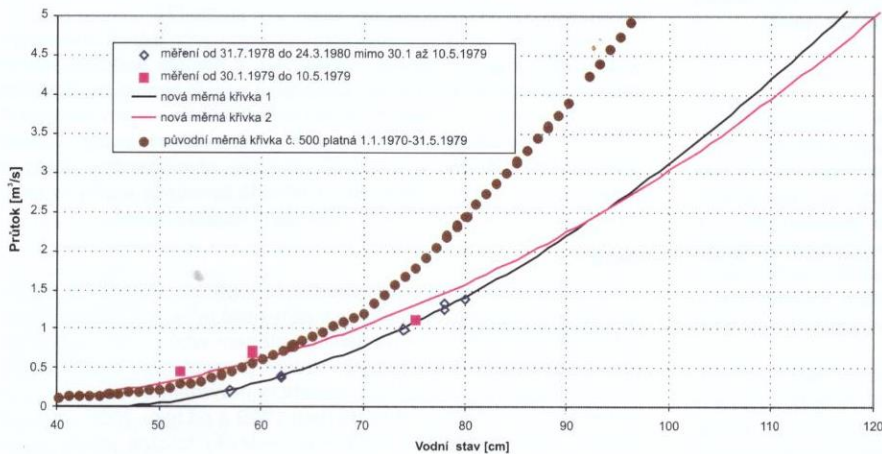
1.11.1977 - 31.10.1982



**Obr. 4.** Vztah mezi vodními stavy a průměrnými denními průtoky porovnaný s výsledky hydrometrických měření a měrnými křivkami průtoků (MKP), ze kterých vycházelo vyčíslení průtoků; je zřejmé, že měrná křivka č. 500 použitá pro vyčíslení průměrných denních průtoků byla sestavena na základě jediného hydrometrického měření, průtoky podle ní vypočtené jsou zřejmě nadhodnocené



**Obr. 5.** Výsledky hydrometrických měření z období 1965–1991 ve vodoměrné stanici s nestabilními hydraulickými poměry za období 1965–1981; s postupem času odpovídají stejnému průtoku stále větší vodní stavy, řečiště se zřejmě zanášelo



**Obr. 6.** Nově sestavené měrné křivky č. 1 a 2 a původní měrná křivka průtoků č. 500 použitá v období neshody průměrných denních průtoků s výsledky hydrometrických měření v letech 1978–1979 (viz obr. 3)

měrnou křivku průtoků, je detailní zobrazení výsledků hydrometrických měření v grafu  $Q = f(H)$  v dílčích obdobích. To umožňuje nalézt první a poslední měření, vymezení „minimální“ období platnosti měrné křivky. Mezi takto stanovenými časovými úseky se pak nacházejí intervaly, ve kterých nastala změna, vedoucí ke změně vztahu mezi vodními stavy a průtoky. Pokud jde o změnu umístění nebo stavební úpravu vodoměrné stanice nebo posun nuly vodočtu, lze ji obvykle časově přesně stanovit. Naopak u změny morfologie řečiště v příčném profilu vodoměrné stanice nebo úseku toku bezprostředně pod ní nelze většinou přesné datum změny nalézt. Často ani neexistuje, neboť změna neproběhla během jednoho dne, ale v delším časovém intervalu. V těchto případech je vhodné vycházet z oprávněného předpokladu, že změna souvisí s povodní nebo se zvětšením průtoků. Rozmezí platnosti měrných křivek pak lze umístit například do dne, který následuje po kulminaci nejvýznamnější průtokové vlny v období mezi dvěma hydrometrickými měřeními, jež na změnu ukazují. Tento postup je použitelný, jen když takové období není příliš dlouhé (několik měsíců). V případě podstatně delších období, například celého roku, lze na dobu změny usuzovat porovnáním průtoků ve zpracovávané stanici s průtoky ve vhodném analogonu (vodoměrné stanici s podobným režimem průtoků).

V druhé části řešení je hledána analytická funkce, někdy složená ze dvou částí, která má tyto podstatné vlastnosti:

- prochází co nejlépe výsledky hydrometrických měření,
- průběh mimo oblast výsledků hydrometrických měření směrem k maximálním průtokům vede k fyzikálně přijatelným hodnotám průtoků (využíváme odhadů maximálních průtoků z hydraulických výpočtů a modelů),
- průběh mimo oblast výsledků hydrometrických měření směrem k minimálním průtokům vede ke zdůvodnitelným hodnotám průtoků.

Dalším prostředkem, který lze použít pro zvětšení věrohodnosti vyčíslení průtoků, je úprava hodnot vyčíslených podle měrné křivky průtoků přičtením veličiny, jejíž časový průběh se určí lineární interpolací mezi hodnotami  $D = Q_{\text{hydrom}} - Q_{\text{MKP}}$  ve dnech hydrometrických měření, kde  $Q_{\text{hydrom}}$  je průtok stanovený podle hydrometrického měření a  $Q_{\text{MKP}}$  je průtok stanovený podle měrné křivky průtoků pro vodní stav odečtený při hydrometrickém měření. Tento postup nachází uplatnění v úsecích řady, pro které nelze sestavit samostatnou měrnou křivku průtoků (například je příliš málo měření průtoků) nebo i v případech, že průtoky vyčíslené podle měrné křivky se znatelně odchylují od průtoků změřených a přičítáme neznáme (může souviset například se sezonními změnami hydraulických podmínek v toku).

Příklad nově sestavených měrných křivek průtoků v porovnání s původní křivkou nadhodnocující průtoky je na obr. 6.

Při konstrukci nových křivek průtoků byly využity výsledky hydraulického výpočtu provedeného po povodni 1981.

## Závěr

Rekonstrukce řad průměrných denních průtoků poskytuje možnosti jejich zpřesnění zejména v úsecích, kde se nepodařilo při původním vyčíslení sestavit měrné křivky průtoků dobře vystihující časové změny hydraulických podmínek ve vodoměrném profilu. Při rekonstrukci vyčíslení lze tuto úlohu řešit spolehlivěji. Významná je také možnost zpětného ověření průběhů měrných křivek v oblasti velkých průtoků na základě výsledků hydraulických výpočtů a hydraulických modelů z pozdějšího období.



Obrázek 7 ukazuje, že v případě řady průtoků Rakovnického potoka z období 1966–2008 v části řady do roku 1980 byly průtoky v některých úsecích nadhodnocené, po roce 1991 v některých úsecích podhodnocené. Klesající trend průtoků je podle nového vyčíslení pozvolnější, ale stále mimořádný.

#### Poděkování

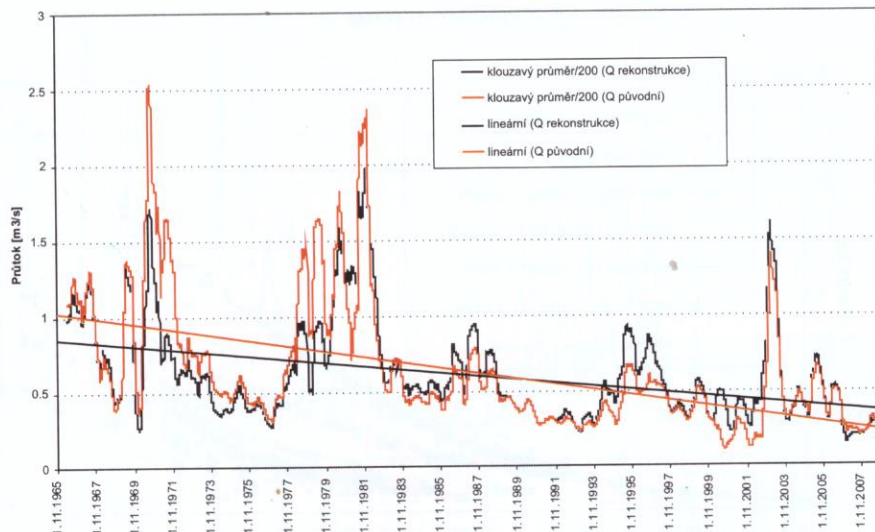
Článek vznikl v rámci projektu NAZV 91247 – Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulčních schopností v povodí Rakovnického potoka financovaného Ministerstvem zemědělství ČR.

#### Literatura

Dub, O. (1957) *Hydrologia, hydrografia, hydrometria*. Bratislava : Slovenské nakladateľstvo technickej literatúry, s. 210–217.

Ing. Ladislav Kašpárek, CSc.  
VÚV T.G.M., v.v.i, Praha  
ladislav\_kasperek@vuv.cz

Príspevek prošel lektorským řízením.



Obr. 7. Porovnání průběhu kompletně nově vyčíslených a původních průměrných denních průtoků Rakovnického potoka ve vodoměrné stanici Rakovník z období hydrologických let 1966–2008 v grafu klouzavých průměrů a lineárních trendů

#### Key words

flow series derivation, rating curves, water gauging stations

Methods for reconstruction of flow series (Kašpárek, L.)

The paper describes briefly the methods, which are in use for derivation of daily flow series by using results of continuous water stage measurements and rating curves that are derived from episodic flow

measurements. This approach is associated with a number of problems that originate from changes in hydraulic conditions in vicinity of water gauging stations, limited number of flow measurements, and the fact that regular monthly or annual derivation of the flow series can be based only on information available at the time when the flow series are derived.

The paper proposes methods for identification of unreliable parts of historical daily flow series and for their subsequent reconstruction.

## VARIABILITA NEDOSTATKOVÝCH OBJEMŮ NA ČESKÝCH TOCÍCH VE VZTAHU K FYZICKO-GEOGRAFICKÝM CHARAKTERISTIKÁM POVODÍ

Theodor Fiala

#### Klíčová slova

nedostatkové objemy,  $Q_{330}$ , fyzicko-geografické charakteristiky, korelace, statistika

#### Souhrn

Nedostatkové objemy vody určené hranicí M-denního průtoků  $Q_{330}$  byly analyzovány z hlediska své velikosti a variability. Dále byly zkoumány roční délky trvání průtoků menšího nebo rovného  $Q_{330}$ . Časové řady všech charakteristik byly testovány modifikovaným Mann-Kendallovým testem na přítomnost trendu. Ve vybraných povodích byly vypočteny závislosti nedostatkových objemů na fyzicko-geografických charakteristikách. Byla rovněž odvozena regresní rovnice umožňující výpočet průměrného nedostatkového objemu povodí z hodnot  $Q_{330}$ , plochy povodí a variačního koeficientu průměrných denních průtoků.

#### Úvod

Při nedostatku či úplné absenci srážek nastává v povodí zmenšení povrchového odtoku a pokles hladin vod v jezerech a nádržích. Toto tzv. meteorologické sucho ovšem neovlivní jen povrchové, nýbrž i podzemní vody. Dochází ke snižování hladin podzemních vod, následnému zmenšení základního odtoku a poklesu vydatnosti pramenů. Všechny tyto projevy lze označit pojmem hydrologické sucho [1]. Meteorologické sucho vzniká kombinací nízkých srážek a vysoké teploty vzduchu. Sírání hydrologického sucha je kromě meteorologické příčiny určováno celou řadou dalších faktorů, jako jsou vlastnosti půdy, využívání krajiny, topografie a geologie území.

Hydrologické sucho je zpravidla popisováno s využitím malých průtoků. V České republice se k popisu tradičně používají M-denní průtoky, a to nejčastěji  $Q_{330}$ ,  $Q_{355}$ ,  $Q_{364}$  a nejmenší průměrný denní průtok v roce. Příkladem je studie ČHMÚ [2], ve které byly testovány trendy výše zmíněných M-denních průtoků v období 1961–2005. Zahraniční práce kvantifikují sucho zpravidla na základě hodnot P-percentních průtoků, tj. průtoků, které jsou dosaženy nebo překročeny v průměru v P procentech

případů. Obvykle se používají 70, 90, popřípadě 95% průtoky označované  $Q_{70}$ ,  $Q_{90}$ , resp.  $Q_{95}$ . Příkladem je práce [3], ve které se její autoři zabývali modelováním změny průtoků  $Q_{95}$  v Nizozemsku. Hladný et al. [4] zkoumali, jak by se při změně teploty vzduchu a úhrnu srážek změnil percentil  $Q_{90}$ .

Nejmenší průměrné denní průtoky jsou veličinou, která může být zatížena relativně velkou chybou. Problémem může být krátkodobé antropogenní ovlivnění nebo může být minimum „způsobeno“ a zaznamenáno díky technické či mechanické závadě na limnigrafu. V hydrologických studiích se proto častěji využívají minima spočtená z klouzavých průměrů několika po sobě jdoucích denních hodnot. Nejčastěji se používají sedmidenní a třicetidenní klouzavé průměry. Například v Litvě zkoumali trendy a sezonalitu třicetidenních ročních minim [5]. Předpovědi vývoje průměrných ročních sedmidenních minim v Evropě se zabývali Dankers et al. [6]. Je zřejmé, že minimum odvozené z více hodnot do určité míry eliminuje krátkodobá ovlivnění či zaznamenání nesmyslné hodnoty.

Kromě analýzy hodnot malých průtoků je další možností jak popsat vlastnosti sucha vypočítat délku jeho trvání. Z dat průměrných denních průtoků je možné určit dny s průtoky pod zvolenou prahovou hodnotou a spočítat třeba jejich roční sumy. Kupříkladu jedna belgická studie se zabývala reakcí povodí na změnu klimatu způsobenou zdvojnásobením koncentrace  $CO_2$ . Hydrologické sucho bylo vymezeno současnou hodnotou  $Q_{95}$  a tento práh byl zachován pro predikované odtoky. Autoři pak porovnávali současné a budoucí počty dnů sucha [7].

Podobně jako se hydrologové zabývají testováním trendů průměrných průtoků, zkoumají se i trendy malých vod. V Kanadě testovali sezonní minima z klouzavých průměrů o různé délce a navíc pomocí různých testů trendu [8]. Hannaford a Marsh [9] se zabývali ročními minimy sedmi- a třicetidenních klouzavých průměrů a také ročními délkami suchých období vymezených hodnotou  $Q_{70}$  a  $Q_{90}$ . Všechny charakteristiky testovali na přítomnost trendu. Stejně jako v případě kanadské studie i v tomto případě byl jedním z vybraných testů Mann-Kendallův test.

#### Data

Pro analýzu nedostatkových objemů byly vybrány stanice, ve kterých průtoky nejsou vůbec, nebo jsou jen velmi málo ovlivněny lidskou činností. Kromě neovlivněnosti byla dalším kritériem výběru stanice nepřerušenosť pozorování ve sledovaném období. Zahrnuto bylo několik stanic, jejichž přemístění v období bylo statisticky nevýznamné. Příkladem jsou na Jizeře stanice Tuřice měřící do roku 1999 a od roku 2000 navazující stanice Tuřice-Předměřice, které mají prakticky totožné plochy povodí a průměrné průtoky, takže jejich spojením vznikne homogenní řada. Dohromady bylo využito dat z 82 vodoměrných stanic. Data poskytl ze své databáze Český hydrometeorologický ústav.



Roční hodnoty nedostatkových objemů byly spočítány z dat průměrných denních průtoků za období 1961–2005 programem HyStat. Vstupními údaji jsou kromě denních průtoků také plochy povodí vybraných stanic. Nedostatkové objemy jsou programem automaticky přepočítávány na plochy povodí, a proto jsou ihned srovnatelné mezi různými velkými povodími. Program umožňuje zadání prahového průtoků, na jehož základě pak vybírá období s průtoky pod tímto prahem. Výstupem jsou roční sumy počtu dnů, kdy průměrný denní průtok podkročil prahovou hodnotu, a roční hodnoty nedostatkových objemů, tj. rozdílů mezi prahovým průtokem a skutečně se vyskytujícími podprahovými průtoky. Program zároveň umožňuje zvolit si libovolné datum začátku roku, což je pro analýzy sucha výhodné.

Data o fyzicko-geografických charakteristikách povodí byla získána z několika zdrojů. Sklonitost povodí byla vypočtena z digitálního modelu terénu. Údaje o zastoupení různých krajinných pokryvů byly odvozeny z databáze CORINE Landcover. Informace o množství jílu v půdě a nepropustnosti půdy jsou součástí gridové vrstvy vytvořené a poskytnuté Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd (VÚMOP). Hodnoty za jednotlivá povodí byly vypočteny v prostředí ArcGIS.

## Metodika

Identifikovat sucho můžeme na základě hodnot, které jsou z dlouhodobého hlediska podnormální. Hydrologické sucho je počítáno z parametrů získávaných při měření v hydrologické síti. Při výpočtech se proto uplatňují data o průtocích, vydatnostech pramenů a změnách hladin v jezerech, nádržích, studnách a vrtech. Důležitým krokem je zvolení vhodné prahové hodnoty. Pokud je vybraný práh příliš nízký, podkročí ho jen extrémní sucha a ostatní významná sucha mohou být zanedbána. Opačný případ vede k výběru všech období, tj. i těch, která byla krátká a nedůležitá.

Prahovou hodnotou u vodních toků bývají, jak bylo uvedeno výše, nejčastěji P-procentní a M-denní průtoky. V této práci byl na každé stanici vzat jako prahová hodnota M-denní průtok  $Q_{330}$  z období 1961–2005. Představuje množství vody, které je dosaženo nebo překročeno 330 dní v roce. Odpovídá přibližně P-procentnímu průtoku Q90. Přirozená akumulace vody v povodí je tvořena podzemními vodami, údaje o ní však bohužel nejsou celoplošně zpracovány. Výtok vody z podzemních zásobáren (kolektorů) je označován jako základní odtok. Základní odtok přispívá k celkové vodnosti povrchového toku, ovšem tuto složku lze jen těžko z celkového odtoku separovat a přesně vyčíslit. V hydrologii se – s určitým zjednodušením – jako ukazatel hranice základního odtoku používá průtok  $Q_{330}$ . Je tedy možné konstatovat, že období poklesu průtoků pod  $Q_{330}$  značí stav, kdy jsou zásoby povrchové a podpovrchové vody vyčerpány a vodní tok je zcela saturován podzemní vodou.

Při poklesu průtoků pod úroveň  $Q_{330}$  lze vymežit množství vody, které do této úrovně chybí. Chybějící množství vypočítáme jako rozdíl průtoků  $Q_{330}$  a aktuálního průtoků násobeného časem, po který nebyla úroveň  $Q_{330}$  dosažena. Integrál tohoto rozdílu náležející jednomu hydrologickému roku udává roční sumu nedostatkových objemů. Takto vypočtený nedostatkový objem pak byl vyjádřen v milimetrech na plochu povodí, aby byly hodnoty mezi sebou srovnatelné.

Roční hodnoty jsou v hydrologii klasicky odvozovány za období začínající 1. listopadem a končící 31. říjnem. V této studii byl za začátek hydrologického roku zvolen 1. duben. Jarní měsíce jsou typicky obdobími velké vodnosti, a proto zvolený začátek zaručuje, že se jedno období sucha nerozdělí do dvou různých hydrologických roků. Proto pokud je v článku uváděn např. nedostatkový objem za rok 2000, jde o objem za období 1. 4. 2000 až 31. 3. 2001.

Kromě ročních hodnot nedostatkových objemů pod průtokem  $Q_{330}$  (dále označované V330) a ročních sum dnů s průtokem pod  $Q_{330}$  (dále označované D330) byly pro studii vypočteny další charakteristiky. U každé stanice byl vypočten koeficient variace nedostatkových objemů V330 ( $CV_{V330}$ ), koeficient variace dnů D330 ( $CV_{D330}$ ) a tzv.  $Q_{330\text{specif.}}$ , což je poměr průtoků  $Q_{330}$  k ploše povodí. Uvedené charakteristiky nedostatkových objemů byly porovnávány s následujícími charakteristikami povodí:

*plocha,  
dlouhodobý průměrný průtok,  
průměrná nadmořská výška,  
průměrný roční úhrn srážek,  
průměrná roční výška potenciální evapotranspirace,  
průměrná roční odtoková výška,  
koeficient variace průměrných denních průtoků,  
K99, tj. 99procentní průtok dělený dlouhodobým průměrným průtokem,  
lesnatost,  
plocha jehličnatých lesů,  
plocha listnatých lesů,  
plocha městské zástavby,  
plocha orné půdy,  
plocha luk,  
průměrné množství jílu v půdě,  
nepropustnost půdy,*

*průměrná hodnota CN křivky,  
sklonitost.*

Pro identifikaci závislostí byly vypočteny korelační koeficienty nedostatkových objemů a výše uvedených charakteristik povodí. V programu STATISTICA byly také odvozeny regresní rovnice, které umožňují výpočet nedostatkových objemů z fyzicko-geografických charakteristik povodí.

Nedostatkové objemy byly testovány na přítomnost trendu, přičemž bylo použito modifikovaného Mann-Kendalova testu trendu. Tento test je často využíván při zpracování hydrologických a meteorologických dat. Jde o neparametrický test, a tudíž histogram dat nemusí odpovídat některému ze statistických rozdělení. Oproti základnímu Mann-Kendalovu testu nabízí jeho modifikovaná verze nejprve test autokorelace prvního řádu. Pokud je v časové řadě dat autokorelace nalezena, je nejprve odstraněna a test proběhne následně na upravených datech. Časové řady byly testovány a vyhodnoceny na dvou úrovních, a to na 0,1 a 0,05 (tj. pravděpodobnost přítomnosti trendu 90, resp. 95 %).

## Výsledky a diskuse

Roční nedostatkové objemy vyjádřené v milimetrech na plochu povodí se ve zkoumaných povodích pohybují od 0,2 do 8,1 mm (obr. 1). Tento rozsah odpovídá objemu od 200 do 8 100 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Nejmenší hodnota připadá jihomoravskému povodí Radějovky, největší patří šumavskému povodí Vydry po Modravu. Průměr nedostatkových objemů činí 2,1 mm (210 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>). Z mapy vyplývá, že vysoké hodnoty V330 připadají na povodí, která leží ve vyšších nadmořských výškách, mají vysoké úhrny srážek a relativně malou potenciální evapotranspiraci. Jsou to proto povodí s dostatkem vody, s vysokou odtokovou výškou. To je patrné i z *tabulky 1*, ve které jsou uvedeny korelační koeficienty nedostatkových objemů a vybraných charakteristik povodí. Velikost nedostatkového objemu kladně koreluje s průměrným ročním úhrnem srážek (korelační koeficient je roven 0,9), s průměrnou roční odtokovou výškou (koeficient 0,95) a v největší míře se specifickým průtokem  $Q_{330}$  (tj. průtokem  $Q_{330}$  vyděleným plochou povodí), kde korelace dosahuje hodnoty 0,96. Naopak nejvíce negativní je korelace mezi V330 a průměrnými ročními výškami potenciální evapotranspirace, takže s rostoucími hodnotami evapotranspirace klesají hodnoty nedostatkových objemů.

**Tabulka 1.** Korelační koeficienty V330,  $CV_{V330}$  a  $CV_{D330}$  s vybranými charakteristikami povodí

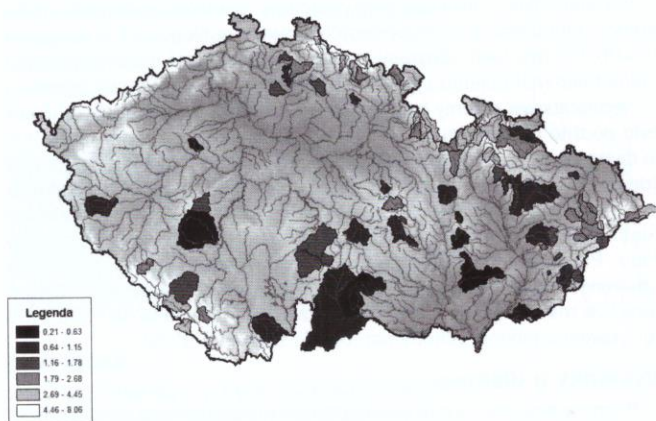
Charakteristika povodí	V330	$CV_{V330}$	$CV_{D330}$
Plocha povodí	-0,24	-0,19	-0,29
Dlouhodobý průměrný průtok	0,26	0,05	-0,21
Nadmořská výška	0,81	0,24	-0,01
Průměrný roční úhrn srážek	0,90	0,28	0,05
Prům. roční výška potenciální evapotranspirace	-0,74	-0,21	-0,08
Průměrná roční odtoková výška	0,95	0,33	0,09
CV	-0,41	-0,23	-0,14
K99	0,31	0,24	0,24
Lesnatost	0,39	0,15	0,18
Jehličnaté lesy	0,41	0,23	0,20
Listnaté lesy	-0,04	-0,12	-0,05
Městská zástavba	-0,30	-0,02	-0,06
Orná půda	-0,59	-0,16	-0,08
Louky	0,06	-0,07	-0,13
Množství jílu v půdě	-0,46	0,01	0,08
Nepropustnost	-0,40	-0,08	-0,01
CN	-0,35	-0,19	-0,17
Sklonitost	0,52	0,00	0,03
$Q_{330\text{specif.}}$	0,96	0,46	0,18

Těsnost závislosti se projevila při výběru regresní rovnice, která nejlépe popisuje průměrný roční nedostatkový objem. V330 kladně koreluje s procentuálním podílem lesů, a to především jehličnatých, či sklonitostí a naopak záporně koreluje s podílem orné půdy a nepropustností půdy. Ovšem tyto vazby nejsou tak těsné jako závislosti na srážkových úhrnech či průměrné roční odtokové výšce. Nejvíce V330 koreluje s  $Q_{330\text{specif.}}$  a proto jeho hodnoty vstoupily do rovnice. Zbýlý rozptyl hodnot koreloval s variačním koeficientem. Proto má výsledná rovnice tvar:

$$V330 = 578,07 \cdot (Q_{330\text{specif.}}) + 0,7 \cdot (CV) - 0,97$$

Pro výpočet V330 je tedy nutné znát koeficient variace průměrných denních průtoků, plochu povodí a průtok  $Q_{330}$ . Hodnoty vypočtené regresní rovnicí korelovaly s reálnými hodnotami velmi těsně (korelační koeficient 0,97). Koeficient determinace byl roven 0,94, a rovnice tak vypočítá hodnotu velmi přesně.





Obr. 1. Průměrné roční nedostatkové objemy pod M-denním průtokem  $Q_{330}$  (v mm na plochu povodí)

Ač by se mohlo zdát, že největší nedostatky vody připadají na povodí v horských oblastech a že jsou tato povodí nejvíce náchylná k suchu, ve skutečnosti tomu tak není. Jsou to totiž zároveň povodí s dostatkem srážek a vysokou odtokovou výškou. Podíl výšky nedostatkového objemu k celkové roční odtokové výšce dává lepší představu o tom, jaký význam má  $V_{330}$  vůči celkovému odtoku. Průměrně  $V_{330}$  činí pouze 0,5 % odtokové výšky. Ve sledovaných povodích se tento podíl pohybuje od 0,2 do 1,0 %. Nejvyšší podíl přísluší Bělé, pravostrannému přítoku dolní Jizery, která má hodnotu  $V_{330}$  sice jen 1,4 mm, ale celková malá odtoková výška podíl nedostatkového objemu zvětšuje.

Chod průměrných nedostatkových objemů je zachycen na obr. 2. V grafu jsou dobře identifikovatelné roky sucha, které odpovídají odtokům podprůměrným roků, jako byly například roky 1963, 1983, 1992 a 2003. Zajímavý je rok 1962, který u vybraných povodí vyšel z hlediska  $V_{330}$  jako rekordní, z hlediska ročního odtoku vody byl ovšem průměrný. Z křivky za celé období není zřejmý žádný trend směrem k větším, či menším hodnotám  $V_{330}$ , ovšem zdá se, že nedostatkové objemy se od počátku šedesátých do osmdesátých let zmenšovaly a od té doby opět s několika výkyvy rostou.

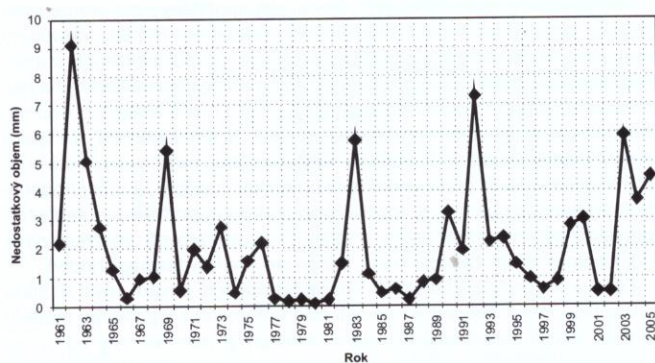
Nevýraznost trendů nedostatkových objemů dokládají výsledky modifikovaného Mann-Kendalova testu, kterým byly identifikovány časové řady  $V_{330}$  se statisticky významným trendem. Výsledky testu jsou zobrazeny v mapě na obr. 3. Ze sledovaných povodí byl jen v necelých 20 % případech zjištěn trend statisticky významný na hladině pravděpodobnosti 0,1. Na hladině 0,05 to bylo méně než 10 % případů. V povodích se signifikantním trendem bylo plných 75 % případů s trendem klesajícím. Jejich počet je ovšem jen o málo vyšší, než by byl počet stanic s trendem odvozeným z náhodného výběru.

Velikosti ročních nedostatkových objemů jsou velmi variabilní, což je patrné již z grafu na obr. 2. Koeficienty variace  $V_{330}$  se u sledovaných stanic pohybují od 0,75 do 2,30 (obr. 4). Nejméně rozkolísané  $V_{330}$  lze najít na některých povodích na Českomoravské vysočině, v jižních Čechách nebo v povodí Moravy. Nejproměnlivější jsou nedostatkové objemy na horských povodích (kromě Beskyd) a ve východních Čechách. Z rozložení hodnot  $CV_{V_{330}}$  nevyplývá zřejmá vazba na některou fyzicko-geografickou charakteristiku povodí. Korelační koeficienty se většinou pohybují do hodnoty 0,3. Kladně korelují hodnoty  $Q_{330}$  přepočtené na plochu povodí ( $Q_{330\text{specif.}}$ ), srážkové úhrny, odtoková výška a hodnota  $K_{99}$ . Záporně koreluje koeficient korelace průměrných denních průtoků a evapotranspirace. Z toho lze soudit, že větší rozkolísanost nedostatkových objemů se vyskytuje v povodích s dostatkem vody a vyrovnanějším odtokem, což je třeba příklad výše zmíněných horských povodí nebo povodí ve východních Čechách.

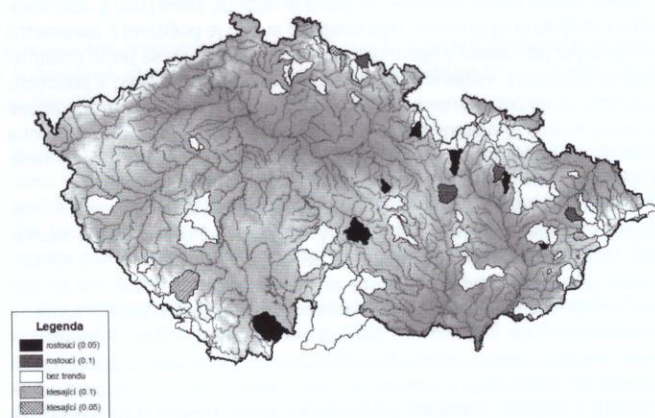
Podobně byly zhodnoceny také koeficienty variace ročních počtů dnů s průtokem pod  $Q_{330}$ . Ty korelují s vybranými charakteristikami velmi podobně jako koeficienty variace  $V_{330}$  (korelační koeficient  $CV_{V_{330}}$  a  $CV_{D_{330}}$  je roven 0,7). Nejvíce rozkolísané jsou  $D_{330}$  v Krkonoších a Jeseníkách a naopak nejméně v povodích, která leží v nižších nadmořských výškách (například v jižní části Vysočiny nebo na dolním povodí Moravy).

V dlouhodobém pohledu se průměrný denní průtok menší než  $Q_{330}$  vyskytne průměrně 35–36krát za rok, což vyplývá z jeho definice. Délky trvání v jednotlivých letech ovšem mohou být značně rozkolísané podobně jako variabilita nedostatkových objemů. Nezřídka v průběhu roku průtok pod  $Q_{330}$  vůbec neklesne, v suchém roce může naopak přetrvávat řadu týdnů či dokonce měsíců.

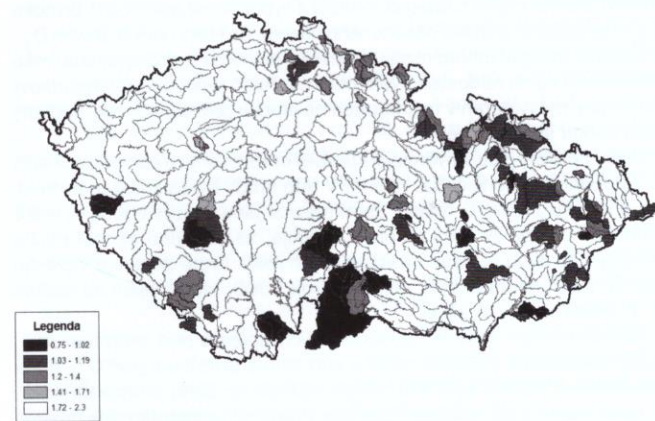
Podle ročního počtu  $D_{330}$  (průměr za sledované stanice) byl nejušším rokem rok 1992 s průměrným počtem 101 dnů s průtokem menším nebo



Obr. 2. Chod ročních nedostatkových objemů pod  $Q_{330}$  (průměr z vybraných stanic)



Obr. 3. Trendy ročních nedostatkových objemů pod  $Q_{330}$  v období 1961 až 2005



Obr. 4. Koeficienty variace ročních nedostatkových objemů pod  $Q_{330}$  v období 1961–2005

rovným  $Q_{330}$ . Z hlediska nedostatkových objemů byl tento rok až druhý za rokem 1962, z čehož vyplývá, že v roce 1992 trvaly malé průtoky sice delší dobu, ale nepodkročily hranici  $Q_{330}$  o tolik jako průtoky v roce 1962. Rok 1962 byl z pohledu délky trvání až třetí, překonal ho ještě rok 2003 s počtem 96 dnů. U konkrétního povodí je rekordem 272 dnů, po kterém průtok nepřekročil hodnotu 330denní vody na Zábřece v roce 1974.

Opačným extrémem byl rok 1980, ve kterém se průměrně vyskytly pouze tři dny s průtokem pod  $Q_{330}$ . U 84 % stanic průtok na  $Q_{330}$  v roce 1980 vůbec neklesl, přičemž v běžném roce této hladiny v průměru dosáhne 30 % stanic. Co se týče počtu roků ve sledovaném období (1961–2005), kdy průtok na povodí na úroveň  $Q_{330}$  neklesl, bylo jich v průměru 13 až 14, tj. přibližně každý třetí nebo čtvrtý rok. Počty těchto „vodních“ roků se povodí od povodí lišily. V některých povodích průtok poklesl na nebo pod  $Q_{330}$  téměř v každém roce. Typická jsou pro to například beskydská povodí, kde ze zkoumaných 45 let pouze v 5 až 7 letech průtoky neklesly na úroveň 330denní vody. V povodí Otavy bylo takových roků 12–16.



U dvou povodí neklesly průtoky na  $Q_{330}$  ve více než 50 % případů: na Zábrdce ve 23 ze 45 let a na Radějovce dokonce ve 27 ze 45 let.

## Závěr

Velikosti nedostatkových objemů pod hranicí M-denního průtoku  $Q_{330}$  tvoří pouze zlomek z celkového objemu vody odtékající z povodí. Kromě absolutní velikosti je proto vhodné vyhodnocovat také délky trvání malých průtoků, popř. průměrnou velikost podkročení prahové hodnoty (tzv. intenzitu sucha). Délka trvání vyjadřuje, po jakou dobu v řece teklo tak málo vody, že mohly být omezeny odběry vody či vypouštění odpadních vod.

V této práci byl za prahovou hodnotu vybrán M-denní průtok  $Q_{330}$ . Uvedený metodický postup ovšem umožňuje vypočítat charakteristiky nedostatkových objemů pro jakoukoliv jinou prahovou hodnotu, ať už by to byl m-denní nebo p-procentní průtok.

Z hlediska přirozeného vývoje vodnosti českých toků v běžném roce je zřejmé, že jediná prahová hodnota vymezení období sucha v části roku, kdy z povodí odtéká nejméně vody, tedy na konci léta a na podzim, popřípadě v horských povodích v nejchladnější části zimy. Jednotný práh je proto vhodný pro vyhodnocení ročních nedostatkových objemů a délek trvání malých průtoků. Pro sezonní srovnání je nutné zvolit prahovou hodnotu pro každou sezonu nebo měsíc a v nich nedostatkové objemy analyzovat. Je totiž možné, že se například budou malé průtoky v zimě zvětšovat v důsledku zvyšování teploty vzduchu, kdy bude více srážek padat ve formě deště a hned odtékat. Naopak v létě by zvýšení teploty a setrvalý stav srážkových úhrnů – což jsou současné odhady vývoje klimatu na našem území – mohly způsobit zmenšování průtoků. Proto je nutné malé průtoky hodnotit pro každou sezonu zvlášť, což bude náplní naší další práce.

## Seznam použitých zkratk

- $Q_{330}$  – průměrný denní průtok, který je dosažen nebo překročen průměrně 330 dnů v roce  
 $V_{330}$  – roční hodnota nedostatkového objemu pod M-denním průtokem  $Q_{330}$   
 $D_{330}$  – roční suma dnů s průtokem pod  $Q_{330}$   
 $CV_{V330}$  – koeficient variace nedostatkových objemů  $V_{330}$   
 $CV_{D330}$  – koeficient variace ročních hodnot dnů  $D_{330}$   
 $Q_{330specif.}$  – podíl průtoku  $Q_{330}$  ku ploše povodí.  
K99 – 99procentní průtok dělený dlouhodobým průměrným průtokem

### Poděkování

Článek vznikl v rámci projektu VaV SP/1a6/125/08 Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky financovaného Ministerstvem životního prostředí ČR. Autor dále děkuje ČHMÚ za poskytnutí dat a University du Québec za programový kód Mann-Kendalova testu trendu.

# STUDIE DOPADŮ KLIMATICKÉ ZMĚNY NA HYDROLOGICKÉ POMĚRY V POVODÍ BLŠANKY A NÁVRH ADAPTAČNÍCH OPATŘENÍ

Ladislav Kašpárek, Magdalena Mrkvičková

## Klíčová slova

adaptační opatření, dopady klimatické změny, hájené lokality, nedostatek vody, opatření v krajině, závlaha

## Souhrn

V povodí řeky Blšanky došlo v posledních letech ke kritickému poklesu průtoků. Situace vede ke zhoršení kvality vody a k častému omezování povoleného i obecného nakládání s vodami. Existuje reálná obava, že s nastupujícími dopady klimatické změny nastanou problémy s nedostatkem povrchové i podzemní vody mnohem častěji a po delší dobu. Ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v.v.i., byla vypracována hydrologická studie, která zahrnuje zhodnocení hydrologických poměrů a potřeb vody na povodích vodních toků Blšanka a Liboc, a to pro současnou situaci, i s výhledem do budoucna. V povodí Blšanky se střetlo několik negativních činitelů, které vedly k nepříznivé hydrologické situaci. Negativní dopady změny klimatu (především rostoucí teplota vzduchu) urychlují proces evapotranspirace (výparu z půdy a rostlin) a zvyšují nároky vegetace na vodu. Málovodná období v předcházejících letech a dlouhodobé odběry podzemních vod vedly k zaklesnutí hladiny podzemních vod. Rostoucí podíl zavlažovaných zemědělských ploch způsobuje větší nároky na odběry povrchové

## Literatura

- [1] Palmer, WC. (1965) Meteorological Drought. U.S. Department of Commerce, Research paper No. 45, 58 p.
- [2] Kulasová, B., Boháč, M., and Fiala, T. (2008) Climate change impacts on low flows. Sborník příspěvků z workshopu Adolfa Patery 2008, Praha, s. 95–102.
- [3] Querner, EP., Van Bakel, PJT., and Mulder, HM. (2007) Water management innovation for meeting climate change effects and European Water Framework Directive targets: Pilot study Lankheet. Proceedings of the Third international conference on climate and water. Helsinki, s. 379–384. ISBN 978-952-11-2790-8.
- [4] Hladný, J. et al. (1996) Dopady možné změny klimatu na hydrologii a vodní zdroje v České republice. Národní klimatický program, sv. 20. Praha: ČHMÚ, 138 s.
- [5] Kriauciuniene, J., Kovaneckoviene, M., and Meilutyte-Barauskiene, D. (2007) Changes of the dry period runoff in Lithuania. Proceedings of the Third international conference on climate and water. Helsinki, p. 314–319. ISBN 978-952-11-2790-8.
- [6] Dankers, R. et al. (2007) Future changes in flood hazard in Europe. Proceedings of the Third international conference on climate and water. Helsinki, p. 115–120. ISBN 978-952-11-2790-8.
- [7] Gelens, D. and Roulin, E. (1998) Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, vol. 210, 1–4, p. 242–258.
- [8] Khaliq, MN., Ouara, TBM., Gachon, P., and Sushama, L. (2008) Temporal evolution of low-flow regimes in Canadian rivers. *Water Resources Research*, vol. 44, W08436, p. 1–19.
- [9] Hannaford, J. and Marsh, T. (2006) An assessment of trends in UK runoff and low flows using a network of undisturbed catchments. *International Journal of Climatology*, vol. 26, p. 1237–1253.

RNDr. Theodor Fiala

ÚVU T.G.M., v.v.i., e-mail: theodor.fiala@aonbenfield.com

Příspěvek prošel lektorským řízením.

## Key words

deficit volumes, discharge  $Q_{330}$ , physical-geographical characteristics, correlation, statistics

*Variability of Deficit Volumes in Czech Rivers and Their Relationship to Physical-geographical Catchment Characteristics (Fiala, T.)*

**Deficit volumes delimited by the M-day discharge  $Q_{330}$  threshold were analysed for their magnitude and variability. Further, annual sums of days with discharge equal or smaller than  $Q_{330}$  were examined. Time series of all characteristics were tested for trends with the modified Mann-Kendall test. In selected catchments, correlations of the deficit volumes and physical-geographical characteristics were calculated. An equation was derived that allows to estimate the mean annual deficit volume of a catchment using the  $Q_{330}$  discharge, catchment area and the variation coefficient of mean daily discharges.**

vody především během vegetačního období. Možným řešením problému s nedostatkem vody v regionu by bylo účelnější využívání stávajících nádrží, které byly původně postaveny jako závlahové, ale později byly pronajaty pro chov ryb a závlaha z nich je omezena. Další možností je výstavba nových menších nádrží se zásobní funkcí a jejich použití pro závlahy a nadlepšování průtoků v letních měsících. Technická opatření by měla být doprovázena opatřeními pro zvyšování retenční schopnosti krajiny.

## Úvod

Oblast Žatecka patřila vždy k regionům s nízkými úhrny ročních srážek. Leží ukryta pod „deštníkem“ Krušných hor, které zachycují velkou část srážek přicházejících ze severozápadu. Dostupnost vody v tomto regionu se v posledních letech stala limitujícím faktorem při obnově a případném rozšiřování ploch chmelnic, kde je pěstován proslulý žatecký poloraný červeňák. Kvůli nízkým průtokům v tocích dochází v celé oblasti k častým zákazům odběrů vody z toků. V roce 2007 došla situace až tak daleko, že říčka Blšanka, která odvodňuje povodí na východ od Doupovských hor o celkové rozloze 480 km<sup>2</sup>, v dolní části povodí zcela vyschla (obr. 1). V takovém případě nemůže tok plnit svou ekologickou funkci a organismy vázané na vodu buď uhynou, nebo musí najít nové stanoviště. Vznikají problémy s nedostatečným (nebo žádným) ředěním vypouštěných odpadních vod. Během málovodných období je kvalita vody v toku výrazně zhoršena. Existuje reálná obava, že se hydrologická situace v následujících letech ještě zhorší v důsledku prohlubujících se dopadů klimatické změny.

Hydrologická studie, jež byla zpracována pro potřeby správce vodních toků Povodí Ohře, s. p., si klade za cíl popsat hydrologické poměry na povodích Blšanka a Liboc pro současné podmínky a namodelovat situaci ovlivněnou očekávanými dopady klimatické změny v budoucnu. Dále je třeba zhodnotit současnou a očekávanou potřebu vody na povodí a na





**Obr. 1.** Vyschlé koryto řeky Blšanky v uzávěrovém profilu ve Stránkách v létě roku 2007

základě získaných poznatků je třeba navrhnout vhodná opatření, která by pomohla nepříznivou situaci řešit.

### Hydrologické poměry současné a s výhledem do budoucnosti

Současné hydrologické poměry byly popsány pomocí statistických metod na základě srážkových a průtokových dat získaných od ČHMÚ. Trendy v řadách byly testovány pomocí programu CTPA – Change and Trend Point Analysis (Procházka, M. et. al., 2001). Průměrné srážky povodí Blšanky se pohybují v rozsahu 490–510 mm/rok (v závislosti na použité interpolační metodě a zvoleném období), lokálně i méně než 450 mm/rok, na povodí Liboce se srážky pohybují v rozsahu od 500 do 530 mm/rok. Lokálně se srážkový úhrn na povodí Liboce mění především v korelaci na nadmořskou výšku v rozsahu od 630 do 460 mm/rok, kdy nejvyšší úhrny jsou zaznamenávány v oblasti Doupovských hor na severozápadě oblasti. Časový průběh ročních srážek (1961–2007) na povodí Blšanky nevykazuje žádný trend, srážky na povodí Liboce mírně rostou, trend však není statisticky významný.

V zájmové oblasti se aktuálně nacházejí tři limnigrafické stanice. Na Blšance se měří průtok od roku 1968 v Holedeči (profil ČHMÚ) a od roku 2001 ve Stránkách (přibližně 3 km níže po toku, profil Povodí Ohře, s.p.), na Liboci je od roku 2001 umístěna limnigrafická stanice v Libočanech (profil Povodí Ohře, s.p.). Průměrný denní průtok a hodnoty malých m-denních průtoků jsou uvedeny v *tabulce 1*. Z uvedených hodnot vyplývá, že v povodí Blšanky jsou průtokové poměry v obdobích sucha méně příznivé než v povodí Liboce. Časová řada průtoků od roku 1968 v Holedeči vykazuje klesající trend, který však nebyl při testování potvrzen jako statisticky významný. Podobný výsledek byl zjištěn při testování lineárního trendu v hodnotách hladiny podzemní vody měřené ve vrtu v Blšanech. Nedostatek vody se tedy netýká pouze povrchových vod, ale zasahuje i do sféry vod podzemních.

Statisticky významně narůstá teplota vzduchu, která ovlivňuje proces formování odtoku z povodí. Průměrné teploty vzduchu a gradient lineárního trendu od roku 1969 jsou uvedeny v *tabulce 2*.

**Tabulka 1.** Průtokové charakteristiky pro Blšanku a Liboc za období 2/2001–12/2007

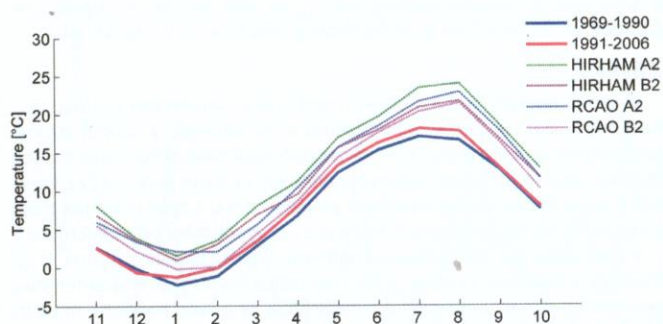
Stanice	Tok	Plocha [km <sup>2</sup> ]	Q <sub>0</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>300</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>385</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>364</sub> [m <sup>3</sup> /s]
Stránky	Blšanka	380,3	0,711	0,092	0,031	0,022
Libočany	Liboc	339,3	0,928	0,194	0,138	0,096

**Tabulka 2.** Teploty vzduchu na povodích Blšanky a Liboce

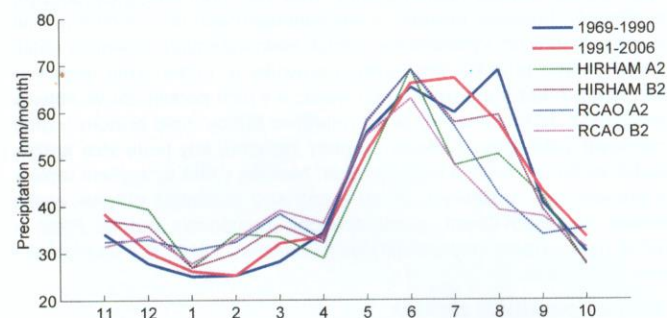
Povodí	Průměr 1969–2007	1969–1990	1991–2007	Gradient
Blšanka	7,84	7,50	8,27	+0,035 °C/rok
Liboc	7,70	7,40	8,02	+0,033 °C/rok

**Tabulka 3.** Hodnoty minimálního zůstatkového průtoku a průtoku navýšeného o potřeby závlahy

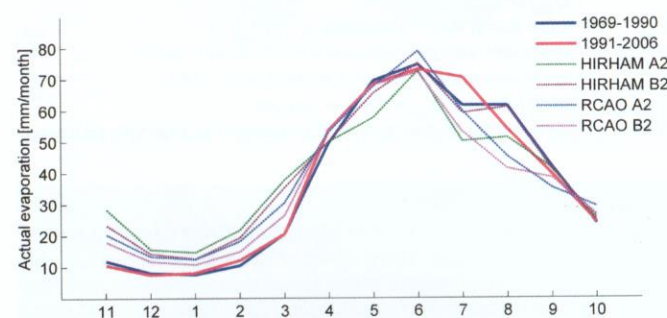
Povodí	Q <sub>nz</sub> [m <sup>3</sup> /s]	[mm/měsíc]	Včetně závlah [m <sup>3</sup> /s]	[mm/měsíc]
Blšanka	0,115	0,8	0,172	1,2
Liboc	0,245	1,9	0,251	2,0



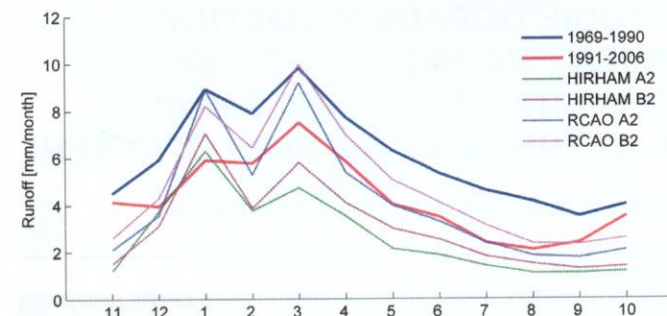
**Obr. 2.** Roční chod teploty pro současnost a podle scénářů s výhledem k referenčnímu roku 2085



**Obr. 3.** Roční chod srážek pro současnost a podle scénářů s výhledem k referenčnímu roku 2085



**Obr. 4.** Roční chod územního výparu pro současnost a podle scénářů s výhledem k referenčnímu roku 2085



**Obr. 5.** Roční chod odtoku pro současnost a podle scénářů s výhledem k referenčnímu roku 2085

Hydrologické poměry očekávané s výhledem do budoucnosti (především hodnotu odtokové výšky) je třeba modelovat. Pro tyto účely byl použit konceptuální model BILAN. Vstupem do modelu jsou měsíční hodnoty srážek, vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu, výstupem je řada odtokových výšek. Při modelování očekávaných hodnot odtokových výšek je třeba vstupní data upravit podle scénářů klimatické změny. Byly použity scénáře, které vznikly kombinací dvou různých regionálních modelů – HIRHAM (Max-Planck-Institut für Meteorologie v Hamburku) a RCAO (Rosbyho centrum ve Švédsku) a dvou různých scénářů emisí skleníkových plynů – SRES A2 („pesimistický“ scénář) a SRES B2 („optimistický“ scénář). Výsledné čtyři varianty průběhu klimatické změny byly vypracovány v rámci evropského projektu PRUDENCE na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy pro území ČR. Scénáře klimatické změny se vyznačují výrazným rozptylem v predikci změny teploty vzduchu s výhledem k roku



2085. Zvýšení teploty vzduchu se pohybuje v rozmezí 2,5–5,1 °C vzhledem k období 1969–1990. V odhadech budoucího odtoku je variabilita ještě výraznější. Všechny scénáře však shodně předpovídají pokles odtokové výšky, a to v rozsahu od 19 % až do 55 % původního průměru za období 1968–1990. Výsledky souvisejí se změnou ročního chodu srážek, kdy podle scénářů klimatické změny v zimních měsících srážky narůstají a naopak v letních ubývají. Rovněž dochází ke zvýšení územního výparu vlivem vyšších teplot vzduchu. Srážky, teplota vzduchu, výpar a odtoková výška v ročním chodu jsou na *obrázcích 2 až 5*. Výsledky podle scénářů je možno porovnat s hodnotami pozorovanými jednak v období 1969–1990, a pak v období 1991–2006. Z grafu odtokové výšky je patrný dramatický pokles odtoku za období 1991–2006. Tento pokles však není úměrný změnám v ostatních sledovaných veličinách. Klimatická změna tedy není jediný faktor, jenž vede k současné nepříznivé hydrologické situaci.

## Potřeby vody na současné povodí a výhled do budoucnosti

Analýza současného užívání vody na povodí byla vypracována na základě dat, jež jsou používána pro každoroční vodohospodářskou bilanci. Byly k dispozici hodnoty odběrů povrchových a podzemních vod i vypouštění odpadních vod v m<sup>3</sup> za rok za období 1998–2007. Z výsledků vyhodnocení vypouštěných množství vyplývá, že vodnost Blšanky je vodárenskými systémy nadlepšována přibližně o 22 l/s, Liboc je nadlepšována přibližně o 25 l/s. Porovnáme-li tyto hodnoty s hodnotami m-denních průtoků v *tabulce 1*, je zřejmé, že během málovodných období je průtok v Blšance z velké části tvořen právě vypouštěnou přečištěnou odpadní vodou. Tento výsledek dokládá vážnost problému s kvalitou vody popsaného v úvodu.

Na základě vyhodnocení množství vody odebírané z podzemních vod pro vodárenské účely bylo zjištěno, že z povodí Blšanky je aktuálně odebíráno 43,5 l/s (průměr za období 1998–2007), z povodí Liboce je odebíráno 11,4 l/s. Největší podíl odběrů připadá na vodárnu v Holedeci. V 70. a 80. letech zde bylo odebíráno dokonce až kolem 100 l/s. V blízkosti odběrných zařízení tak došlo k poklesu hladiny podzemní vody až o 13 m oproti původnímu stavu. Situace může vést k tomu, že během vegetačního období není průtok v korytě dotován z inundace, ale naopak dochází k infiltraci vody z toku do podloží.

Odběry vody z toku pro potřeby průmyslu nejsou významné, zásadní význam však mají odběry vody pro závlahy. V povodí Blšanky se nachází přibližně 1 251 ha chmelnic (2,6 % celkové plochy povodí), v povodí Liboce je to 138 ha (necelestých 0,5 % plochy povodí). V současné době

je zavlažována přibližně polovina plochy chmelnic. Evidované množství vody odebrané pro potřeby závlahy v posledních letech vzrostlo téměř desetkrát (69.10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> v roce 2001 a 494.10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> v roce 2007). S vysokou pravděpodobností však řada menších odběrů stále není řádně hlášena správci toku a skutečné množství odebírané závlahové vody je mnohem větší. S výhledem do budoucnosti se ze strany zemědělců dá očekávat snaha rozšiřovat závlahu i na dosud nezavlažované plochy chmelnic, a tak by potřeba vody pro závlahu ještě vzrostla.

Abyste nedocházelo k nedostatečnému ředění odpadních vod a aby byl zajištěn dostatečný průtok pro odběry vody pro závlahu, je třeba stanovit jednak minimální zůstatkový průtok, který by měl být v toku zachován, a dále je třeba stanovit hodnotu průtoku, která je potřeba pro závlahu. Stanovení minimálního zůstatkového průtoku bylo provedeno podle Metodického pokynu Ministerstva životního prostředí ČR. Hodnota navýšená pro závlahu byla stanovena pro předpoklad, že veškeré plochy chmelnic jsou zavlažovány závlahovou dávkou 150 mm/vegetační období (Dostál, T. a kol., 2008). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 3*.

Dále byla provedena analýza pravděpodobnosti zabezpečení minimálního zůstatkového průtoku v Blšance metodou pravděpodobnostních polí. S výhledem do budoucnosti byly použity modelované odtokové řady zahrnující vliv scénářů klimatické změny a hodnota průtoku navýšená o potřeby vody pro závlahu během vegetačního období. Výstup analýzy pro současnou situaci (průtoky za období 1991–2006) je na *obr. 6*. Z analýzy pravděpodobnosti překročení požadovaných průtoků v Blšance vyplynulo, že nejhorší situace nastává během měsíce srpna. V současnosti se zabezpečení hodnoty  $Q_{mz}$  v srpnu pohybuje v rozmezí 80–90 %. S výhledem do budoucnosti při navýšení požadovaného průtoku o potřeby vody pro závlahu by se tato hodnota mohla pohybovat v rozsahu 60–70 % podle optimistického scénáře, nebo též pouze kolem 40 % podle pesimistického scénáře. Je tedy zřejmé, že pro zachování  $Q_{mz}$  pro uspokojení potřeb vody pro závlahu by bylo nutné nadlepšovat přirozené průtoky v Blšance.

Objem vody, který by bylo potřeba zadržet pro uspokojení požadavků na vodu, byl řešen pomocí metody nedostatkových objemů. Pro výpočet byl použit program EXDEV (Řiřička, J. a Novický, O., 1994). Výsledek pro Liboc pro současné podmínky je znázorněn na *obrázku 7*. Maximální deficit za období 1968–2008 stanovený pro průtoky v Blšance dosahuje 0,51.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, pro Liboc za období 2001–2007 je maximální deficit 0,38.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. S výhledem do budoucnosti při použití odtokových řad ovlivněných klimatickou změnou a pro průtok navýšený o potřeby vody pro závlahu by se hodnota nedostatkového objemu pro Blšanku pohybovala v rozmezí 3,26.10<sup>6</sup> až 5,75.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> při zabezpečení 95 %.

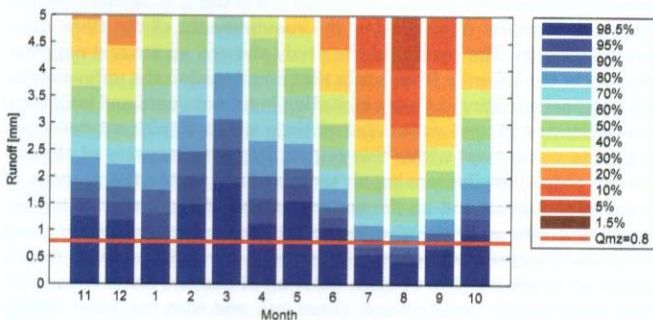
## Návrh opatření

Na základě výše popsaných výsledků je možné přistoupit k návrhu opatření. Tato opatření vedou ke zvýšení akumulace vody v povodí a lze je rozdělit na opatření hydrotechnická a opatření v krajině. První možnost, která přichází v úvahu, je obnova vodohospodářské funkce existujících závlahových nádrží, které byly postaveny pro potřeby závlah a v současné době jsou pronajaty pro chov ryb (nádrže Vidhostice, Blatno, Sedlec, Kryský rybník, Očihov aj.). S výhledem do budoucnosti a s uvažováním vyšších požadavků na vodu by však jejich celkový zásobní objem nebyl dostatečný. Další možností, jak posílit akumulační schopnost povodí, je realizace nových víceúčelových nádrží. Bylo provedeno základní vodohospodářské řešení funkce nádrže pro profily, jež jsou uvedeny ve Směrném vodohospodářském plánu jako potenciálně vhodné pro výstavbu nové nádrže (tzv. hájené lokality – Hlubocká Píla, Mětikalov a Vojnín na Liboci a nádrž Kryry na Blšance – *obr. 8*). Vzhledem k rozložení srážek po ploše povodí by byl nevhodnější profil pro nádrž Hlubocká Píla v povodí toku Liboc. Profil je vhodný rovněž vzhledem k tomu, že leží na území vojenského újezdu a v oblasti plánované zátopy se nevyskytuje žádná zástavba.

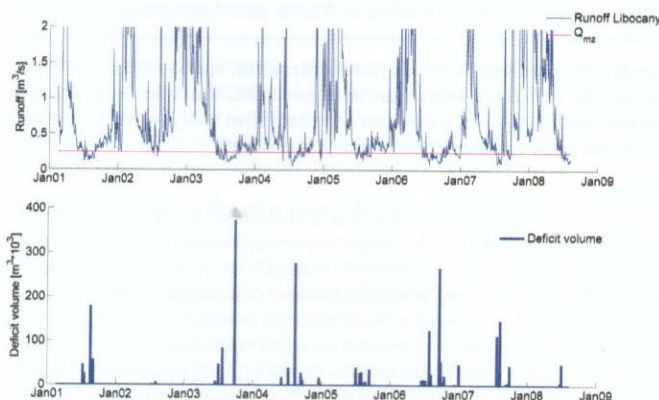
V povodí Blšanky přichází v úvahu nádrž nad Kryry na Podvineckém potoce. Bylo však doporučeno zmenšit původně uvažovaný objem nádrže, aby nedošlo k zatopení některých objektů a komunikace.

Dále bylo provedeno vyhodnocení morfologie terénu a byly vyhledány nové lokality, jež by byly vhodné pro realizaci městských závlahových nádrží. Podmínkou výběru je nezatopení současné zástavby a maximální možný objem při minimální zatopené ploše. Z několika navržených lokalit je nevhodnější lokalita na Blšance nad soutokem s Mlýneckým potokem v horní části povodí.

Schopnost povodí akumulovat vodu je dána nejen velikostí zásobních prostorů umělých nádrží, ale především retenční kapacitou půdního profilu a podzemních zvodní. Zvýšení retenční schopnosti krajiny vede ke zmírnění dopadů hydrologických extrémů (Novický, O. aj., 2009). Povodí Blšanky i Liboce jsou intenzivně zemědělsky využívána. Scelování pozemků a meliorační opatření prováděná před rokem 1989, pojezd těžké zemědělské techniky – to vše vede k dlouhodobému snížení infiltrační schopnosti půdního profilu, zrychlování povrchového odtoku a zvyšování erozní ohroženosti půdy. Pro zvýšení míry infiltrace a zpo-



**Obr. 6.** Pravděpodobnostní pole znázorňující hodnotu pravděpodobnosti překročení minimálního zůstatkového průtoku pro jednotlivé měsíce v roce za období 1991–2006



**Obr. 7.** Stanovení maximálního nedostatkového objemu pro Liboc na základě porovnání průtokové řady a hodnoty minimálního zůstatkového průtoku





Obr. 8. Mapa povodí Liboce a Blšanky s lokalitami hájenými pro případnou výstavbu vodní nádrže

malení odtoku z povodí existuje řada protierozních a revitalizačních opatření, např. vhodné rozmístění pěstovaných kultur, zatravnění drah soustředěného odtoku, výsadba remízků, stavba polních cest, průlehu, zasakovacích pásů kolem vodotečí aj. Dále je možno zavádět šetrné agrotechnické postupy – např. setí do strniště, pěstování mezipodin, zelené hnojení aj. Opatření v krajině je třeba uskutečňovat systémově pro celé povodí nebo dílčí povodí. Účinnost těchto opatření však nelze jednoznačně určit. Tato opatření je třeba realizovat v návaznosti na hydrotechnická opatření.

### Závěr

V rámci studie bylo provedeno vyhodnocení hydrologických poměrů a potřeb vody na povodí jednak pro současný stav a dále s výhledem do budoucnosti. Na základě výsledků byla navržena opatření, která by pomohla řešit problémy spojené s nedostatkem povrchových vod. Bylo zjištěno, že především v povodí Blšanky došlo v posledních několika letech k poklesu průtoků jednak z důvodu počínajících nepříznivých dopadů klimatické změny, dále zaklesnutí hladiny podzemních vod v dolní části povodí a také rostoucí potřebou vody pro zavlažování chmelnic. S výhledem do budoucnosti se dá očekávat další zhoršování současného nevyhovujícího stavu povrchových vod. Opatření, jež by měla být realizována, spočívají především v obnovení vodohospodářské funkce stávajících závlahových nádrží pro zajištění závlahové vody a nadlepšování průtoků v období hydrologického sucha. V současnosti je tato funkce omezena a nádrže jsou nyní využívány především pro chov ryb. Další možností je vybudování nových nádrží. V povodí Blšanky byly doporučeny dvě nádrže, na Podvineckém potoce nad obcí Kryry a nově vytipovaná lokalita na Blšance nad soutokem s Mlýneckým potokem. Pro celou oblast je klíčová nádrž Hluboká Pila na Liboci, pro posílení vodnosti Blšanky by však musel být realizován převod vody. Hydrotechnická opatření by měla být vhodně doplněna opatřeními v krajině pro zvýšení její přirozené retenční schopnosti.

## METODY HODNOCENÍ ÚČINKŮ PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ NA N-LETÉ PRŮTOKY

Ladislav Kašpárek

### Klíčová slova

řady maximálních průtoků, N-leté průtoky, protipovodňová opatření

### Souhrn

V článku je popsán současný stav, kdy jsou N-leté průtoky používány jako návrhová data standardně poskytovaná pro hydrologický režim, neovlivněný protipovodňovými opatřeními. Je navržen postup, kterým lze pomocí hydrologického, popř. hydraulického modelování vliv protipo-

### Poděkování

Článek byl zpracován na základě Studie potřeb vody pro povodí vodních toků Blšanka a Liboc, která byla financována z prostředků Povodí Ohře, s.p. Pro zpracování příspěvku byly dále použity výsledky získané v projektu NAZV 81331 – Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech ČR realizovaného z prostředků Ministerstva zemědělství ČR.

### Literatura

- Dostál, T. aj. Posouzení disponibilních vodních zdrojů pro závlahu chmelařských oblastí Žatecko, Úštěcko a Tršicko. Praha : ČVUT v Praze, 2008.
- Kašpárek, L. a Mrkvičková, M. Studie potřeb vody pro povodí vodních toků Blšanka a Liboc (závěrečná zpráva). Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský, 2009.
- Novický, O. aj. Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech České republiky (příloha k periodické zprávě za rok 2008). Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský, 2009.
- Procházka, M., Deyl, M., and Novický, O. Technology for Detecting Trends and Changes in Time Series of Hydrological and Meteorological Variables – user manual. Praha : Český hydrometeorologický ústav, 2001.
- Řiřička, J. a Novický, O. Experiments with deficit volumes – program description. Praha : Český hydrometeorologický ústav, 1994.

Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Magdalena Mrkvičková  
VÚV T.G.M., v.v.i., Praha  
ladislav\_kasperek@vuv.cz, magdalena\_mrkviczkova@vuv.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

### Key words

adaptation measures, climate change impacts, preserved localities, water scarcity, irrigation, non-structural measures

*Hydrological study of climate change impacts on Blšanka River basin and proposal of adaptation measures (Kašpárek, L., Mrkvičková, M.)*

The Blšanka and Liboc River basins belong to the driest regions of the Czech Republic. In the last few years, problems with surface water scarcity in Blšanka River basin are getting worse. Low water level causes deterioration of water quality and restrictions or surface water abstraction are more frequent especially during the growing season. Furthermore, the ecological function of the river is not fulfilled satisfactorily. It can be expected that with ongoing impacts of climate change the situation will be more critical. The paper describes results of a hydrological study that was carried out in the T. G. Masaryk Water Research Institute according to the requirements of the Ohře River Basin Authority. The results of the study showed up several negative aspects in the Blšanka River basin that could lead to the unfavourable hydrological situation. Low precipitation in recent years and long term overestimated ground water abstractions led to significant decrease in ground water level within this region. Negative impacts of climate change (especially increasing air temperature) fasten the process of evapotranspiration and so the water demand of vegetation is higher. Increasing rate of irrigated agricultural area brings additional need for surface water abstractions. To improve current situation, it was proposed to recover the storage function of current water reservoirs that were already built several years ago and that are used mainly for fish farming at this moment. Other possibility is to construct new small reservoirs for storage of water for irrigation. The technical measures should be combined with policy measures (water pricing policy, registering of abstracted amount of water) and non-structural measures in landscape leading to higher water retention.

vodňových opatření na tocích (retenční nádrže, suché nádrže, ochranné hráze) na velikost N-letých průtoků posoudit. V článku jsou uvedeny ukázky použití takového postupu při řešení vlivu velkých údolních nádrží v povodí Labe na snížení povodňových průtoků.

### 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 dobám opakování. Funkce překročení kulminačních průtoků je sestavena z řady maximálních kulminačních průtoků za každý hydrologický rok. V rozmezí 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 správy 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.

Neovlivněné 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, je použití neovlivněných N-letých průtoků pro některé účely nelogické, například pro zpracování záplavových území podle vyhlášky č. 236/2002 Sb., o způsobu a rozsahu zpracovávání návrhu a stanovování záplavových území. Pokud protipovodňová opatření vedou ke zmenšení N-letých průtoků, měl by se jejich vliv projevit zmenšením rozsahu záplavových území. 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 časem doznávat různých změn. Vliv protipovodňových opatření, která jsou závislá na pravidlech obsažených v manipulačních řádech, lze stanovit na základě jejich existujících, popř. předpokládaných změn. Při využívání N-letých průtoků pro rozhodnutí s dlouhodobými následky, například o výstavbě v inundačním území, bude v konkrétních případech vhodné posoudit riziko zmenšení účinku protipovodňového opatření díky změnám v manipulačním řádu. Taková možnost existuje zejména u víceúčelových vodních nádrží, kde může být pro posílení zásobní funkce redukován retenční účinek.

Další problém existuje v těch povodích, kde po celou dobu hydrologických pozorování existují malé vodní nádrže (rybníky) s významným retenčním účinkem. Při vyčíslení povodňových průtoků není jejich vliv eliminován, považuje se za součást přirozeného režimu. Při stanovení účinku protipovodňových opatření až na výjimečné případy, kdy 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. Problémem při zjišťování ovlivnění povodňových průtoků může být i změna využívání inundačního území (především změna zástavby) i významné změny v hodnoceném povodí, především, pokud půjde o malá povodí, ve kterých proběhla významná investiční aktivita (obytné satelity, průmyslové zóny, dálniční nebo železniční koridory). I vliv těchto změn by měl být přiměřeně posouzen.

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) je třeba vytvořit jednotnou metodiku a přístup k tvorbě těchto hydrologických dat a současně vytvořit v ČHMÚ podmínky, které zajistí naplňování všech vodohospodářských požadavků, ke kterým je Česká republika zavázána. Návrh metodického postupu pro stanovení změny N-letých maximálních průtoků v říční síti následkem protipovodňových opatření byl proto zařazen jako jeden z dílčích úkolů výzkumného záměru MZP0002071101 „Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahu a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů“. Řešení tohoto dílčího úkolu začalo v roce 2009, a je tedy v počáteční fázi. Účelem tohoto článku je seznámit vodohospodářskou veřejnost se základními principy, které budou rozvíjeny a ověřovány při dalším řešení úkolu.

## Problematika ovlivnění povodňových průtoků

Posouzení vlivu základních typů 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 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 doby opakování N. Metodika jejich stanovení je popsána

v referátu Boháč, Kašpárek a Kulasová (2001). Při tomto přístupu k odvození velkých teoretických povodňových vln je vyjádřeno, že povodně se stejně obvyklým kulminačním průtokem mohou mít rozdílný objem.

Běžně je účinek využití retenčního objemu nádrže posuzován jen pro profil toku bezprostředně pod nádrží. Posouzení pro nějaký vzdálený profil na toku pod nádrží nebo na soustavu takových profilů má již charakter vodohospodářských studií, které vycházejí z různých metodických přístupů.

Předmětem metodiky, kterou připravujeme, 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. Poznatky o tom, jak se vytváří průběh povodňové vlny 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. Opačnou výjimkou jsou případy, kdy rozvodnění na jednom toku způsobí dočasnou změnu směru proudění na druhém toku. Například při květnové povodni v roce 1872 proudila voda z extrémně rozvodněné Berounky Vltavou „proti proudu“, obdobně při povodni v srpnu 2002 tekla po řadu hodin voda z Vltavy řečištěm Labe nad Mělníkem, viz Katastrofální povodeň (2005). Z toho, že nelze aritmeticky sčítat N-leté průtoky, můžeme usuzovat, že nelze aritmeticky sčítat ani jejich změny způsobené účinky jednotlivých opatření.

Přiměřeně spolehlivé řešení musí být založeno na posuzování účinku protipovodňových opatření v soustavě říční sítě. Ta musí být rozčleněna minimálně v profilech, kde se nacházejí protipovodňová opatření, a v profilech vodoměrných stanic, popř. i v profilech soutoků dílčích toků. Do dalších profilů mohou být získané poznatky o změně N-letých průtoků interpolovány nebo extrapolovány.

## Posouzení vlivu protipovodňových opatření na základě simulací povodňových situací deterministickým modelem a následným statistickým zpracováním N-letých průtoků

Stanovení N-letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními lze provést kombinací deterministického a statistického přístupu. Deterministický model soustavy je složen z dílčích modelů jednotlivých protipovodňových opatření, modelů proudění vody v řečištích, transformace povodně v inundačních, popř. srážkoodtokových modelů. Simulací povodňových situací lze pomocí tohoto modelu stanovit účinek protipovodňových opatření, tj. zejména zmenšení kulminačních průtoků pro jednotlivé povodňové případy. Zpracování je třeba provést ve dvou alternativách – ve stavu povodí bez protipovodňových opatření a ve stavu zahrnujícím protipovodňová opatření.

Z výsledků simulací se pro statistické zpracování použijí obě alternativy řad kulminačních průtoků v profilech vodoměrných stanic, vyhodnotí se N-leté průtoky pro stav bez protipovodňových opatření a pro stav zahrnující protipovodňová opatření. Rozdílné N-letých průtoků z obou alternativ udává zmenšení N-letých maximálních průtoků vlivem protipovodňových opatření.

N-leté průtoky pro stav bez protipovodňových opatření však většinou nebudou totožné s těmi, které jsou v dané vodoměrné stanici zpracovávány jako platná data, neboť pro popsání simulací výpočty zpravidla nebudou k dispozici data v rozsahu celého pozorování průtoků a nebudou použity historické povodně. Zmenšení N-letých průtoků odhadnuté simulačními výpočty proto použijeme po dohodě s ČHMÚ k úpravě platných N-letých průtoků, získaných standardním zpracováním. Pro efektivní použití popsané metody je velmi podstatné vymežit nezbytný typ a rozsah vstupních dat na straně jedné (jejich příprava je pracná) a ověřit přípustnou míru zjednodušení deterministických modelů.

### Vstupní data

Popsaný postup vyžaduje jako vstupní data informace o časovém průběhu povodňových průtoků v řešené soustavě profilů pro řadu povodní z dlouhodobého období, doplněnou o dostupný popis srážek, popřípadě o popis průběhu tání sněhu, které povodeň způsobily. Při řešení vlivu protipovodňových opatření na N-leté průtoky je třeba vzít do úvahy skutečnosti, které vyplývají z časové, prostorové a genetické rozdílnosti povodní.

Obecně platí, že letní povodně mají jiný charakter než povodně zimní. Pro některé účely poskytuje ČHMÚ N-leté průtoky zpracované odděleně pro povodně buď z letního, nebo ze zimního pololetí. Pro posouzení, zda při řešení vlivu protipovodňových opatření je třeba letní a zimní povodně zpracovat odděleně, nestačí porovnávat N-letých kulminačních průtoků. Záleží také na trvání a objemu povodní. Případ, kdy by v celém rozsahu dob opakování N-letých průtoků (tj. 1 až 100 let) byly průběhy letních a zimních povodní s přijatelnou mírou shodné, je velmi vzácný. Pokud



předmětem řešení bude posoudit vliv protipovodňových opatření na N-leté průtoky v celém rozsahu, je jej třeba posoudit pro oba typy povodní odděleně a výsledky statistickým postupem sloučit.

Skladba průtoků v soustavě vodních toků je značně závislá na plošném rozložení deště, který povodeň způsobil nebo se na jejím vzniku podílel. To platí zejména u letních povodní, ale i u části povodní ze zimního pololetí. Sestavit srážkoodtokový model povodí příslušející uvažované soustavě toků je možné pouze pro období, kdy jsou k dispozici dostatečně podrobné údaje o časovém průběhu srážek. Příklady takových řešení jsou studie Starý a Březková (2002, 2003, 2006). Srážkoměrné údaje ze starších období jsou však dostupné téměř výhradně jen v denních úhrnech. Taková hrubá data bylo možné použít pro výpočty v některých dílčích povodích a obdobích při řešení vlivu vltavské kaskády a nádrže Nechranice na N-leté průtoky Vltavy v Praze a Labe pod Vltavou ve studii Kašpárek a kol. (2005). Řešení pro povodí s plochou podstatně menší by bez podrobnějších srážkových dat bylo zatíženo značnými chybami.

Vzhledem k tomu, že většina vodoměrných stanic byla dlouhodobě vybavena limnigrafy, jsou časové průběhy povodní například v hodinovém kroku v mnoha stanicích k dispozici, nebo je lze sestavit. Průběhy povodňových průtoků pozorovaných během povodní, sestavené z případů ročních (nebo sezonních maxim) jsou základem i pro odvozování průběhu teoretických návrhových N-letých povodní. Rozdíl je jen v tom, že při řešení v soustavě potřebujeme vždy pro jednu povodňovou situaci průběhy ze všech uvažovaných stanic. Pro výběr situace z případů v jednom roce (nebo sezoně) je vhodné jako kritérium výběru použít maximální průtok ve zvolené vodoměrné stanici (nemusí být závěrová). Je zřejmé, že právě z důvodů rozdílného rozložení přírodních srážek na povodí se ve všech vodoměrných stanicích nevyskytují maxima za stejné povodně ve stejné povodňové situaci. Při tomto přístupu k řešení se srážkoodtokové modelování jeví jen jako prostředek pro doplnění údajů, které z průtokových dat nemáme k dispozici (pro dílčí povodí bez pozorování průtoků nebo doplnění dat chybějících v části použitého období). Průběhy povodní ve vodoměrných stanicích jsou ovlivněny rozložením srážek a je možné je pro posouzení vlivu protipovodňových opatření použít.

### Model soustavy

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 rozlivech, modelů různých typů protipovodňových opatření, popř. srážkoodtokových modelů.

Pro každý z uvedených dílčích modelů existuje několik variantních metodických přístupů, které se liší zejména mírou zjednodušení fyzikálního popisu modelovaného jevu. Jako příklad lze uvést, že pro popis transformace povodňové vlny při jejím průchodu úsekem řeky můžeme kromě relativně jednoduchých metod (jsou nazývány hydrologické), jako Muskingum, Kalinin-Miljukov, Muskingum-Cunge, transport-difuzní rovnice, použít také hydraulické 1-d modely, popř. 2-d hydraulické modely. Samozřejmě platí, že čím je v modelu použitý popis jevu bližší fyzikální podstatě jevu, tím je složitější a náročnější na vstupní data. Parametry modelů hydrologického typu je v některých případech možné zjistit na základě pozorování průtoků nebo souhrnných charakteristik morfologie řečiště a inundace, které lze získat z dostupných digitálních modelů terénu. Hydraulické modely nelze použít bez poměrně podrobného popisu morfologie řečiště i inundačních území. Podrobný přehled a rozbor modelů transformace hydrogramu typu „storage flood routing“ obsahuje práce Kousis (2009). V závěru její autor konstatuje, že tyto metody jsou stále hojně využívány, ačkoliv jejich menší výpočetní náročnost není dnes podstatná. Důvody shledává v efektivnosti těchto metod zejména při využití jako komponent v komplexních srážkoodtokových modelech a jednoduché struktuře, která umožňuje uživatelům pochopit, jak model pracuje, a není tedy pro ně „numerickou černou skříňkou“.

Obdobná je situace v oblasti srážkoodtokových modelů, kde existuje řada algoritmů od jednoduchých koncepčních modelů se soustředěnými parametry až po fyzikálně precizované modely, včetně modelů s rozproštěnými parametry. Velmi podstatný je závěr studie autorů Perrin, Michel, and Andréassian (2001), kteří pro 19 modelů s denním krokem, s počtem parametrů 3 až 9 (složitější byly už předem vyloučeny) a při aplikaci modelů na 429 povodí posuzovali, zda modely s větším počtem parametrů jsou vhodnější. Jejich studie vedla k následujícím závěrům. Při kalibraci jsou modely s větším počtem parametrů schopné lépe vystihnout pozorovaná data, při verifikaci to neplatí. Modely s menším počtem parametrů dávají výsledky srovnatelné s komplexnějšími modely. Komplexnější modely jsou méně robustní, komplexnost nezaručuje dobré a spolehlivé výsledky. Počet volných parametrů více než 5 nevede k lepší schopnosti modelu.

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

Základní typy protipovodňových opatření, která mohou přispět ke zmenšení kulminačního průtoků, jsou transformace povodně v retenčním

prostoru vodní nádrže, zachycení části povodňové vlny v suché nádrži nebo řízení inundací, odvedení části povodňové vlny do jiného povodí, resp. nádrže na jiném toku. Opačným směrem, tj. potenciálně zvětšením povodně v říční trati pod protipovodňovým opatřením, mohou působit nově zřízené ochranné hráze (stabilní i dočasné). Voda, která by se do chráněného území rozlila, zůstává po zřízení hráze v řece a zvětšuje objem povodňového odtoku. Ochrana pomocí hrází se v současné době uplatňuje většinou jen ve městech. Objem vody odpovídající prostoru za hrází je většinou vzhledem k objemu významnějších povodní malý, takže potenciální zvětšení povodní v navazujícím úseku toku je zanedbatelné. Studie Helmse et al. (2002) na příkladu povodně z roku 1954 na Labi v profilu Wittenberge ukazuje, že pokud by se i rozsáhlá retenční plocha 9 464 ha (15 lokalit) zaplavovala postupně v celém průběhu vzestupné větve povodně, zmenšení kulminačního průtoků by bylo zanedbatelné.

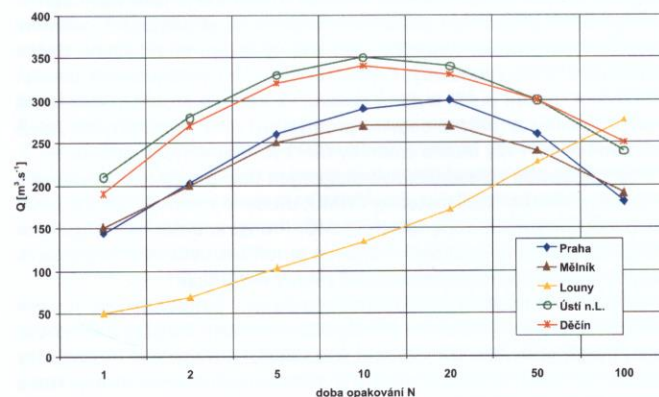
Při sestavení modelu soustavy, ve které se má řešit vliv protipovodňových opatření na N-leté průtoky, je racionální vzít do úvahy, že pro základní kostru říční sítě existují v ČR modely využívané předpovědní povodňovou službou ČHMÚ nebo dispečinky podniků Povodí. Zkušenosti z projektu, o kterém informuje publikace Kašpárek aj. (2005), ukazují, že využitím modelů tohoto typu lze zmenšit pracnost sestavení modelu vhodného pro řešení naší úlohy. Podstatné úpravy a rozšíření prognózních modelů jsou však nezbytné.

### Statistické vyhodnocení výsledků modelování

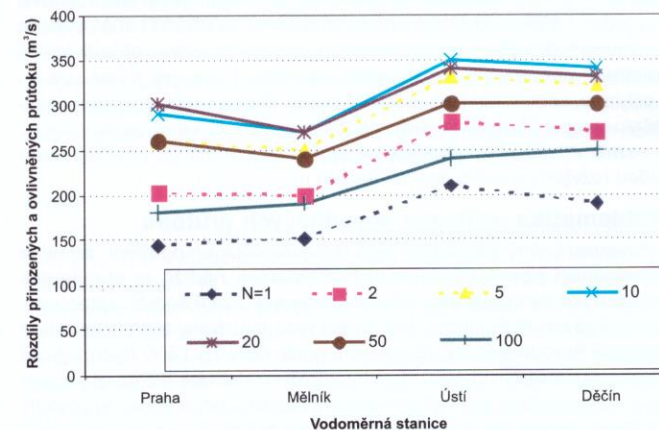
Pro statistické vyhodnocení obou alternativ kulminačních průtoků (bez vlivu protipovodňových opatření a s jejich vlivem) lze využít standardní postupy, popsané v metodikách ČHMÚ. Spočívají v odhadu pravděpodobnosti překročení maximálních průtoků na základě řad ročních nebo sezonních maximálních kulminačních průtoků. Zpracování se provádí pomocí programu Lnwin, který využívá teoretická logaritmicko-normální rozdělení LN2 a LN3 s několika metodami odhadu parametrů včetně oprav výběrových charakteristik rozdělení o systematické vychýlení.

Rozdíly N-letých průtoků odpovídající vlivu protipovodňových opatření jsou samozřejmě závislé na době opakování N (viz příklad na obr. 1). Mění se i při postupu v říční soustavě (obr. 2). Oba obrázky jsou převzaty z publikace Kašpárek aj. (2005).

Na obr. 1 je vidět, že retenční účinek vltavské kaskády je největší u povodní s dobou opakování cca 10 až 20 let. Malé povodně kaskáda zadržuje jen do té míry, aby říční síť prošla bez problémů. Pro radikální zmenšení extrémně velkých povodní pak již retenční prostory vltavské



Obr. 1. Průběh rozdílu přirozených a ovlivněných N-letých průtoků ve vodoměrných stanicích Praha (Vltava), Mělník, Ústí nad Labem a Děčín (Labe) a Louny (Ohře)



Obr. 2. Průběh rozdílu přirozených a ovlivněných N-letých průtoků ve vodoměrných stanicích na Vltavě a Labi pod soutokem s Vltavou



kaskády nestačí. Zcela jiná je situace na Ohři, kde zmenšení kulminačního průtoku roste s dobou opakování v celém posuzovaném rozsahu. Retenční schopnost nádrže Nepravice je vzhledem k povodním na Ohři účinná i v případě stoleté povodně.

Obrázek 2 ukazuje, že zmenšení N-letých průtoků v profilu Labe-Mělník, tj. pod soutokem s Vltavou, je v případě povodní s dobou opakování 10 až 50 let poněkud menší než na Vltavě v Praze, což odpovídá teoretickým předpokladům. U povodní ostatních dob opakování se zmenšení N-letých průtoků mezi Prahou a Mělníkem téměř nemění, patrně je v rozmezí nepřesností výpočtů.

Princip výše popsaného postupu posouzení vlivu protipovodňových opatření na N-leté průtoky je po metodické stránce známý a ve studii Kašpárek aj. (2005) ověřený. Problémem je, že příprava dat, sestavení modelu řešené soustavy i simulační výpočty jsou pracná a nákladná. Úlohou dalšího výzkumu je proto nalézt minimální přijatelný rozsah vstupních dat a co nejméně náročné a přitom danému účelu vyhovující dílčí modely pro sestavení modelu řešené soustavy.

### Další možnost posouzení vlivu protipovodňových opatření na N-leté průtoky

V některých případech přichází do úvahy i další možnost řešení, která by využila metodický přístup, jenž je používán v ČHMÚ pro vyrovnání základních charakteristik rozdělení pravděpodobnosti kulminačních průtoků v říční síti. Jeho odvození a původní verzi obsahuje publikace Novický, Kašpárek a Kolářová (1992). Podstatou řešení je, že v soustavě soutokových uzlů (soutokový uzel je definován jako soutok dvou toků a také jako fiktivní soutok průtoků v toku s přítokem z mezipovodí) se určují koeficienty zmenšení  $C(N)$

$$C(N) = Q_d(N)/(Q_h(N) + Q_p(N)),$$

kde  $Q_d(N)$ ,  $Q_h(N)$  a  $Q_p(N)$  jsou N-leté průtoky (nebo jejich statistické charakteristiky) v profilu pod soutokem, v hlavním toku nad soutokem a v přítoku nad soutokem označené indexy  $d$ ,  $h$ ,  $p$ .

Pro odhad koeficientů  $C(N)$  se využívají jednak regresní rovnice, ve kterých se jako nezávisle proměnné uplatňují fyzicko-geografické charakteristiky povodí a zejména skutečnost, že výsledkem skladby N-letých průtoků (nebo jejich charakteristik) by se měl co nejvíce blížít k hodnotě vyhodnocené z pozorování v profilu závěrové vodoměrné stanice. Prozatím není jasné, zda a popřípadě za jakých podmínek by bylo možné koeficienty  $C(N)$ , získané při řešení neovlivněných průtoků v konkrétní soustavě, použít při výpočtu skladby v téže soustavě i pro průtoky ovlivněné protipovodňovými opatřeními. Pokud by to bylo možné, stačilo by pomocí simulací deterministickým modelem a následným statistickým zpracováním vyřešit změnu N-letých průtoků jen pro profily toku ležící bezprostředně pod protipovodňovou stavbou. Požadavky na vstupní data i rozsah modelů by se podstatně zmenšily. Další výsledky výzkumu by měly prokázat, zda tento přístup bude použitelný.

### Závěr

Stanovení N-letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními lze provést kombinací deterministického a statistického přístupu. Deterministický model soustavy, složený z dílčích modelů jednotlivých protipovodňových opatření, modelů proudění vody v řečištích, transformace povodně v inundacích, popř. srážkoodtokových modelů se použije pro simulaci povodňových situací, ze kterých se ukáže účinek protipovodňových opatření, tj. zejména zmenšení kulminačních průtoků pro jednotlivé povodňové případy. Z výsledků simulací se pro statistické zpracování použijí dvě alternativy řad kulminačních průtoků v profilech vodoměrných stanic, vyhodnotí se N-leté průtoky pro stav bez protipovodňových opatření a pro stav zahrnující protipovodňová opatření. Rozdíly N-letých průtoků obou alternativ udávají zmenšené N-letých maximálních průtoků vlivem protipovodňových opatření. Tento postup je metodicky jasný a ověřený, ale velmi pracný.

## MOŽNÉ ZVÝŠENÍ TEPLoty VODY NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

Oldřich Novický, Pavel Tremel, Ladislav Kašpárek, Stanislav Horáček

### Klíčová slova

teplota vody, trendová analýza, regresní analýza, program CTPA, klimatická změna

### Souhrn

Příspěvek popisuje užití dvou odlišných přístupů pro odhad ročních hodnot teplot vody na území České republiky v časovém horizontu roku

Předmětem dalšího výzkumu bude proto jednak nalézt minimální přijatelný rozsah vstupních dat a co nejméně náročné a přitom danému účelu vyhovující dílčí modely pro sestavení modelu řešené soustavy a dále ověřit možnost využít pro řešení skladby průtoků v říční síti princip, založený na vyrovnání základních charakteristik rozdělení pravděpodobnosti kulminačních průtoků v říční síti, používaný při zpracování N-letých průtoků v ČHMÚ.

### 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.
- Hems, M., Büchele, B., Merkel, U., and Ihringer, J. (2002) Statistical analysis of the flood situation and assessment of the impact of dike/dike measures along the Elbe (Labe) river. *Journal of Hydrology*, 267, p. 94–114.
- Kašpárek, L., Novický, O., Jeníček, M. a Buchtele, Š. (2005) Vliv velkých údolních nádrží v povodí Labe na snížení povodňových průtoků. Praha: VÚV T.G.M., 44 s. ISBN 80-85900-56-4.
- Koussis, AD. (2009) Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), p. 43–61.
- Novický, O., Kašpárek, L. a Kolářová, S. (1992) Hydrologická data pro návrhové účely. Světový klimatický program – voda. Praha: ČHMÚ, 143 s.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2001) Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242, p. 275–301.
- 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.
- Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002 a návrh úpravy systému prevence před povodněmi (výsledná zpráva o projektu VÚV T.G.M.). Praha: MŽP, 2003, 85 s.

### 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 a ověření metodiky pro změnu N-letých průtoků vlivem protipovodňových opatření zahrnuté do oddílu A (hydrologie).

Ing. Ladislav Kašpárek, CSc.  
VÚV T.G.M., v.v.i, Praha  
e-mail: ladislav\_kasperek@vuv.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

### Key words

maximum flow series, N-year floods, flood protection measures

*Methods for assessing flood protection measures to reduce N-year floods (Kašpárek, L.)*

The paper describes current practices which use N-year floods, derived for conditions not affected by flood protection measures, for design purposes and proposes methods, which are based on hydrological and hydraulic modelling and can be used for incorporating the affects of the measures (retention reservoirs, dry reservoirs, protection dikes) into derivation of the N-year floods. The paper also illustrates the application of the methods for large reservoirs in the Elbe River basin.

2050. První přístup využívá pro odhad ročních teplot v roce 2050 výsledků provedené analýzy trendů teploty vody pomocí programu CTPA (Change and Trend Problem Analysis). Druhý přístup odvozuje teploty vody na základě kombinace použitých scénářů klimatických změn spolu s využitím poznatků o regresní závislosti teploty vody na teplotě vzduchu.

### Úvod

Budoucí nárůst teploty povrchové vody lze odhadnout na základě vztahů odvozených mezi teplotou vody, teplotou vzduchu, průtokem, popř. pomocí dalších proměnných. Mohseni et al. [5] upozorňuje na fakt, že graf závislosti teploty vody na teplotě vzduchu má S-křivkový tvar. Neumann et al. [7] použili na Truckee River v Kalifornii a Nevadě empirický model předpovědi denních maximálních teplot vody pro letní období. Výsledky jejich studie ukázaly, že teplotu vody lze predikovat pomocí jednoduché



lineární regrese, vztahu založeném na průtoku a teplotě vzduchu. Zkoumali i nelineární regresní vztahy pro výpočet teploty vody, ale tento přístup žádné významné zlepšení predikce teploty vody nepřinesl.

V Rakousku zkoumali teplotu vody Webb a Nobilis [10]. Zjistili, že po roce 1970 a zejména v posledních deseti letech 20. století rostly teploty vody rychleji než v předcházejícím období. To může souviset s nástupem globálního oteplování.

Pekárová a Halmová [8] použily ke studiu denních hodnot teploty vody na Dunaji v Bratislavě v období let 1926–2005 program CTPA (Change and trend problem analysis) [9]. Ukázalo se, že v období let 1981–2005 teplota vody stoupala během sezony od června do prosince, s hlavním nárůstem v srpnu.

Teplota vody ve vodních tocích je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících kvalitu vody. Má zásadní vliv na druhovou rozmanitost a zdravotní stav vodních ekosystémů [6]. Platí, že vyšší teploty vzduchu vedou i ke zvyšování teploty vody. V kombinaci s malými průtoky dochází k menšímu ředění znečišťujících látek, což může mít závažné důsledky pro kvalitu vodních zdrojů [2]. Toky tak trpí zvýšenou eutrofizací stanovišť, ztrátou biodiverzity, důsledkem je i snížení množství a kvality pitné vody a zdrojů vody, zhoršení podmínek pro rekreační aktivity souvisejících s vodou atd.

Citlivost dopadu klimatických změn na kvalitu vody hodnotil i Ducharne [1]. Ten ke svým výzkumům na řece Seině ve Francii použil biogeochemický model RIVERSTRAHLER. Výsledky ukázaly, že v důsledku oteplování vody se snižuje koncentrace rozpuštěného kyslíku a současně se zvyšuje množství fytoplanktonu. Proto se snižuje i biologická rozmanitost ryb a podle Kyle a Brabetse [4] se zvýší i výskyt chorob v rybí populaci. Tento trend pozorovali na vodních tocích Aljašky, kde studovali změny teploty vody a její vliv na zdraví rybí populace.

## Data

Data k výzkumu poskytli Český hydrometeorologický ústav. K testování trendů byly použity průměrné roční teploty vody z 56 vodoměrných stanic a průměrné roční teploty vzduchu z 53 povodí. U teploty vody začínaly teplotní řady většinou v 60. letech 20. století a končily v roce 2006. Nejdelší studovaná teplotní řada vody byla z Kroměříže (řeka Morava), kde byla k dispozici data pro období let 1921–2006. U teploty vzduchu začínaly teplotní řady nejčastěji v roce 1980 a končily v roce 2006. Nejdelší řada teploty vzduchu byla z období let 1851–2006 pro povodí Labe po Děčín.

Pomocí regionálních klimatických scénářů projektu PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) byl na dvou vybraných povodích (povodí Labe po Brandýs nad Labem a povodí Otavy po Píseku) proveden odhad teploty vzduchu pro časovou úroveň roku 2050. Jelikož jsou výstupy regionálních klimatických modelů projektu PRUDENCE počítány pro období 2071–2100, tj. se středem v roce 2085, bylo nutno tyto vypočtené hodnoty interpolovat k roku 2050.

Z projektu PRUDENCE byly použity dva regionální klimatické modely – model HIRHAM a model RCAO. Model HIRHAM je regionální klimatický model, který byl vyvinut v rámci společného projektu národních meteorologických služeb v Dánsku, Finsku, Irsku, Holandsku, Norsku, Švédsku, Španělsku a na Islandu. Využívá fyzikální parametrizace globálního cirkulačního modelu ECHAM vyvíjeného v Institutu Maxe Plancka v Hamburku. Model RCAO je model Rossbyho centra ve Švédsku, který se skládá z regionálního atmosférického modelu RCA a regionálního oceánického modelu RCO. Simulace modelu vycházejí z předpovědí globálního klimatického modelu HadAM3H britského Hadley centra. Námí použité regionální modely projektu PRUDENCE užívají emisní scénáře podle SRES IPCC – „pesimistický“ emisní scénář A2 a „optimistický“ emisní scénář B2.

## Metody

Nejprve bylo pomocí statistických testů pro všechny časové řady teplot vzduchu a teplot vody posouzeno, zda v těchto časových řadách existuje trend, či nikoliv. K tomuto testování byl použit počítačový program Change and Trend Problem Analysis (CTPA) [9], který byl vyvinut v Českém hydrometeorologickém ústavu jako součást projektu Hydrological Operational Multipurpose System (HOMS), a to v rámci činnosti Světové meteorologické organizace (WMO). Hlavním účelem programu CTPA je poskytnout nástroj pro detekci náhlých nebo postupných změn v analyzovaných časových řadách. Základními testovacími charakteristikami jsou střední

hodnota a rozptyl. Program však zahrnuje i testy pro detekci změny spektrální hustoty, autoregresních parametrů, parametrů lineární regrese dvou řad a mnoho dalších nástrojů. Program CTPA obsahuje i čtyři statistické testy trendů pro jejich analýzu [3]. Těmito statistickými testy jsou test přítomnosti trendu, test vzniku trendu, test změny směrnice trendu a test změny trendu.

Test přítomnosti trendu zjišťuje, zda směrnice přímků v modelu jednoduché lineární regrese je rovna 0. Alternativní hypotézou je, že je směrnice různá od 0. Vychází se z hypotézy, že se střední hodnota s časem nemění.

Test vzniku trendu zkoumá vznik kladného nebo záporného trendu za předpokladu spojitosti trendové přímků. Nulová hypotéza předpokládá řadu s neměnnou střední hodnotou, alternativní hypotézou je vznik trendu v bodě. Test počítá polohu tohoto bodu.

Test změny směrnice trendu testuje vznik zlomu v trendové přímce. Nulová hypotéza předpokládá existenci konstantního trendu, alternativní hypotéza počítá se změnou směrnice trendu, tj. se vznikem zlomu v trendové přímce.

Test změny trendu je obecný test trendu bez předpokladu spojitosti trendové křivky. Testuje se nulová hypotéza, že v řadě existuje konstantní trend, oproti alternativní hypotéze, že dochází k obecné změně parametrů trendové přímků (tj. může dojít ke změně obou parametrů popisujících trendovou přímkou) ve vypočteném bodě.

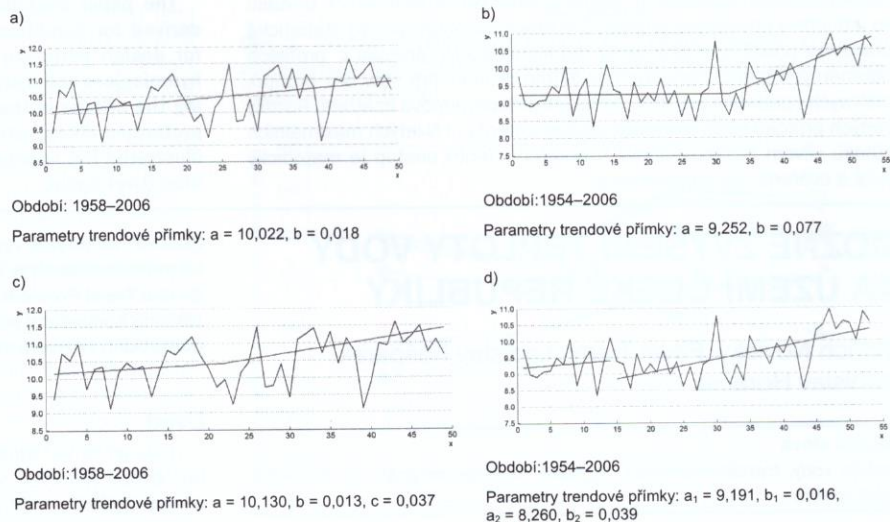
Příklady užití všech čtyř statistických trendů jsou ukázány na obr. 1. V případě, že byla trendová přímkou testu vzniku trendu rostoucí, je vyhodnocen rok vzniku trendu teploty.

Na dvou povodích (povodí Labe po Brandýs nad Labem, povodí Otavy po Píseku) byl vypočten pravděpodobný vzestup teploty vzduchu a teploty vody do roku 2050. Výpočet navázal na analýzu testu vzniku trendu. Na časovou řadu z období od roku vzniku trendu po konec datové řady byl aplikován test existence trendu. Z výstupu programu CTPA byla získána rovnice pro časový průběh teploty vzduchu (resp. teploty vody). Ta byla poté použita k odhadu vzrůstu teploty vody a teploty vzduchu v roce 2050.

Pro predikci vývoje teploty vzduchu a teploty vody byla použita dále metoda, která využívá výpočtů klimatických scénářů projektu PRUDENCE (použité regionální klimatické modely HIRHAM a RCAO, emisní scénáře A2 a B2). Na základě klimatických scénářů byla spočtena průměrná teplota vzduchu pro období let 2071–2100 (se středem v referenčním roce 2085). Zároveň byla provedena regresní analýza závislosti ročních hodnot teploty vody na hodnotách teploty vzduchu. Z této regresní analýzy byla získána regresní funkce závislosti teploty vody na teplotách vzduchu. Do regresní rovnice závislosti teploty vody na teplotě vzduchu byly dosazeny hodnoty vzrůstu teploty vzduchu pro jednotlivé klimatické scénáře. Takto byly pak vypočteny výsledné hodnoty vzrůstu teploty vody pro jednotlivé klimatické scénáře. Výsledné teploty vzduchu a vody pro rok 2050 byly získány interpolací hodnot mezi rokem 1975 (středem období let 1961–1990, z něhož jsou odvozeny klimatické scénáře) a odhadem pro referenční rok 2085.

## Výsledky

Výsledky testování trendů u teplot vzduchu a vody jsou zobrazeny na obr. 2 a shrnuty v tabulce 1. Většina datových řad teploty vzduchu a teploty vody (s výjimkou testu změny trendu teploty vzduchu) vykazuje rostoucí tendenci, přičemž u teploty vody (s výjimkou testu vzniku trendu)

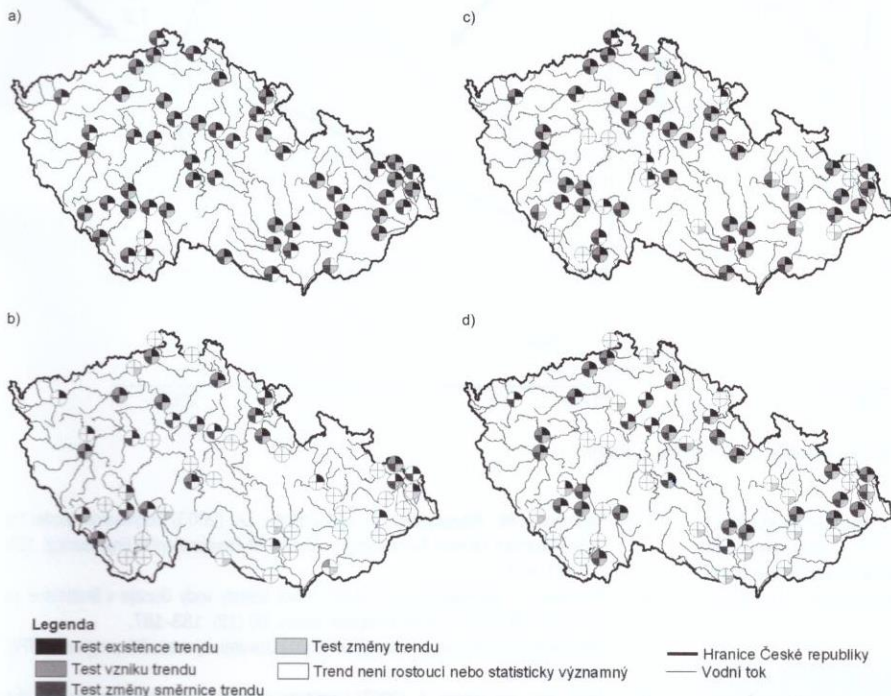


**Obr. 1.** Příklad užití jednotlivých testů trendů: a – test existence trendu (stanice Brandýs nad Labem, tok Labe), b – test vzniku trendu (stanice Dluhonice, tok Bečva), c – test změny směrnice trendu (stanice Brandýs nad Labem, tok Labe), d – test změny trendu (stanice Dluhonice, tok Bečva)



**Tabulka 1** Počet rostoucích testů trendů (v procentech)

Test	Rostoucí trendy u teploty vzduchu	Rostoucí trendy u teploty vody	Statisticky významné rostoucí trendy u teploty vzduchu	Statisticky významné rostoucí trendy u teploty vody
Test existence trendu	98	78	51	55
Test vzniku trendu	96	76	23	42
Test změny směrnice trendu	96	76	38	56
Test změny trendu	47	67	40	69



**Obr. 2.** Výsledky testování trendů: a – rostoucí trendy v teplotách vzduchu, b – statisticky významné rostoucí trendy v teplotách vzduchu, c – rostoucí trendy v teplotách vody, d – statisticky významné rostoucí trendy v teplotách vody

**Tabulka 2.** Parametry trendových přímk testu existence trendu od roku vzniku trendu do roku 2006 pro stanice Brandýs nad Labem a Písek

Stanice	Charakteristika	Data	Rok vzniku trendu	a	b
Brandýs nad Labem	voda	1958–2006	1979	0,038	10,281
Písek	voda	1958–2006	1984	0,064	8,660
Brandýs nad Labem	vzduch	1932–2006	1963	0,028	7,394
Písek	vzduch	1958–2006	1978	0,039	6,673

**Tabulka 3.** Rovnice regresních závislostí přepočtených ročních hodnot teplot vody pomocí rovnic teplot vzduchu

Stanice	Rovnice regresní přímk	Korelační koeficient
Brandýs nad Labem	$y = 0,9282 x + 3,2091$	0,8385
Písek	$y = 0,8497 x + 3,0213$	0,7619

**Tabulka 4.** Výsledky modelování dopadu klimatických změn na teplotu vzduchu pomocí použitých klimatických scénářů projektu PRUDENCE (teploty v tabulce jsou uvedeny ve °C)

Stanice	Model HIRHAM A2	Model HIRHAM B2	Model RCO A2	Model RCO B2	Průměr
Brandýs nad Labem	3,5	2,6	2,7	1,7	2,6
Písek	3,5	2,6	2,8	1,8	2,6

**Tabulka 5.** Výsledky modelování dopadu klimatických změn na teplotu vody pomocí kombinace použitých klimatických scénářů projektu PRUDENCE a regresní závislosti mezi teplotou vody a teplotou vzduchu (teploty v tabulce jsou uvedeny ve °C)

Stanice	Model HIRHAM A2	Model HIRHAM B2	Model RCO A2	Model RCO B2	Průměr
Brandýs nad Labem	3,4	2,5	2,7	1,8	2,6
Písek	3,2	2,4	2,6	1,7	2,4

je většina těchto trendů statisticky významná. Skutečnost, že řady s teplotou vzduchu vykazují vyšší podíl rostoucích trendů v porovnání s řadami teploty vody, je možné vysvětlit antropogenními faktory, které ovlivňují teplotu vody. Jde zejména o vypouštění vody.

Výsledky ověřování datových řad pomocí testu vzniku trendu ukazují, že teploty vzduchu a teploty vody začínají růst nejčastěji v období mezi roky 1977 a 1986. Rok změny trendu teploty vody se většinou opožděje za rokem změny trendu teploty vzduchu o 5–6 let.

Pro zvolená povodí byl odhadnut budoucí vývoj teploty vzduchu a teploty vody. U povodí Labe po Brandýs nad Labem došlo ke změně trendu teploty vzduchu již v roce 1963, u teploty vody v roce 1979. V povodí Otavy po Písek došlo ke změně teploty vzduchu v roce 1978 a teploty vody v roce 1984. Po zjištění roku vzniku trendu již bylo možno vypočítat podle parametrů trendových přímk uvedených v tabulce 2 hodnoty vzrůstu teploty vzduchu a teploty vody mezi rokem změny trendu a rokem 2050. Teplota vzduchu by vzrostla v povodí Labe po Brandýs nad Labem o 2,4 °C a v povodí Otavy po Písek o 2,9 °C. Teplota vody by vzrostla v Brandýse nad Labem o 2,7 °C a v Písku o 4,2 °C.

Odhad teploty vzduchu a teploty vody k roku 2050 byl dále počítán pomocí klimatických scénářů a pomocí regresní závislosti teploty vody na teplotě vzduchu (tabulka 3). Bylo zjištěno, že teplota vzduchu, která je odvozena od klimatických scénářů, by vzrostla v období od roku 1975 do roku 2050 v rozmezí od 1,7 °C (nejoptimističtější scénáře) po 3,5 °C (nejpesimističtější scénáře) s průměrem kolem 2,6 °C (tabulka 4). Teplota vody odvozená pomocí regresní závislosti teploty vody na teplotě vzduchu v kombinaci se scénáři klimatických změn by vzrostla od roku 1975 do roku 2050 v rozmezí mezi 1,7 a 3,4 °C s průměrem 2,5 °C (tabulka 5). Zjištěné poznatky jsou shrnuty na obr. 3.

Odhad teploty vzduchu a teploty vody k roku 2050 byl dále počítán pomocí klimatických scénářů a pomocí regresní závislosti teploty vody na teplotě vzduchu (tabulka 3). Bylo zjištěno, že teplota vzduchu, která je odvozena od klimatických scénářů, by vzrostla v období od roku 1975 do roku 2050 v rozmezí od 1,7 °C (nejoptimističtější scénáře) po 3,5 °C (nejpesimističtější scénáře) s průměrem kolem 2,6 °C (tabulka 4). Teplota vody odvozená pomocí regresní závislosti teploty vody na teplotě vzduchu v kombinaci se scénáři klimatických změn by vzrostla od roku 1975 do roku 2050 v rozmezí mezi 1,7 a 3,4 °C s průměrem 2,5 °C (tabulka 5). Zjištěné poznatky jsou shrnuty na obr. 3.

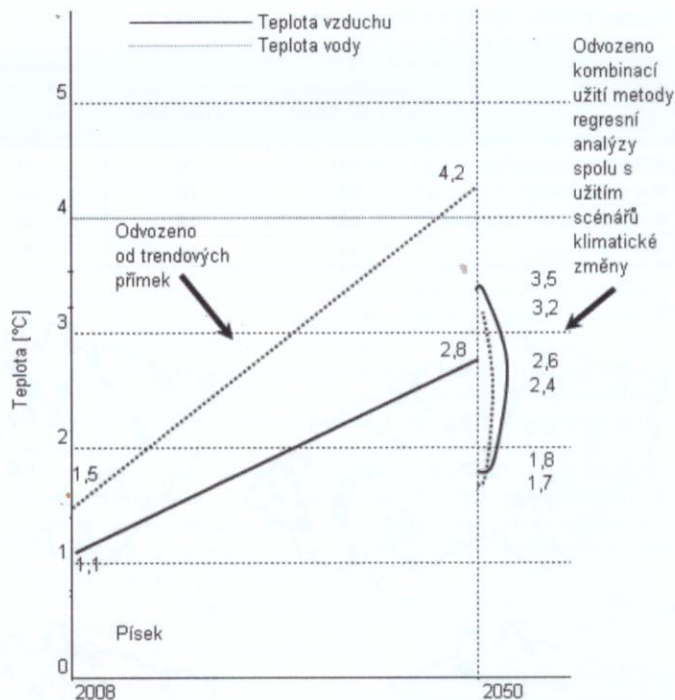
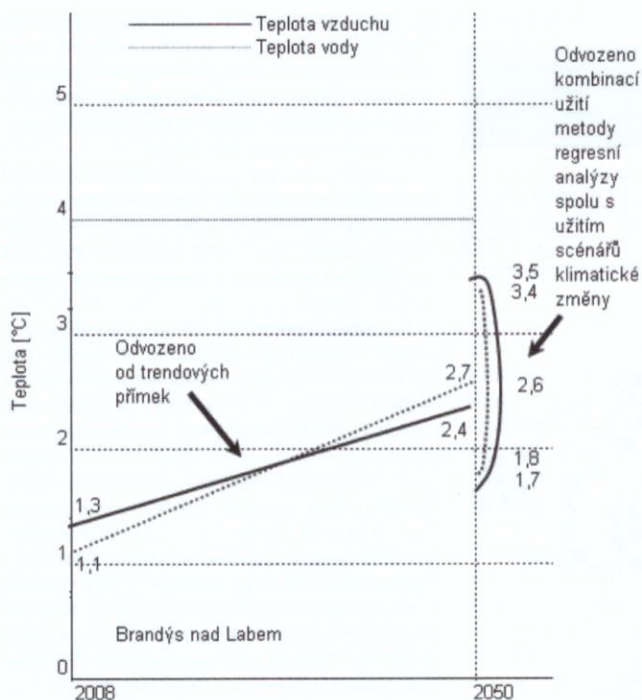
## Závěr

Na většině povodí teploty vody i teploty vzduchu v posledních desetiletích rostou. Za pomoci testu změny trendu bylo zjištěno, že k růstu teploty vzduchu a teploty vody dochází nejčastěji od období let 1977 až 1986, přičemž období počátku nárůstu teplot vody se opožděje za počátkem období nárůstu teplot vzduchu nejčastěji v rozmezí 5–6 let.

Je velmi pravděpodobné, že teploty vzduchu i teploty vody budou i nadále růst. K roku 2050 pravděpodobně vzroste teplota vzduchu podle výpočtů klimatických scénářů projektu PRUDENCE o 1,7 až o 3,5 °C s průměrným růstem 2,6 °C. Tato hodnota odpovídá i vypočtenému nárůstu teploty vzduchu pomocí metody trendové analýzy.

Teplota vody pravděpodobně vzroste k roku 2050 podle provedeného výpočtu závislosti teploty vody na teplotě vzduchu a v závislosti na použitém klimatickém scénáři o 1,7 až 3,4 °C s průměrným růstem 2,5 °C. Tomuto nárůstu





Obr. 3. Růst teploty vody a teploty vzduchu na stanicích Brandýs nad Labem a Písek

teploty vody odpovídá u stanice Brandýs nad Labem i výpočet vycházející z rovnic trendových přímk (nárůst teploty vody o 2,7 °C). U stanice Písek je nárůst teploty vody počítaný z rovnic trendových přímk významně větší (o 4,2 °C), což je pravděpodobně způsobeno antropogenním ovlivněním datové řady.

#### 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).

#### Literatura

- [1] Ducharme, A. (2007) Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4, 2425–2460.
- [2] European Environment Agency (EEA). (2007) Climate change and water adaptation issues. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- [3] Jarušková, D. (1994) Vyhledávání změny v regresi (Detecting a change in regression). VĚTRES, České Budějovice.
- [4] Kyle, RE. and Brabets, PT. (2001) Water Temperature of Streams in the Cook Inlet Basin, Alaska, and Implications of Climate Change. Water-Resources Investigations Report 01-4109.
- [5] Mohseni, O., Stefan, HG., and Erickson, TR. (1998) A non-linear regression model for weekly stream temperatures. *Water Res. Res.*, 34 (10), 2685–2693.
- [6] Morrill, JC., Bales, RC., and Conklin, MH. (2005) Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality. *Journal of Environmental Engineering*, 131 (1), 139–146.

- [7] Neumann, DW., Rajagopalan, B., and Zagana, EA. (2003) Regression Model for Daily Maximum Stream Temperature. *Journal of Environmental Engineering*, 129 (7), 667–674.
- [8] Pekárová, P. and Halmová, D. (2007) Vývoj teploty vody Dunaje v Bratislavě za období 1926–2005. *Meteorologické zprávy*, 60 (12), 183–187.
- [9] Procházka, M., Deyl, M. a Novický, O. (2001) Uživatelský manuál k programu CTPA. Praha : ČHMÚ.
- [10] Webb, BW. and Nobilis, F. (2007) Long-term change in river temperature and the influence of climate and hydrological factors. *Hydrological Science Journal*, 52 (1), 74–85.

Ing. Oldřich Novický, Mgr. Pavel Tremli,  
Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Stanislav Horáček  
VÚV T.G.M., Praha, v.v.i.  
e-mail: oldrich\_novicky@vuv.cz, pavel\_tremli@vuv.cz  
Příspěvek prošel lektorským řízením.

#### Key words

water temperature, trend analysis, regression analysis, software CTPA, climate change

Possible increase in water temperature in the Czech Republic (Novický, O., Tremli, P., Kašpárek, L., Horáček, S.)

The paper describes the application of two different approaches to estimate the annual values of water temperature in the Czech Republic for the time horizon in year 2050. The first approach is based on the results of statistical analysis of trends in water temperature, which were carried out by using CTPA software (Change and Trend Analysis Problem). The second approach uses air temperature derived from climate change modelling, water temperature is consequently computed according to the regression between water and air temperature.

## VTEI VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

**Redakční rada:** RNDr. Dana Baudišová, Ph.D., Ing. Šárka Blažková, DrSc., Ing. Petr Bouška, Ph.D., prof. Ing. Alexander Grünwald, CSc., doc. Ing. Aleš Havlík, CSc., prof. Ing. Pavel Pitter, DrSc., prof. RNDr. Alena Sládečková, CSc., prof. Ing. Jiří Zetulák, DrSc.  
Redakční rada časopisu VTEI spolupracuje s Redakční radou Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v. v. i., která řídí ediční politiku ústavu.

Ročník 51

ISSN 0322 - 8916

Kontakt: Mgr. Sylva Garciová  
Tel.: 220 197 282, fax: 233 333 804  
e-mail: garciova@vuv.cz



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