

VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

SOUČASNÉ CÍLE A VÝSLEDKY APLIKOVANÉHO HYDROLOGICKÉHO VÝZKUMU

Podpora výzkumu v oblasti hydrologie a jednotlivých hydrologických disciplín vždy odrážela požadavky a problémy společnosti vyplývající z aktuálních potřeb na ochranu vod i ochranu společnosti před nežádoucími účinky vod.

Potřeba zajistit plynulé zásobování vodou a další požadavky na vodní zdroje v oblastech s nedostatkem vody a vysokou hydrologickou variabilitou vedly v minulém století k mimořádným investicím do výstavby přehrad a k rozvoji příslušných hydraulických a hydrologických disciplín. Zhoršující se kvalita vod v období relativního hydrologického klidu koncem minulého století vedla k investicím zaměřeným zejména na zlepšení kvality vod a o kvantitativní hydrologické disciplíny nebyl velký zájem. Požadavky na ochranu jakosti vod se staly předmětem vývoje příslušné legislativy, která byla v Evropské unii završena v roce 2000 přijetím Rámcové směrnice (směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky). Současně se však již v této době zvyšovaly obavy spojené s možnou klimatickou změnou a s tím narůstala podpora hydrologického výzkumu a jeho téměř exkluzivního zaměření na možné dopady klimatické změny na vodní režim a později i na vodní zdroje.

Současný aplikovaný výzkum v této oblasti však stojí patrně před nejtěžším problémem, kterým je kvantifikace účinnosti adaptačních opatření na klimatickou změnu. Tento problém vyplývá ze současné vodní politiky, která vyžaduje maximální možné využití přírodě blízkých opatření. Tím se významně mění pojetí vodohospodářských soustav, při jejichž řešení je nutné zahrnout opatření všech typů, orientovat se na společné hodnocení zdrojů povrchových a podzemních vod a využít i dalších nástrojů, jako je riziková analýza nebo dispečerské hry.

Extrémní hydrologické situace, jež se vyskytly v posledních patnácti letech, a projevující se dopady klimatické změny však vyvolávají potřebu rozvoje dalších hydrologických disciplín.

V České republice byla velkým impulzem tohoto rozvoje katastrofální povodeň v roce 1997, jež iniciovala požadavky nejen na výzkum v této oblasti, ale i na jeho završení vývojem a přijetím příslušné legislativy. Výsledkem je, že systémem na ochranu proti povodním, jenž je zakotven v novele vodního zákona z roku 2001, předběhla Česká republika vývoj v Evropské unii v oblasti jeho institucionálního, organizačního a legislativního zajištění přinejmenším o deset let.

Poměrně úspěšný legislativní proces v Evropské unii v oblasti ochrany před povodněmi, spojený s přijetím směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládnutí povodňových rizik, se již nezopakoval v případě návrhu přijetí směrnice o zvládnutí sucha, což bylo paradoxní v situaci, kdy se především západní Evropa vzpamatovávala ze šoku z důsledků katastrofálního sucha v roce 2003. Hlavní příčinou patrně bylo, že některé země (mezi něž patří Česká republika nebo Holandsko) v té době ještě dostatečně nezvážily hrozbu spojenou s výskytem tohoto hydrologického jevu. Skutečnost odmítnutí směrnice Holandskem patří

též k paradoxním situacím, neboť v rámci projektu FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data) a dalších aktivit o její inicializaci usilovali především odborníci z Wageningen University.

Stále častěji se vyskytující problémy spojené s výskytem sucha a nedostatkem vody v České republice se na druhé straně setkaly s rychlou odezvou státní administrativy, a to přijetím řešení projektu, jehož hlavním cílem je vytvořit odborné zázemí pro realizaci systému na ochranu proti výskytu sucha. Pro oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v.v.i., jež je nositelem tohoto projektu, je závaznou a povzbuzující skutečností, že jeho sponzorem je Ministerstvo vnitra České republiky, které se tak stalo třetím ústředním orgánem (po Ministerstvu životního prostředí a Ministerstvu zemědělství), jenž podporuje výzkum tohoto oddělení.

Vývoj výzkumných prací oddělení hydrologie se promítá i do příspěvků uveřejněných v letošním mimořádném čísle časopisu VTEI. Tyto příspěvky zahrnují i problematiku dopadů klimatických změn na kvalitu vod (řešeno ve spolupráci s oddělením radioekologie).

Následující text stručně shrnuje obsah jednotlivých příspěvků. Informace o příslušných projektech a jejich zadavatelích jsou též uvedeny v jednotlivých příspěvcích.

Příspěvky popisující výsledky projektů řešených ve výzkumném záměru (Ministerstvo životního prostředí) zahrnují článek na téma **základní principy odhadu snížení N-letých průtoků retenčním účinkem nádrží**. Tento článek shrnuje vybrané výsledky subprojektu zaměřeného na účinnost protipovodňových opatření, jež se řeší za účelem posouzení možnosti využití jednotlivých typů opatření v systému na ochranu proti povodním.

Vybrané výsledky projektu výzkumu a vývoje SP/1a6/125/08 Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky (Ministerstvo životního prostředí), jsou popsány v článku **Vztah vybraných ukazatelů jakosti a průtoku vody na hlavních přítocích a odtoku z nádrže Orlík**, který se zaměřuje na možné dopady klimatické změny na kvalitu vod a **Posouzení sucha pomocí syntetických řad v podmínkách ovlivněných změnou klimatu**.

Přípravné práce směřující k odvození indexu hydrologického sucha z běžně dostupných dat popisuje článek na téma **nejvýznamnější období sucha v letech 1956–2009**.

V návaznosti na práce popsané v článku Zpřesnění odhadů klimatické změny na vodní zdroje s využitím scénářů založených na simulacích modelem ALADIN (mimořádná příloha VTEI, 2009) byla pozornost v roce 2010 soustředěna na zpřesnění scénářů klimatické změny pro území České republiky a výsledky jsou popsány v příspěvku **Hydrologické modelování dopadů změn klimatu v denním kroku**, který je dílčím výstupem projektu výzkumu a vývoje SP/1a6/108/07 Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření, koordinovaného Českým hydrometeorologickým ústavem.

Hlavní výsledek dosavadního řešení projektu 6451/QH 81331 Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech ČR (Ministerstvo zemědělství) je popsán v článku **Metodika pro posouzení dopadů klimatické změny a návrhu adaptačních opatření na vodních zdrojích**.

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

ZÁKLADNÍ PRINCIPY METODIKY PRO STANOVENÍ N-LETÝCH PRŮTOKŮ OVLIVNĚNÝCH PROTIPOVODŇOVÝMI OPATŘENÍMI

Ladislav Kašpárek, Martin Hanel

Klíčová slova

řady maximálních průtoků – N-leté průtoky – protipovodňová opatření

Souhrn

Standardně jsou N-leté průtoky používány jako návrhová data poskytovány pro hydrologický režim neovlivněný protipovodňovými opatřeními. Článek popisuje základní zásady připravované metodiky pro stanovení N-letých průtoků ovlivněných účinkem protipovodňových opatření, zejména nádrží s retenčním účinkem. Je popsán postup výběru průtokových dat použitých pro řešení a rámcový popis navrhovaného výpočetního postupu. Příklady jeho ověřování jsou z pilotního povodí Tiché Orlice.

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. Hydrologické údaje jsou zpracovávány a poskytovány na základě pozorovaných hodnot, z dostupných podkladů se uvedou informace o způsobu a rozsahu ovlivnění. Při plošném vyrovnání se pokud možno vylučuje vliv výrazného prokazatelného ovlivnění, např. provozem vodních děl. Pro zpracování základních hydrologických dat, a tedy i neovlivněných N-letých průtoků existují metodiky 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 zvládání povodňových rizik) je třeba vytvořit jednotnou metodiku a přístup k tvorbě těchto hydrologických dat.

Výzkumný ústav vodohospodářský TGM, v.v.i., řeší v rámci výzkumného záměru MZP00020711.01 „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“ dílčí část „Vývoj a ověření metodiky pro změnu N-letých průtoků vlivem protipovodňových opatření“. Souhrn poznatků, ze kterých řešení vychází, a obecný rozbor dané problematiky byl publikován v článku Kašpárka (2009). Princip postupu posouzení vlivu protipovodňových opatření na N-leté průtoky je po metodické stránce známý a ve studii Kašpárek aj. (2005) ověřený. Nicméně příprava dat, sestavení modelu řešené soustavy i simulační výpočty jsou pracné a nákladné. Úlohou výzkumu proto bylo nalézt přijatelný rozsah vstupních dat a co nejméně náročné a přitom danému účelu vyhovující prostředky pro sestavení modelu řešené soustavy.

Účelem tohoto článku je seznámit vodohospodářskou veřejnost se základními zásadami připravované metodiky pro výpočet N-letých průtoků ovlivněných protipovodňovými opatřeními.

Předmět metodiky

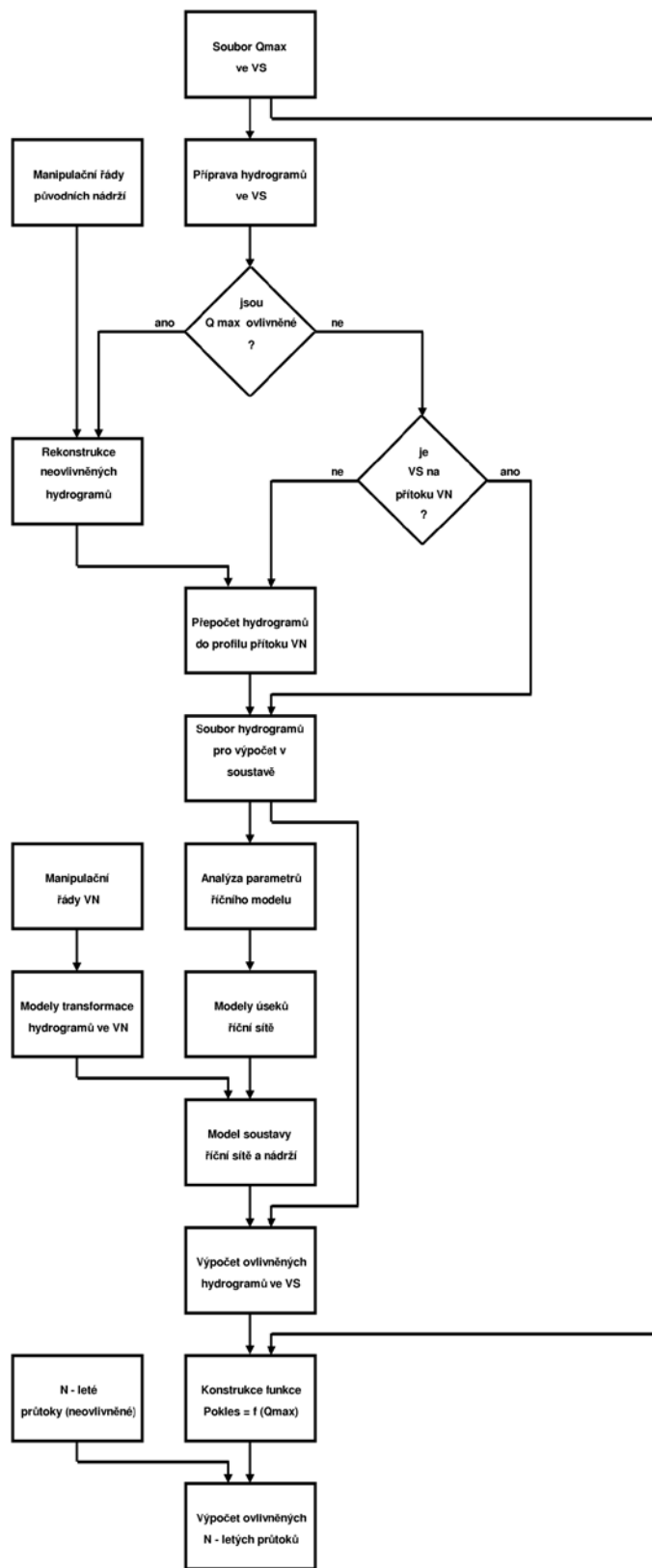
Navrhovaná metodika umožní posoudit změnu N-letých průtoků způsobených vlivem v říční síti již realizovaných nebo navrhovaných protipovodňových opatření ovlivňujících povodňové průtoky. Mezi taková opatření patří zejména vodní nádrže s retenčním účinkem, včetně nádrží suchých (označovaných jako poldry).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

Metodika není určena pro posuzování účinku opatření provedených na ploše povodí (např. změna využití pozemků apod.). Při posuzování účinku protipovodňových opatření se uvažuje jen s účinky odpovídajícími pravidlům manipulačních řádů, dokonalejší postupy dispečerského řízení povodňového odtoku nejsou uvažovány.

Stručný popis zásad a postupu zpracování

Metodika řešení je založena na simulaci průchodu povodní soustavou říční sítě a protipovodňových opatření pomocí hydrologického modelu. V dále uvedeném textu popisujeme řešení pro vodní nádrže, bez zásadních změn je řešení možné i pro posouzení vlivu jiných technických protipovodňových opatření. Postup řešení (znázorněn ve vývojovém diagramu na obr. 1) může být schematizován následujícím způsobem:

1. Jsou zvoleny profily soustavy vodoměrných stanic a profily odtoku z nádrží, pro něž budou pomocí modelu odvozeny změny N-letých průtoků. Pro ostatní profily říční sítě se odvozené změny interpolují nebo extrapolují.
2. Řešení se provádí pro soubor povodní, sestavený podle souboru maximálních kulminačních průtoků za zvolené dlouhodobé období, tj. souboru, ze kterého se odvozují N-leté průtoky v řešené stanici, nebo z jeho části. Při volbě období se musí vyhovět podmínce, že v něm existují pozorování ve všech vodoměrných stanicích řešené soustavy nebo řešené části soustavy. Standardní řešení se provede pro roční maxima, v případě požadavku na rozlišení letních a zimních povodní se řešení provede samostatně pro maxima ze zimního a maxima z letního pololetí. Rozsah výběru povodní se omezí na ty, které mají větší kulminační průtok než N-letý průtok daný zvolenou dolní hranicí doby opakování, podle požadavků zadavatele. Povodně s kulminačním průtokem menším než jednoletý průtok se vynechávají vždy.
3. Pro každou řešenou vodoměrnou stanicí se provede výběr povodní podle bodu 2. Ve vodoměrných stanicích ležících v části soustavy nad řešenou stanicí se doplní výběr tak, aby obsahoval všechny povodně vybrané pro řešenou stanicí. Hydrogramy povodní se připraví v hodinovém kroku.

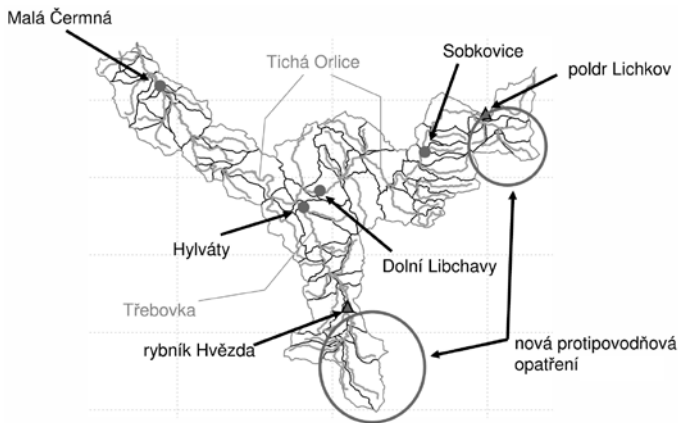


Obr. 1. Vývojový diagram navrženého postupu

4. V případě, kdy nejsou k dispozici vodoměrná pozorování na přítoku do nádrže, odvodí se přítok do nádrže z průtokových dat nejbližší vodoměrné stanice na posuzovaném toku (pokud není k dispozici, vyhledá se jiný vhodný pozorovaný profil – analogon), za předpokladu, že tato data nejsou příslušnou nádrží významně ovlivněna. Neznámý přítok Q_2 je odvozen z měřených hydrogramů Q_1 ve dvou variantách na základě hydrologické analogie:

$$Q_2 = k Q_1, \quad (1)$$

kde koeficient k je dán poměrem ploch povodí (varianta A), respektive poměrem dlouhodobých průměrů ročních maximálních průtoků (varianta Q), přičemž průměr ročních maxim v profilu nádrže získáme podle metodiky ČHMÚ používané pro odvozování N-letých průtoků v nepozorovaných profílech.



Obr. 2. Pilotní povodí

5. Pokud je pro odvození k dispozici jen pozorování z vodoměrné stanice, ve které jsou povodňové průtoky ovlivňovány účinkem stávajících nádrží nebo jiných technických opatření, provede se s využitím příslušného manipulačního řádu rekonstrukce neovlivněných povodňových hydrogramů a tyto rekonstruované hydrogramy jsou dále hydrologickou analogií přepočítány do odvozaného profilu stejně jako v bodě 4.
6. Pro simulaci změn maximálních průtoků vlivem protipovodňových opatření se bude používat hydrologický koncepční model, složený z dílčích modelů
 - translace hydrogramu v říčním úseku,
 - translace a transformace hydrogramu v říčním úseku s významným rozlívem do inundací,
 - průchod povodní nádrží (podle pravidel manipulačního řádu).
7. Pokud nejsou parametry říčních modelů známy, odvodí se s využitím hydrogramů povodní použitých pro řešení. Pro odhad parametrů modelů transformace lze využít i morfologické údaje o říčním toku i nivě.
8. V modelem posuzované soustavě se provede výpočet pro
 - soustavu bez posuzovaných protipovodňových opatření (maximální průtoky by se měly shodovat s pozorovanými),
 - soustavu, do které jsou začleněna protipovodňová opatření.
9. Z výsledků výpočtu se odvodí změny maximálních průtoků vlivem protipovodňových opatření (ΔQ_{\max}), pomocí lineární regrese je nalezen vztah mezi Q_{\max} a ΔQ_{\max} (v případě, že se uplatní bod 4 pro variantu A i Q)

$$\Delta Q_{\max} = f(Q_{\max}), \quad (2)$$
 kde f je zpravidla polynomiální funkce druhého řádu a změna maximálních průtoků je vyjádřena buď v m^3s^{-4} , nebo v % neovlivněného průtoku.
10. Od návrhových N-letých průtoků, standardně zpracovaných podle metodik ČHMÚ se odečtou změny kulminačních průtoků ΔQ_{\max} , vypočtené jako průměr výsledků variant A a Q (pokud byly použity) podle vztahu (2). Tím se získají výsledné hodnoty ovlivněných N-letých průtoků. Vztahy typu (2) lze použít jen v rozsahu pozorovaných průtoků, pro doby opakování převyšující jejich rozsah nelze mechanicky extrapolovat, je třeba uvážit trend vztahů a výsledky pro největší pozorované povodně.
11. Postup podle bodů 8 až 10 se provede pro soubory a část posuzované soustavy nad řešenou vodoměrnou stanicí.
12. Pro profily říční sítě mezi posuzovanými profily odtoku z vodních nádrží a vodoměrnými stanicemi se podle výsledků v těchto profilech provede interpolace změn maximálních průtoků v závislosti na nárůstu dlouhodobého průměrného maximálního průtoku. Pro profily pod nejnižší položenými vodoměrnými stanicemi na hlavním toku a přítocích se obdobně uplatní extrapolace dat.

Zdůvodnění navrženého postupu

V následujícím textu podrobně rozebíráme jednotlivé body navrhovaného postupu, kde je to vhodné, ilustrujeme metodiku na příkladech řešení na pilotním povodí Tiché Orlice (obr. 2). V případě pilotního povodí bylo posuzováno zmenšení kulminačních průtoků vlivem výstavby nových poldrů na horním toku Tiché Orlice a Třebovky. Změny N-letých průtoků byly řešeny pro profily Sobkovice, Dolní Libchavy, Hylváty a Malá Černná. Nádrží významně ovlivňující odtokové poměry v části povodí je rybník Hvězda na Třebovce.

Vstupní data (body 2 a 3)

Retenční účinek vodních nádrží se obvykle v jejich projektech i v manipulačních řádech dokládá transformací návrhových povodní zvolené doby opakování N, nejčastěji pro $N = 100$ let. Při tomto přístupu získáme informace o účinku nádrže jen na N-leté průtoky a jen pro úsek toku bezprostředně pod nádrží. Pro vzdálenější profily však tyto výsledky nelze použít. Skladba povodní, jejichž kulminační průtoky tvoří soubor, ze kterého se odvozují N-leté průtoky, obecně není ani pro vodoměrné stanice na jediném toku stejná. Většinou se v horních povodích s menší plochou častěji vyskytují

povodně z letního období, někdy i z lokálních plošně nepřilíš rozsáhlých přívalových deštů o trvání jen několik hodin, v dolních tratích toků se zvětšuje podíl povodní vzniklých z kombinace tání sněhu a deštových srážek, jejichž trvání je několikadenní. Při stanovení ovlivněných N-letých průtoků v říční soustavě obecně proto nelze použít jen návrhové povodně z profilů nádrží, ani jednotný výběr povodní. Pro řešení v každé vodoměrné stanici použijeme pro všechny profily nádrží a stanice ležící v říční síti nad ní soubory hydrogramů z povodní, které způsobily roční maximální kulminační průtoky v posuzované stanici.

Vzhledem k pracnosti přípravy hydrogramů je rozumné jejich počet omezit tím, že před řešením úlohy stanovíme dolní hranici doby opakování kulminačního průtoku, která je ještě předmětem našeho zájmu. Téměř vždy můžeme popínout povodně s kulminačním průtokem menším než Q_1 . Jen touto podmínkou se zmenší počet povodní o 37 %. Počet redukováných souborů povodní při omezení podmínkou, že kulminační průtok je větší než Q_{N_1} je uveden v tabulce 1.

Tabulka 1. Zmenšení počtu posuzovaných povodní v důsledku volby minimální doby opakování

| Doba opakování N [let] | 1 | 2 | 5 |
|--|----|----|----|
| Redukovaný počet případů ve výběru povodní [% z celkového počtu] | 63 | 39 | 18 |

Přepočtení hydrogramů z vodoměrné stanice do profilu přítoků do nádrží (bod 4)

V případě, že není k dispozici vodoměrné pozorování nad nádrží, jejíž vliv máme posoudit, je třeba hydrogramy posuzovaných povodní do tohoto profilu přepočítat, obvykle z nejbližší po toku ležící vodoměrné stanice. Při detailním řešení by bylo možné zejména u letních povodní pro přepočtení využít informace o rozložení srážek na povodí. Příklady takových řešení jsou studie Starý a Březková (2002, 2003, 2006). Pro zimní povodně by bylo třeba využívat i informace o sněhové zásobě a průběhu teplot vzduchu na povodí. Pracnost přípravy dat i rozsah potřebných výpočtů by se při tomto přístupu podstatně zvětšily. Vzhledem k tomu, že srážkoměrné údaje ze starších období jsou dostupné téměř výhradně jen v denních úhrnech a hustota sítě srážkoměrných stanic většinou nebyla dostatečná, tento pracný postup nemusí vést ke spolehlivým výsledkům. V některých případech lze hydrogram přítoků do nádrží získat bilančním výpočtem z měřeného odtoku z nádrže a z údajů o kolísání hladiny v nádrží. Ani tato data nejsou obvykle k dispozici pro případy ze vzdálenější minulosti. V případech, kdy objem nádrže (přesněji plocha hladiny) je relativně velký vzhledem k velikosti průtoků, nelze bilančním výpočtem získat dostatečně přesný odhad průběhu přítoku.

Pro přepočtení průtokových hydrogramů z vodoměrné stanice do profilu přítoku do vodní nádrže navrhuje dvě jednoduché metody. V první se předpokládá, že odtok z povodí byl na celé ploše stejný, pro přepočítávací koeficient se použije jen poměr ploch povodí. Tato varianta se blíží realitě spíše u zimních povodní, kdy v částech povodí s větší nadmořskou výškou často nenastávají větší specifické kulminační průtoky než ve středních nebo i dolních částech povodí. Intenzita tání sněhu závisí na teplotě vzduchu, která s nadmořskou výškou obecně klesá. Jako příklad lze uvést výsledky rozboru extrémní zimní povodně z roku 2006 v povodí Tiché Orlice, kdy největší hodnota specifického maximálního průtoku nastala ve střední části povodí a až další hodnota v pořadí náležela horní části povodí, ve které jsou umístěny retenční poldry.

Druhá metoda přepočtu vychází z toho, že plošnou proměnlivost velikosti povodní lze charakterizovat průměrem ročních maximálních průtoků z jednotlivých částí povodí. Pro přepočtení se pak použije poměr této charakteristiky pro profil nad posuzovanou nádrží a pro profil vodoměrné stanice. Ve vodoměrné stanici je průměr ročních maximálních průtoků vypočten z pozorovaných hodnot, pro profil nad nádrží se určí ze vztahu nárůstu specifického kulminačního průtoku s klesající plochou povodí sestaveného pro příslušné povodí z existujících pozorování v soustavě vodoměrných stanic, popř. z již zpracovaných návrhových veličin.

Nárůst průměru ročních maximálních průtoků (ve formě specifického průtoku $\text{m}^3\text{s}^{-4}\text{km}^{-2}$) při poklesu plochy povodí souvisí s nárůstem průměrné dlouhodobé srážky s nadmořskou výškou a zejména s tím, že přívalové srážky s narůstající plochou povodí v průměru klesají. Čím menší povodí, tím větší průměrná intenzita se na jeho ploše může vyskytnout.

Rekonstrukce neovlivněných hydrogramů (bod 5)

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

Pro přepočtení do profilu nad nádrží však nelze takto ovlivněná vodoměrná pozorování použít a je třeba řešit úlohu rekonstrukce neovlivněných hydrogramů s využitím manipulačního řádu existující nádrže (nádrží).

Za předpokladu, že je znám manipulační řád, čára zatopených objemů pro příslušnou nádrž a odtok z nádrže (ať už na základě měření, nebo odvozené hydrologickou analogií podle rovnice 1), lze přítok do nádrže zjednodušeně rekonstruovat následujícím postupem. Na základě odtoku z nádrže O je možno z manipulačního řádu odečíst výšky hladiny a těm, s použitím čáry zatopených objemů, přiřadit objemy v nádrži (S). Následně lze přítok do nádrže (I) v čase t řešit jednoduchou bilanční rovnicí

$$\Delta S_t = I_t - O_t, \text{ neboli } I_t = O_t + \Delta S_t, \text{ pro } t > 2 \quad (3)$$

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

Model říční sítě s protipovodňovými opatřeními (bod 6)

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 a modelů různých typů protipovodňových opatření. Z literární rešerše i ze zkušebních výpočtů se ukázalo, že pro sestavení hydrologických dílčích modelů lze pro daný účel použít jednoduché metody. Pro říční úseky bez významných rozlivů postačuje metoda odpovídajících si průtoků, což je v podstatě translace hydrogramu o postupovou dobu. V úsecích s významnými rozlivy do inundací je třeba použít složitější model, postačují však modely hydrologického typu, například Muskingum, Muskingum-Cunge, transport-difuzní rovnice.

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

Při sestavení modelu soustavy, ve které se má řešit vliv protipovodňových opatření na N -leté průtoky, je racionální využít jako základ některý z modelů, které jsou využívány předpovědní povodňovou službou ČHMÚ nebo dispečinky podniků Povodí. Pokud takový model na posuzovaném povodí není k dispozici, musí být sestaven. Ve výpočtech na pilotním povodí Tiché Orlice jsme použili model Aqualog, popsáný ve zprávě Krejčího (2009), který pro naše potřeby upravil a doplnil zejména o submodely poldrů jeho autor Ing. Jakub Krejčí z firmy Aqualogic Consulting, s.r.o., a který také provedl vlastní modelové výpočty.

Odhad základních parametrů modelu říčního úseku (bod 7)

V praxi není určení postupové doby z hydrogramů povodňových vln zcela jednoznačné ani při vizuálním vyhodnocení (hledání nejteplejšího překryvu hydrogramů v době kolem kulminace). Na druhou stranu, v případě posuzování většího množství hydrogramů je vhodné využít možnosti výpočetního odhadu doby zpoždění a tyto odhady pouze následně vizuálně ověřit. Na pilotním povodí bylo testováno několik způsobů odhadu postupové doby povodňové vlny mezi zájmovými profily. Metoda, která nejlépe odpovídala vizuálnímu vyhodnocení, je založena na hledání maxima křížové korelace mezi hydrogramem ve stanici položené výše na toku a hydrogramem ve stanici položené níže na toku posunutém o čas $t = 0, \dots, t_{max}$, kde t_{max} je odhad maximálního možného zpoždění. Jelikož se kvůli transformaci povodňové vlny doby zpoždění pro jednotlivé částí hydrogramů liší, ukázalo se jako vhodné vyhodnocovat křížovou korelaci jen pro období blízké kulminaci (např. + 20 hodin) namísto pro celý hydrogram. Za účelem snadnějšího vyhodnocení doby zpoždění na pilotním povodí byl vyvinut software aplikující výše zmíněnou metodu na soubor povodňových vln v síti vybraných profilů a umožňující snadnou manuální úpravu jednotlivých odhadů pomocí vizuálního porovnání v grafickém uživatelském rozhraní.

Výpočet neovlivněných N -letých průtoků (bod 8–10)

Z poměrně rozsáhlých výstupů modelových výpočtů, což jsou zejména hydrogramy použitého souboru povodí v profilech pod nádržemi a v profilech vodoměrných stanic, pro posouzení vlivu nádrží na N -leté průtoky použijeme jen protipovodňovými opatřeními ovlivněné kulminační průtoky jednotlivých povodí. Ty bychom mohli zpracovat standardním statistickým postupem, který se v ČHMÚ používá pro výpočet N -letých průtoků, tj. vypočítat z ročních maximálních průtoků průměr, koeficient variance, koeficient asymetrie, resp. zvolený empirický kvantil v modulovém měřítku, který se obvykle místo koeficientu asymetrie pro další výpočty podle zvoleného teoretického rozdělení pravděpodobnosti používá.

Prakticky tento postup ve většině případů nelze uplatnit, neboť N -leté průtoky jsou odvozovány ze souborů, které obsahují maximální roční průtoky z období podstatně delších, než můžeme použít pro výpočet ovlivnění, někdy jsou pro jejich výpočet použity i údaje o historických povodních. Výběr období, ze kterého lze odhadovat účinky protipovodňových opatření, je omezen tím, že ve všech zvolených vodoměrných stanicích musí být dostupné časové průběhy povodí. Roli hrají nejen rozdílné počátky vodoměrných pozorování, ale také to, že při pozorování vodních stavů pouze na vodočtech, před instalací limnigrafů, což byla standardní situace v 19. století a počátkem 20. století, byly zaznamenány jen ranní a maxi-

mální vodní stavy. Při velkých povodních byly někdy odečteny vodní stavy v několikahodinových intervalech, pro systematické zpracování však není těchto dat dostatek.

Zvolili jsme proto odlišný přístup, založený na tom, že vypočteme pro každou povodeň změnu kulminačního průtoky, způsobenou protipovodňovými opatřeními. Pomocí regresní analýzy určíme vztah, který udává pro neovlivněnou velikost kulminačního průtoky střední velikost jeho změny. Můžeme oprávněně předpokládat, že rozptyl jednotlivých bodů od středního vztahu bude značný, což odpovídá tomu, že uplatnění vlivu nádrží je značně závislé na tvaru povodňových vln. Dosud provedené výpočty ukazují, že i při značném rozptylu obsahuje použitý datový soubor dostatek informací pro proložení nelineárního vztahu, který ukazuje rozdílnou míru ovlivnění v závislosti na velikosti průtoky. Pro tento účel je vhodné změnu průtoky způsobenou protipovodňovými opatřeními vyjádřit v relativním měřítku, tj. v procentech neovlivněného kulminačního průtoky.

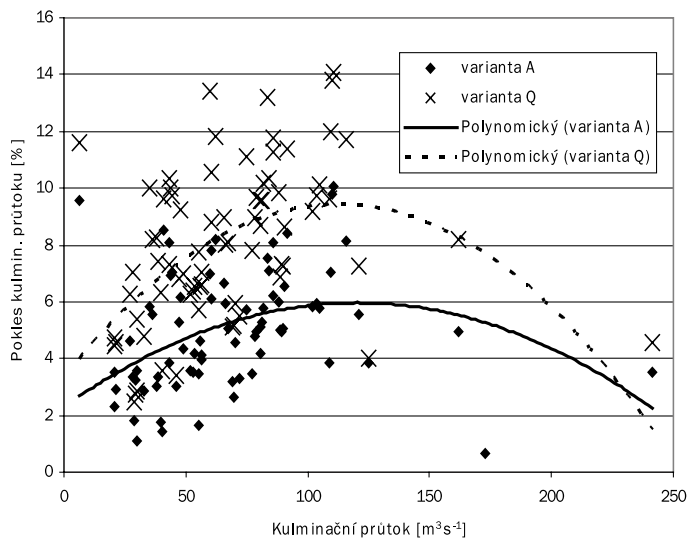
Typickým průběhem bude pro většinu profilů zvětšování účinku nádrží do určité velikosti průtoky s následným poklesem až do nulových hodnot pro extrémní povodně. Ukázka takového vztahu je na obr. 3.

Další postup spočívá v tom, že podle výše popsaného vztahu vypočteme změny pro jednotlivé neovlivněné N -leté průtoky, které byly pro posuzovanou vodoměrnou stanici zpracovány standardním postupem podle metodik ČHMÚ, jejich odečtením získáme N -leté průtoky odpovídající ovlivněnému povodňovému režimu.

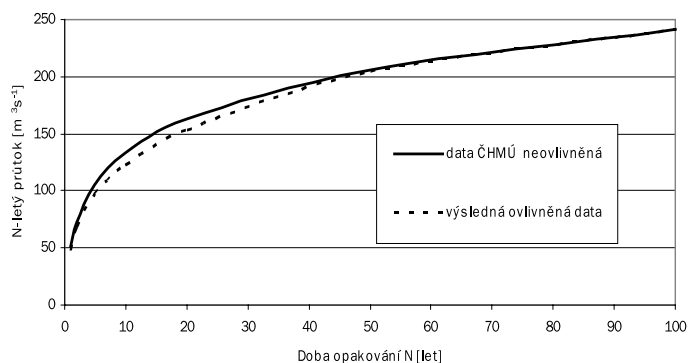
Příklad, jak protipovodňová opatření v povodí Tiché Orlice (3 poldry v horní části povodí, 4 poldry a upravená nádrž Hvězda na přítoku Třebovka) ovlivní N -leté průtoky ve vodoměrné stanici Malá Čermná, ukazuje obr. 4. Tato vodoměrná stanice s plochou povodí 691,4 km² již charakterizuje povodňový odtok z celého povodí Tiché Orlice (757,1 km²).

Interpolace změn maximálních průtoků

Nejjednodušší z možných modelů, které popisují propagaci poklesu ΔQ_{max} z horního profilu směrem po toku je, že velikost poklesu ΔQ_{max} (m³s⁻¹) v dolním profilu je stejná jako v profilu horním. V tomto případě by se směrem po toku snižoval jen relativní pokles $\Delta Q_{max}/Q_{max}$ v závislosti na zvětšování průměrného maximálního průtoky. Hydrogramy transformované vlivem protipovodňových opatření mají kulminační průtok nejen zmenšený, ale také časově posunutý, časová skladba hydrogramů ovlivněných průtoků je



Obr. 3. Korelační vztah mezi neovlivněným kulminačním průtokem a jeho změnou účinkem protipovodňových opatření pro vodoměrnou stanici Malá Čermná na Tiché Orlici, varianty výpočtu viz bod 4



Obr. 4. Neovlivněné a změnou účinkem protipovodňových opatření ovlivněné N -leté průtoky pro vodoměrnou stanici Malá Čermná na Tiché Orlici (průměr z variant A a Q)

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

Z hlediska praktických aplikací je třeba nalézt postup, který umožní interpolovat velikost poklesu ΔQ_{\max} v profilech mezi počátkem a koncem posuzovaného úseku. Interpolace v závislosti jen na ploše povodí patrně není vhodná. Nezhlednila by, že obvykle směrem po toku klesá specifický průtok a vliv přítoku z mezipovodí se zeslabuje. Pro interpolaci navrhuje použít jako řídicí proměnnou průměr maximálních kulminačních průtoků $Q_{\max, \text{průměr}}$ (tato veličina je standardně používána při odvozování N-letých průtoků).

Pro navržený postup použijeme vztahy

$$Q_{\max, \text{průměr}} = f(\text{plocha povodí}) \quad (4)$$

$$k = (\Delta Q_{\max h} - \Delta Q_{\max d}) / (Q_{\max, \text{průměr}, h} - Q_{\max, \text{průměr}, d}) \quad (5)$$

$$\Delta Q_{\max} = \Delta Q_{\max h} - k \cdot Q_{\max, \text{průměr}} \quad (6)$$

kde ΔQ_{\max} označuje velikost poklesu, indexy h, d horní a dolní profil.

Závěr

Řešení úkolu Vývoj a ověření metodiky pro změnu N-letých průtoků vlivem protipovodňových opatření dospělo do stavu, ve kterém byly formulovány základní zásady metodiky a rámcový postup zpracování. Zvolená metoda řešení je založena na simulaci průchodu povodní soustavou říční sítě a protipovodňových opatření pomocí hydrologického modelu. Byl navržen způsob výběru vstupních dat, zásady pro sestavení hydrologického modelu i postup využít výsledku simulací pro přepočítání neovlivněných N-letých průtoků na ovlivněné. Je navržen i postup interpolace změn N-letých průtoků v mezilehlých profilech říční sítě (mezi vodoměrnými stanicemi). Zkušební aplikace navrhovaného postupu na pilotním povodí Tiché Orlice slouží k jeho ověřování i vývoji. Při zkušebních výpočtech byla využita upravená verze modelu tohoto povodí zpracovaná v systému Aqualog pro potřeby prognózní služby ČHMÚ.

Literatura

Kašpárek, L. (2009) Metody hodnocení účinků protipovodňových opatření na N-leté průtoky. VTEI, 2009, 51, mimořádné číslo I, s. 13–16.

VZTAH VYBRANÝCH UKAZATELŮ JAKOSTI A PRŮTOKU VODY NA HLAVNÍCH PŘÍTOCÍCH A ODTOKU Z NÁDRŽE ORLÍK

Eduard Hanslík, Pavel Šimek, Diana Ivanovová

Klíčová slova

jakost vody – průtok vody – bodové zdroje znečištění – liniové zdroje znečištění

Souhrn

Byly analyzovány vztahy ukazatelů jakosti a průtoků vody v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořenisko a Otava-Topělec a na odtoku z VN Orlík v profilu Vltava-Solenice. Z výsledků vyplývá, že ve sledovaných profilech přímou závislost na průtoku vody vykazují nejčastěji N-NO₃, nerozpuštěné látky, Mg²⁺ a O₂ a nepřímou závislost teplota, Cl, rozpuštěné anorganické soli, BSK₅, P_{celk.}, N-NH₄⁺ a P-PO₄³⁻. Z hodnocení vyplývá, že vliv nevodových zdrojů v daném území je významný.

Úvod

Problematika vztahu vybraných ukazatelů jakosti a průtoků vody byla řešena jako součást projektu SP/1a6/125/08 Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky, resp. DÚ 6 Vliv hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky na jakost povrchových vod.

Jako modelový příklad je v příspěvku hodnocen vliv nízkých průtoků vody na jakost vody na příkladu hlavních přítoků a odtoku VN Orlík za období 1997–2009. Byly sledovány změny obecných ukazatelů jakosti vody – teploty (T), pH, rozpuštěného kyslíku (O₂), chemické spotřeby kyslíku manganistanem (CHSK_{Mn}), chemické spotřeby kyslíku dichromanem (CHSK₂), biochemické spotřeby kyslíku (BSK₅) a nerozpuštěných látek (NL), nutrienty – dusičnanového dusíku (N-NO₃), amoniakálního dusíku (N-NH₄⁺), celkového fosforu (P_{celk.}) a fosforečnanového fosforu (P-PO₄³⁻) a dalších

Kašpárek, L., Novický, O., Jeníček, M. a Buchtela, 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.

Krejčí, J. (2009) Možnosti úprav a využití sub-modelů systému Aqualog pro sestavení modelu povodí včetně protipovodňových opatření. Sestavení modelu pro pilotní povodí Tiché Orlice (výzkumná zpráva). Aqualog Consulting, 51 s.

Starý, M. a Březková, L. (2002) Stanovení účinku nových retenčních nádrží na průběh povodní v povodí Tiché Orlice. Brno, 256 s.

Starý, M. a Březková, L. (2003) Stanovení účinku nových retenčních nádrží na průběh povodní v povodí Tiché Orlice. In Sborník referátů z konf. Protipovodňová prevence a krajinné plánování, Pardubice, s. 273–279.

Starý, M. a Březková, L. (2006) Stanovení účinnosti vodních děl v povodí Třebovky. Brno, 42 s.

Poděkování

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

Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Martin Hanel
VÚV TGM, v.v.i, Praha
ladislav_kasperek@vuv.cz, martin_hanel@vuv.cz
Příspěvek prošel lektorským řízením.

Main principles of the method for calculation of N-year discharges influenced by flood protection measures (Kašpárek, L.; Hanel, M.)

Key words

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

The N-year discharges, as the standard design values, are typically derived assuming no flood protection. In present paper, a method for calculation of N-year discharges influenced by flood protection measures, especially by reservoirs, is introduced. Data selection and the key steps of the proposed approach are described. The method is illustrated by the examples from the Ticha Orlice catchment.

ukazatelů jakosti – rozpuštěných látek (RL), rozpuštěných anorganických solí (RAS), vápníku (Ca²⁺), hořčíku (Mg²⁺), draslíku (K⁺), chloridů (Cl), síranů (SO₄²⁻) a orientačně i nepolárních extrahovatelných látek (NEL) a anionaktivních tenzidů. Cílem řešení bylo hodnocení závislosti mezi výše uvedenými ukazateli jakosti vody a průtoky vody ve dnech odběrů vzorků a vyjádření podílů průměrných hodnot ukazatelů jakosti při M-denních průtocích na úrovni větší nebo rovné 70 % a menší než 70 %.

V současné době se stále více uznává možný dopad změny klimatu na změnu kvality povrchových vod. Prováděné studie ukazují, že jakost vody může být přímo ovlivněna několika souvisejícími mechanismy, a to v krátkodobé i dlouhodobé časové úrovni. Patří mezi ně vliv zvýšení teploty vzduchu, změny hydrologických faktorů (omezení ředění emisí z bodových zdrojů při nízkých průtocích), pozemní faktory (např. změny vegetace a půdní struktury), užívání vody (např. větší spotřeba vody, zvýšená poptávka po chladicí vodě) [1]. Dopady letního sucha v období 1998–1999 v regionu Otago, Nový Zéland sledoval Caruso [2]. Studie ukázala, že za nízkých průtoků se projeví řada vlivů na říční ekosystémy s časově prostorovými dopady, které závisí na charakteru povodí uvnitř tohoto regionu. Významné vlivy na jakost bylo možno sledovat u mnoha ukazatelů, zejména u bakterií, nutrienty, zákalu a RL. Ostatní parametry jakosti vody zahrnující T a O₂ ukazovaly stejné časově prostorové charakteristiky, které se vyskytují každý rok. Rozmezí a trvání extrémních hodnot uvedených parametrů jakosti, které mají obvykle kritický vliv na vodní biotu, mohou ještě vzrůst v průběhu extrémně nízkých průtoků. Vzhledem k tomu, že kvalita vody v řekách se může zhoršit v období dlouhodobých nízkých průtoků v kombinaci s vysokými teplotami na kritické hodnoty, je porozumění dopadu sucha na jakost vody důležité [3]. Vlivem letního sucha na jakost vody v řece Meuse se např. zabývali van Vliet a Zwolsman [4]. Podrobně se zabývali dopady sucha v letech 1976 a 2003. Nepříznivé vlivy byly zjištěny pro teplotu vody, koncentraci O₂, eutrofizaci, koncentraci makrokomponent a některých těžkých kovů a metaloidů jako Se, Ni a Ba. Pozitivní účinky na kvalitu vody byly zjištěny u dusičnanů a některých těžkých kovů, jako Pb, Cr, Hg a Cd. Negativní vlivy na jakost vody však jsou pokládány za převažující. Při možném zvýšení četnosti a intenzity nedostatku vody v důsledku klimatických změn, se očekává zhoršení kvality vody a také snížení ekologického a rekreačního potenciálu řek. Autoři dále zjistili, že zhoršení vybraných ukazatelů jakosti vody v období letního sucha je primárně způsobeno vhodnými podmínkami pro rozvoj vodního květu (z důvodu teploty, dlouhé doby zdržení, vysoké kon-

centrace nutrientů a snížení ředící kapacity pro znečištění z bodových zdrojů). Zvyšující se teplota vody v letním období omezí vypouštění chladicí vody elektrárnami a dostupnost povrchové vody potřebné jakosti pro zemědělství a domácnosti. Zvláště pro dodávku pitné vody se případné zvýšení četnosti sucha může stát vážnou hrozbou. Předpokládá se překročení limitních hodnot pro teplotu vody a koncentrace relevantních parametrů jako Cl, F, Br⁻, NH₄⁺. Překročení limitních hodnot se však v hodnocené lokalitě předpokládá při delším období sucha. Lze konstatovat, že pro snížení nepříznivých účinků sucha na jakost povrchových vod bude třeba snížit emise z bodových zdrojů při nízkých průtocích vody [4].

Metodika

Bylo hodnoceno povodí VN Orlík, resp. hlavní přítoky do nádrže v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a odtok VN Orlík v profilu Vltava-Solenice. Profily hodnocené v rámci příspěvku jsou znázorněny na obr. 1. Základní charakteristiky jednotlivých povodí včetně sumárního přehledu výpustí bodových zdrojů podle [5] jsou uvedeny v tabulce 1. Zpracovány byly soubory jakosti vody a průtoků vody z podkladů ČHMÚ, Povodí Vltavy, s.p., a ČEZ, a.s., které jsou sledovány s četností 1x měsíčně. Na základě výsledků předběžných analýz byla pro popis vztahu mezi ukazateli jakosti a průtoky vody ve dnech odběru vzorků zvolena mocninová funkce:

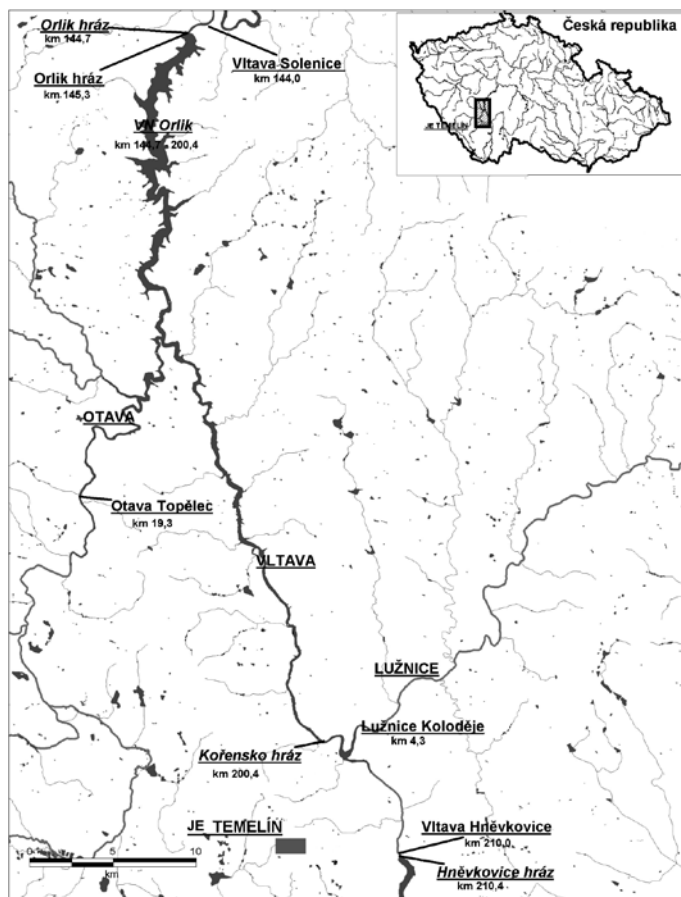
$$c_i = a \cdot Q_i^b$$

kde c_i je hodnota ukazatele jakosti ve dnech odběru vzorků, Q_i průměrný průtok vody ve dnech odběru vzorků (m³/s), a, b parametry mocninové závislosti.

Statistická významnost závislosti byla posouzena pomocí korelačního koeficientu. Statisticky významná závislost pro $n > 120$ byla vyhodnocena pro $r > 0,18$, nevýznamná závislost pro $r \leq 0,18$.

Graficky byly porovnány průběhy mocninových závislostí pro vybrané ukazatele jakosti v profilech na hlavních přítocích a na odtoku z VN Orlík.

Hodnoty M-denních průtoků byly převzaty z manipulačního řádu [6] a z podkladů ČHMÚ [7].



Obr. 1. Mapa hodnocených profilů

Tabulka 1. Základní charakteristiky sledovaných povodí včetně sumárního přehledu výpustí bodových zdrojů v roce 2009 [5]

| | | Vltava-Hněvkovice | Lužnice-Koloděje | Otava-Topělec | Vltava-Solenice |
|---|--------------------------------|-------------------|------------------|---------------|-----------------|
| plocha povodí | km ² | 3 869 | 4 234 | 3 840 | 12 062 |
| celková roční výpust odpadních vod v povodí | mil. m ³ | 35,1 | 22,4 | 28,3 | 93,8 |
| počet zdrojů | | 146 | 153 | 179 | 506 |
| bilance | BSK | 201 | 229 | 164 | 631 |
| | CHSK | 1 156 | 892 | 673 | 3 174 |
| | NL | 241 | 238 | 175 | 819 |
| | RL | 12 959 | 7 028 | 5 659 | 29 105 |
| | N-NH ₄ ⁺ | 81 | 73 | 69 | 232 |
| | N _{anorg.} | 211 | 208 | 165 | 676 |
| | P _{celk.} | 19 | 29 | 18 | 74 |

Byly vypočteny podíly hodnot ukazatelů jakosti pro období s průtokem vody nižším nebo rovným 70 % Q_{Md} a průměrné hodnoty jakosti odpovídající průtokům vody vyšším než 70 % Q_{Md} . Průtoky na úrovni $Q_{70\%}$ pro profily Vltava-Hněvkovice jsou 15,5 m³/s, Lužnice-Koloděje 10,1 m³/s, Vltava-Kořensko 26,5 m³/s, Otava-Topělec 11,8 m³/s a Vltava-Solenice 40,9 m³/s.

Výsledky a diskuse

V profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a Vltava-Solenice byl hodnocen vztah 18 ukazatelů jakosti a průtoků vody s použitím mocninové funkce. Bylo předpokládáno, že změny ve zdrojích znečištění byly v období 1997–2009 malé. V profilu Vltava-Hněvkovice byla zjištěna statisticky významná závislost u šesti hodnocených ukazatelů, z toho tři ukazatele s přímou závislostí na průtoku vody (O₂, NL, N-NO₃) a tři ukazatele s nepřímou závislostí (T, N-NH₄⁺, Ca²⁺). V profilu Lužnice-Koloděje byla statisticky významná závislost zjištěna u 13 hodnocených ukazatelů, tři s přímou závislostí na průtoku vody (NL, N-NO₃, CHSK_{Mn}) a deseti ukazatelů s nepřímou závislostí (RL, RAS, pH, BSK₅, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Cl, P_{celk.}, P-PO₄³⁻). V profilu Vltava-Kořensko (pod soutokem s Lužnicí) vykazovalo pět ukazatelů statisticky významnou závislost, z toho tři přímou (O₂, NL, N-NO₃) a dvě nepřímou (T, pH). V profilu Otava-Topělec byla statisticky významná závislost zjištěna u 11 hodnocených ukazatelů, čtyř s přímou závislostí na průtoku vody (NL, N-NO₃, CHSK_{Mn}, CHSK_{Cr}) a sedmi ukazatelů s nepřímou závislostí (RAS, pH, Ca²⁺, K⁺, Cl, P_{celk.}, P-PO₄³⁻). V profilu Vltava-Solenice vykazovalo statisticky významnou závislost 10 ukazatelů, z toho devět přímou (O₂, CHSK_{Cr}, CHSK_{Mn}, NL, N-NH₄⁺, N-NO₃, P_{celk.}, RL, RAS) a jeden nepřímou (T). Ve všech uvedených profilech vykazovalo přímou závislost NL a N-NO₃. Závislost NEL a tenzidů anionaktivních nebyla kvantitativně hodnocena, protože většina hodnot byla na úrovni meze detekce použitých metod.

Z tohoto hodnocení vyplývá, že vliv stávajících bodových zdrojů na koncentraci, resp. na hodnoty sledovaných ukazatelů jakosti vody, je nejvýznamnější v profilu Lužnice-Koloděje (10 ukazatelů s nepřímou závislostí na průtoku vody). Jakost vody v profilu Vltava-Hněvkovice a také v profilu Vltava-Kořensko ovlivňují dále dotace vody z VN Lipno v období nízkých průtoků. V případě Lužnice představuje významný faktor ovlivňující jakost vody chov ryb. V profilu Vltava-Solenice je to pak vliv přítoku Otavy a procesy změn jakosti vody ve VN Orlík. Je zřejmé, že se uplatňují nebodové (liniové) zdroje, zejména hnojení zemědělsky obhospodařované půdy dusíkatými hnojivy.

Příklad grafického zpracování vztahu koncentrace látek na průtoku vody je pro profil Vltava-Hněvkovice pro ukazatele CHSK_{Cr}, N-NO₃, P_{celk.} a Cl uveden na obr. 2–5. Na obrázcích je vyznačen průtok vody na úrovni 70 %.

Z vybraných ukazatelů nevykazuje statisticky významnou závislost na průtoku CHSK_{Cr} (nevýznamný vzestupný trend) stejně jako P_{celk.} (nevýznamný sestupný trend). Statisticky významná je přímá závislost N-NO₃ na průtoku vody a nepřímá závislost koncentrace Cl (jako indikátor znečištění, který není ovlivňován čištěním odpadních vod). Potvrzuje se, že vliv bodových zdrojů znečištění je v tomto profilu relativně málo významný. Statisticky nejvýznamnější přímou závislost v tomto profilu představuje koncentrace N-NO₃.

Pro stejné ukazatele jakosti vody (CHSK_{Cr}, N-NO₃, P_{celk.} a Cl) jsou na obr. 6–9 porovnány mocninové závislosti na průtoku vody v profilech Vltava-Hněvkovice (ovlivněn manipulací VN Lipno), Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko (ovlivněn manipulací VN Lipno), Otava-Topělec a Vltava-Solenice pod VN Orlík.

V ukazateli CHSK_{Cr} je zřejmá přímá závislost v profilu Otava-Topělec a Vltava-Solenice. U zbývajících profilů je závislost statisticky nevýznamná.

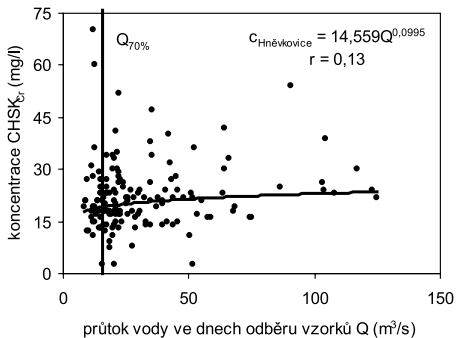
V ukazateli $N-NO_3^-$ je statisticky významná přímá závislost v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko a statisticky nevýznamný trend přímé závislosti v profilech Otava-Topělec a Vltava-Solenice. Z hlediska vývoje koncentrací ukazatelů jakosti v průběhu roku byly nejvyšší průměrné hodnoty koncentrace $N-NO_3^-$ zjišťovány v zimním a jarním období (podrobnější výsledky nebyly zařazeny z důvodu rozsahu příspěvku).

V případě $P_{celk.}$ byla zjištěna statisticky významná nepřímá závislost na průtoku vody v profilech Vltava-Hněvkovice a Otava-Topělec a přímá závislost v profilu Vltava-Solenice. Statisticky nevýznamné závislosti byly zjištěny v profilech Vltava-Hněvkovice a Vltava-Kořensko.

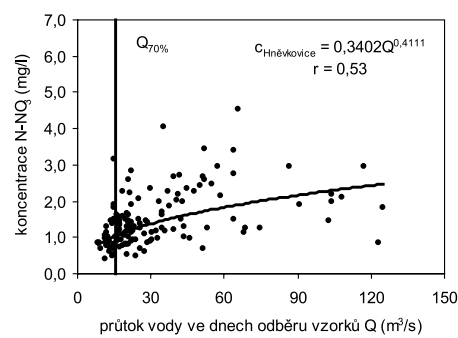
Koncentrace Cl vykazovala statisticky významnou nepřímou závislost v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje a Otava-Topělec. Statisticky nevýznamný trend pak v profilech Vltava-Kořensko a Vltava-Solenice.

Z dlouhodobého hlediska lze předpokládat další snížení vlivu bodových zdrojů v ukazatelích, které budou ovlivněny výstavbou a intenzifikací čistíren odpadních vod, hlavně $CHSK_{Mn}$, $CHSK_{Cr}$, BSK_5 , $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$, $P_{celk.}$ a $P-PO_4^{3-}$.

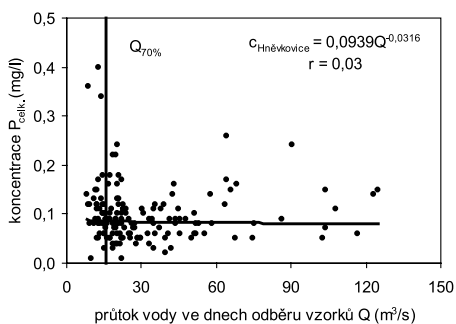
Dále byly podrobněji posuzovány průměrné hodnoty sledovaných ukazatelů za nízkých a vyšších průtoků vymezených hodnotou $Q_{70\%}$. Příklad průběhu průtoků vody ve dnech odběru vzorků za období 1997–2009 a úroveň průtoku $Q_{70\%}$ pro profil Vltava-Hněvkovice je uveden na obr. 10. Z posouzení četnosti odebraných vzorků



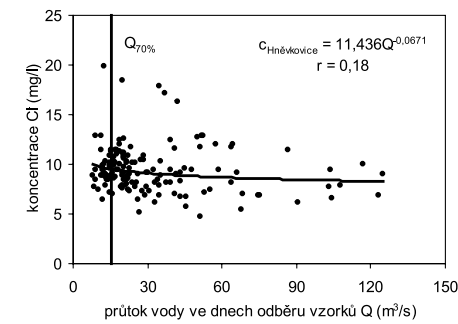
Obr. 2. Vztah $CHSK_{Cr}$ a průtoku vody v profilu Vltava-Hněvkovice za období 1997–2009



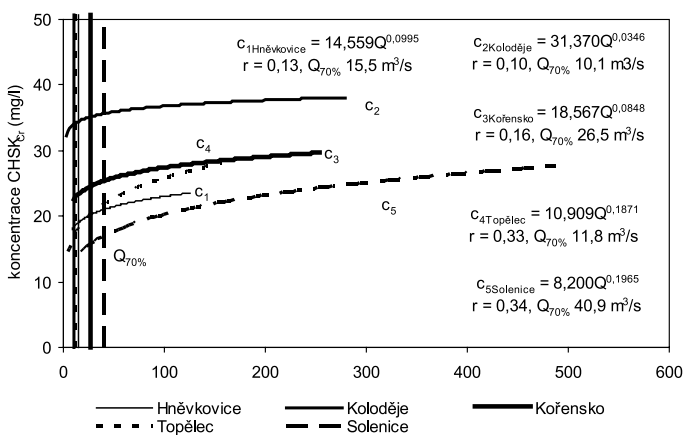
Obr. 3. Vztah $N-NO_3^-$ a průtoku vody v profilu Vltava-Hněvkovice za období 1997–2009



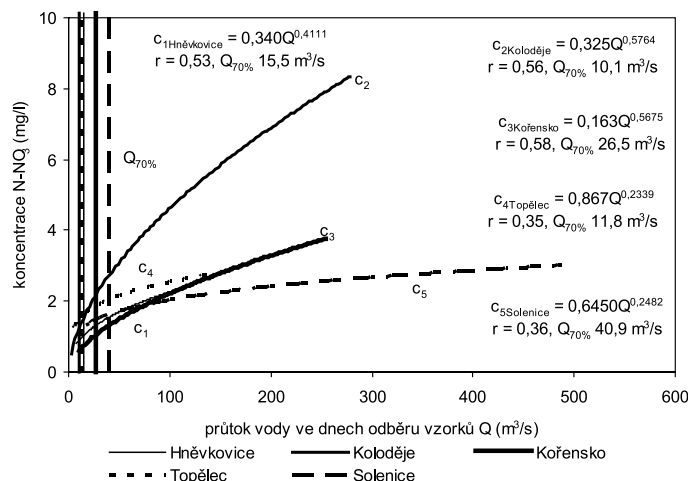
Obr. 4. Vztah $P_{celk.}$ a průtoku vody v profilu Vltava-Hněvkovice za období 1997–2009



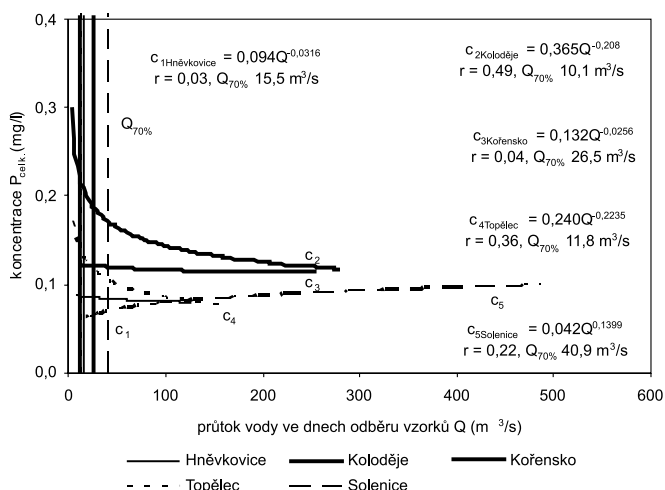
Obr. 5. Vztah Cl a průtoku vody v profilu Vltava-Hněvkovice za období 1997–2009



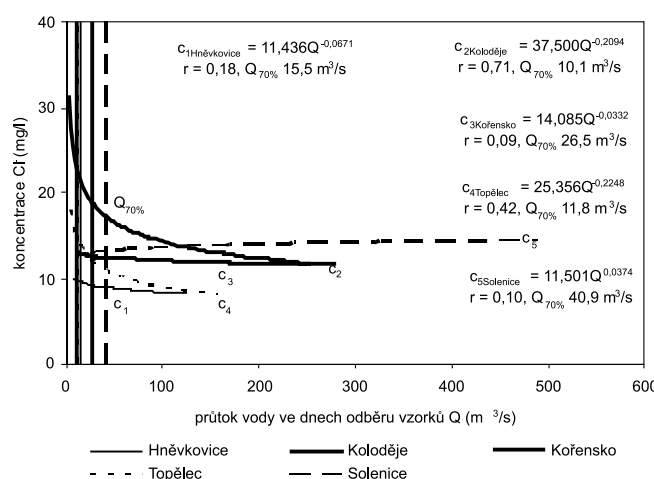
Obr. 6. Porovnání vztahů $CHSK_{Cr}$ a průtoku vody v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a Vltava-Solenice za období 1997–2009



Obr. 7. Porovnání vztahů $N-NO_3^-$ a průtoku vody v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a Vltava-Solenice za období 1997–2009



Obr. 8. Porovnání vztahů $P_{celk.}$ a průtoku vody v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a Vltava-Solenice za období 1997–2009



Obr. 9. Porovnání vztahů Cl a průtoku vody v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a Vltava-Solenice za období 1997–2009

za tzv. nízkých průtoků vyplynulo, že je nižší ve srovnání s četností za tzv. vyšších průtoků. Přehledně jsou počty vzorků odebraných za nízkých průtoků uvedeny v *tabulce 2*. V jednotlivých letech sledování jsou počty odebraných vzorků v rozmezí 0–7, resp. v relativní jednotkách 0–58 % (z 12 standardně prováděných odběrů ročně). Za celé období představovaly počty vzorků odebraných za nízkých průtoků vody v profilu Vltava-Hněvkovice 23,1 %, Lužnice-Koloděje 37,8 %, Vltava-Kořensko 26,9 %, Otava-Topělec 34,0 % a Vltava-Solenice 30,1 %.

Pro možnost porovnání hodnot ukazatelů jakosti za tzv. nízkých a vyšších průtoků vody, při vztážením ke $Q_{70\%}$, byly vypočteny průměrné hodnoty sledovaných ukazatelů pro tyto dvě kategorie průtoků a jejich podíly.

Hodnoty podílů průměrných hodnot ukazatelů jakosti vody pro oblast nízkých průtoků vody a vyšších průtoků vody odpovídají míře statistické významnosti, která vyplynula z vypočtených parametrů mocninové funkce. Znamená to, že hodnoty podílů v okolí 1,0 odpovídají nevýznamné závislosti ukazatelů (koncentrace látek a dalších ukazatelů) na průtoku vody. Hodnoty podílů větší než 1,0 znamenají nepřímou závislost a hodnoty menší než 1,0 přímou závislost. Hodnoty podílů ukazatelů jakosti v profilech Vltava-Hněvkovice byly v rozmezí hodnot 0,6–1,6, Lužnice-Koloděje v rozmezí 0,5–1,5, Vltava-Kořensko v rozmezí 0,4–1,8, Otava-Topělec v rozmezí hodnot 0,4–1,9 a Vltava-Solenice v rozmezí hodnot 0,6–1,5. Pro snazší orientaci v chování jednotlivých ukazatelů (s vyloučením hodnot pro NEL a tenzidy z důvodu většiny hodnot na mezi stanovitelnosti) byly podíly seřazeny vzestupně na obr. 11–14. Z nich vyplývá, že chování ukazatelů v jednotlivých profilech je podobné, ale ne stejné.

Podíly průměrných průtoků vody pro $Q < 70\% / Q > 70\%$ ve dnech odběru vzorků byly v profilu Vltava-Hněvkovice 2,9, v profilu Lužnice-Koloděje 5,5, v profilu Vltava-Kořensko 3,6, v profilu Otava-Topělec 3,5 a v profilu Vltava-Solenice 3,5. Největší rozkolísanost průtoků podle očekávání vykazoval profil Lužnice-Koloděje, dále následoval profil Otava-Topělec. Tyto profily nejsou ovlivňovány manipulací na vodních nádržích.

Podíly průměrných hodnot ukazatelů jakosti menší než 0,9 indikují převažující vliv nebodových zdrojů znečištění. Nejvýznamnější se tento vliv projevuje u $N-NO_3^-$. Toto pozorování odpovídá podrobné studii [8], podle které představuje vypouštění znečištění do Vltavy pro profil Hněvkovice, charakterizované jako anorganický dusík, 325 t/r. Tato hodnota odpovídá 23,5 % z mediánu odtoku $N-NO_3^-$ a $N-NH_4^+$ 1 383,3 t/r tímto profilem, zjiš-

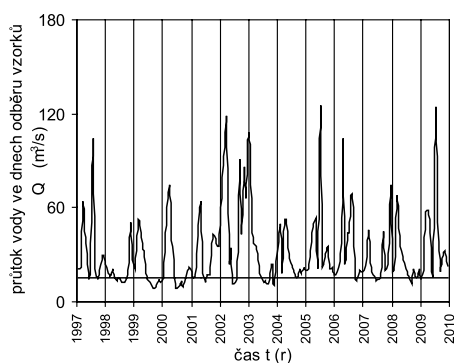
Tabulka 2. Počty odebraných vzorků (n) za průtoků nižších než $Q_{70\%}$ z profilů Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a Vltava-Solenice v jednotlivých letech a průměrně za období 1997–2009

| Rok | Vltava-Hněvkovice | Lužnice-Koloděje | Vltava-Kořensko | Otava-Topělec | Vltava-Solenice |
|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | n | | | | |
| 1997 | 2 | 4 | 3 | 4 | 2 |
| 1998 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 |
| 1999 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 |
| 2000 | 5 | 7 | 6 | 6 | 6 |
| 2001 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| 2002 | 3 | 3 | 2 | 0 | 2 |
| 2003 | 4 | 7 | 5 | 5 | 6 |
| 2004 | 1 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| 2005 | 0 | 2 | 1 | 5 | 1 |
| 2006 | 1 | 3 | 1 | 4 | 3 |
| 2007 | 3 | 6 | 4 | 3 | 5 |
| 2008 | 2 | 6 | 2 | 3 | 5 |
| 2009 | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 |
| Průměr (%) | 23,1 | 37,8 | 26,9 | 34,0 | 30,1 |

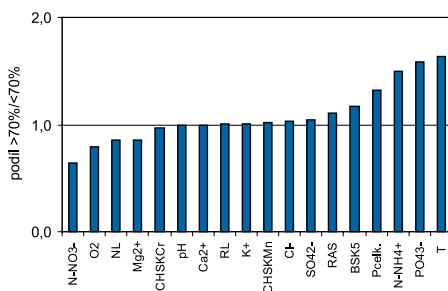
těnému za období 2000–2009 [9]. Vlivem nebodových (difuzních) zdrojů dusíku se zabývala dlouhodobá studie (1959–1990) zaměřená na změny chemických ukazatelů ve VN Slapy [10]. Na odtoku dusíku z povodí se podílely nebodové zdroje v rozmezí 60–80 %. V extrémně suchých letech význam bodových zdrojů vzrůstal. Ve významné evropské řece Meuse byla také pozorována přímá závislost mocninové funkce pro NO_3^- [4]. V případě ukazatelů s přímou závislostí koncentrace na průtoku vody, jako jsou dusičnany, lze očekávat v případě nízkých průtoků (sucha) nižší koncentrace ve vodě. V případě ukazatelů s nepřímou závislostí koncentrace na průtoku lze očekávat vyšší koncentrace za nízkých průtoků vody. To dokladují např. výsledky hodnocení koncentrace Cl⁻, které prokazovaly nepřímou závislost v profilech Lužnice-Koloděje a Otava-Topělec, podobně jako bylo pozorováno v řece Meuse [4].

Závěr

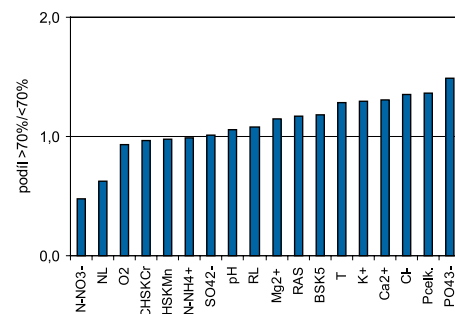
Byly analyzovány vztahy mezi průtokem a hodnotami ukazatelů jakosti vody na příkladu sledování v profilech Vltava-Hněvkovice, Lužnice-Koloděje, Vltava-Kořensko, Otava-Topělec a Vltava-Solenice za období 1997–2009. Z hodnocení vyplynulo, že podíl průměrných hodnot jakosti za nízkých průtoků (větších než $Q_{70\%}$) a za vyšších průtoků (menších než $Q_{70\%}$) menší než 0,9 (přímá závislost hodnot ukazatelů jakosti na průtoku vody indikující převahu vlivu nebodových zdrojů) byl v profilu Vltava-Hněvkovice pozorován u ukazatelů $N-NO_3^-$, O_2 , NL a Mg^{2+} a podíl větší než 1,1 (nepřímá závislost hodnot ukazatelů jakosti na průtoku vody indikující převahu vlivu bodových zdrojů) u ukazatelů RAS, BSK_5 , $P_{celk.}$, $N-NH_4^+$, $P-PO_4^{3-}$ a T. V profilu Lužnice-Koloděje byl podíl menší než 0,9 zjištěn u ukazatelů $N-NO_3^-$ a NL a podíl větší než 1,1 u ukazatelů Mg^{2+} , RAS, BSK_5 , T, K^+ , Ca^{2+} , Cl⁻, $P_{celk.}$ a $P-PO_4^{3-}$. V profilu Vltava-Kořensko byl podíl menší než 0,9 zjištěn u ukazatelů N-



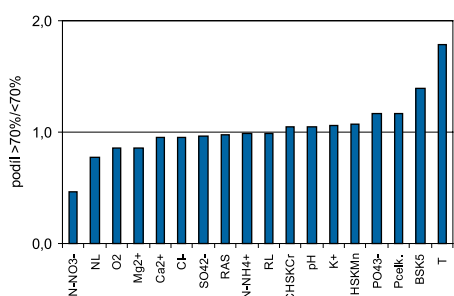
Obr. 10. Průtoky vody ve dnech odběru vzorků a vyznačené úrovně $Q_{70\%}$ v profilu Vltava-Hněvkovice



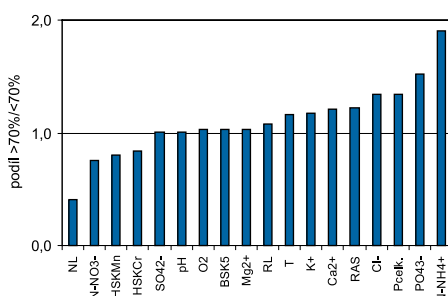
Obr. 11. Vzestupně seřazené hodnoty podílů průměrných hodnot pro $Q > 70\% / Q < 70\%$ v profilu Vltava-Hněvkovice v období 1997–2009



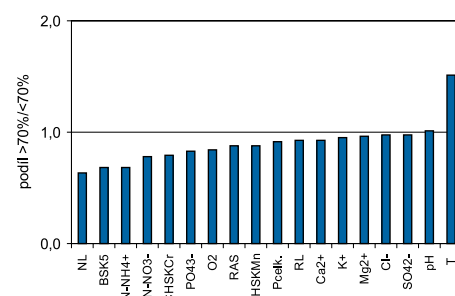
Obr. 12. Vzestupně seřazené hodnoty podílů průměrných hodnot pro $Q > 70\% / Q < 70\%$ v profilu Lužnice-Koloděje v období 1997–2009



Obr. 13. Vzestupně seřazené hodnoty podílů průměrných hodnot pro $Q > 70\% / Q < 70\%$ v profilu Vltava-Kořensko v období 1997–2009



Obr. 14. Vzestupně seřazené hodnoty podílů průměrných hodnot pro $Q > 70\% / Q < 70\%$ v profilu Otava-Topělec v období 1997–2009



Obr. 15. Vzestupně seřazené hodnoty podílů průměrných hodnot pro $Q > 70\% / Q < 70\%$ v profilu Vltava-Solenice v období 1997–2009

NO_3^- , NL , O_2 a Mg^{2+} a podíl větší než 1,1 u ukazatelů P-PO_4^{3-} , $\text{P}_{\text{celk.}}$, BSK_5 a T . V profilu Otava-Topělec byl podíl menší než 0,9 zjištěn u ukazatelů NL , N-NO_3^- , CHSK_{Cr} a CHSK_{Mn} a podíl větší než 1,1 u ukazatelů T , K^+ , Ca^{2+} , RAS , Cl^- , $\text{P}_{\text{celk.}}$, P-PO_4^{3-} a N-NH_4^+ . V profilu Vltava-Solenice byl podíl menší než 0,9 zjištěn u ukazatelů NL , BSK_5 , N-NH_4^+ , N-NO_3^- , CHSK_{Cr} , P-PO_4^{3-} , O_2 , RAS a CHSK_{Mn} a větší než 1,1 u ukazatele T .

Ukazuje se, že chování jednotlivých ukazatelů jakosti v hodnocených profilech není univerzální a že jednotlivé profily mají svá specifika.

Z hodnocení dále vyplývá, že vedle bodových zdrojů mají na jakost vody vliv i nebodové zdroje, které nejvíce ovlivňují koncentrace N-NO_3^- a NL .

Pro další zpřesňování prognózy chování ukazatelů jakosti v suchých obdobích se ukazuje jako účelné pokračovat ve sledování a hodnocení jakosti vody, zejména v návaznosti na opatření u bodových i nebodových zdrojů znečištění a verifikovat platnost zjištěného chování ukazatelů jakosti vody v závislosti na reálném vývoji klimatických změn.

Poděkování

Průspěvek byl zpracován s podporou projektu Ministerstva životního prostředí ČR SP/1a6/125/08.

Literatura

- [1] Murdoch, PS., Baron, JS., and Miller, TL. Potential effects of climate changes on surface-water quality in North America. *Journal of the American Water Resources Association*, 36, 2000, p. 347–366.
- [2] Caruso, BS. Temporal and spatial patterns of extreme low flows and effects on stream ecosystems in Otago, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 257, 2002, p. 115–133.
- [3] Somville, M. and De Pauw, N. Influence of temperature and river discharge on water quality of the Western Scheldt estuary. *Water Research*, 16, 1982, p. 1349–1356.
- [4] van Vliet, MTH. and Zwolsman, JGG. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *Journal of Hydrology*, 353, 2008, p. 1–17.
- [5] Bilance vypouštěných odpadních vod v roce 2009. Data VÚV T.G.M., v.v.i., 2010.
- [6] Manipulační řád vodního díla Hněvkovice–Kořensko na řece Vltavě. OkÚ České Budějovice, čj. 4022/94/95-231/2-Si, 1996, revize CVD 26. 3. 2009.

POSOUZENÍ SUCHA POMOCÍ SYNTETICKÝCH ŘAD V PODMÍNKÁCH OVLIVNĚNÝCH ZMĚNOU KLIMATU

Adam Vizina, Martin Hanel

Klíčová slova

sucho – syntetické časové řady – SPI – ALADIN/CLIMATE-CZ – nedostatkové objemy – metoda efektivní srážky – LARS-WG

Souhrn

Předkládaný článek se zabývá posouzením hydrologického a meteorologického sucha a jejich kvantifikací v podmínkách ovlivněných změnou klimatu. Pro vyhodnocení pravděpodobného výskytu jednotlivých typů sucha byly vytvořeny generátorem počasí (LARS WG, 2010) 100leté denní řady teplot vzduchu, srážkových úhrnů a následně modelem BILAN modelována hydrologická bilance. Jako vstupní data byly použity denní časové řady z pěti povodí a období 1961–1990. Pro simulaci podmínek ovlivněných změnou klimatu byly použity výstupy z regionálního klimatického modelu (RCM) ALADIN/CLIMATE-CZ pro referenční roky 2025, 2055 a 2085. Meteorologické sucho bylo posuzováno SPI indexem (Standard precipitation index) a metodou efektivní srážky, hydrologické sucho metodou nedostatkových objemů a stanovením N-letosti minimálních průtoků.

Úvod

Sucho patří mezi extrémní hydrologické jevy. V souvislosti s klimatickými změnami se sucho vyskytuje častěji a má výraznější následky na přírodní prostředí i národní hospodářství. Zároveň jde o dosud ne příliš dobře zmapovanou oblast. V rámci vodního hospodářství se nejčastěji posuzuje sucho meteorologické a hydrologické.

Studie se zabývá hodnocením sucha pomocí denních syntetických časových řad (vytvořených generátorem klimatických veličin) pro jednotlivá referenční období (1975, 2025, 2055 a 2085) na pěti povodích v České republice. Pro výhledová období byly použity výstupy z modelu ALADIN/CLIMATE-CZ. Cílem studie je porovnání sucha meteorologického a hydrologického v podmínkách ovlivněných změnou klimatu, a to jak v rovině čet-

- [7] Brzáková, J. Hydrologická data. ČHMÚ, 2009.
- [8] Nesměrák, I. Možnosti zlepšení jakosti vody ve Vltavě v profilu Hněvkovice a Kořensko. Studie, Praha, 2009.
- [9] Hanslík, E. aj. Sledování a hodnocení jakosti povrchových a podzemních vod a jejich změn v souvislosti s výstavbou a provozu jaderné elektrárny Temelín na její okolí. Zpráva VÚV T.G.M., v.v.i., 2010.
- [10] Procházková, L., Blažka, P., and Kopáček, J. Impact of diffuse pollution on water quality of the Vltava River (Slapy reservoir), Czech Republic. *Water Science and Technology*, 33, 1996, p. 145–152.

Ing. Eduard Hanslík, CSc., Mgr. Pavel Šimek,
Mgr. Diana Ivanovová
VÚV TGM, v.v.i.
eduard_hanslik@vuv.cz
Průspěvek posel lektorským řízením.

Relationships between selected water quality parameters and water discharges at main tributaries of Orlík Reservoir and at the outflow from the reservoir (Hanslík, E.; Šimek, P.; Ivanovová, D.)

Key words

water quality – flow of water – point pollution source – non-point pollution source

Relationships between water quality parameters and water discharges were analysed for river sites located on the tributaries (the Vltava at Hněvkovice, Lužnice at Koloděje, Vltava at Kořensko and Otava at Topělec) of Orlík Reservoir and at the outflow from the reservoir (the Vltava at Solenice). The results showed that N-NO_3^- , suspended solids, Mg^{2+} parameters are mostly increasing with an increase in the river flow while temperature, Cl^- , dissolved anorganic salts, BSK_5 , P_{tot} , N-NH_4^+ and P-PO_4^{3-} parameters are predominantly decreasing. It was concluded that diffuse pollution sources play an important role in this locality.

ností výskytu jednotlivých such, tak v rovině jejich intenzity. Pro posouzení byly použity standardní metody užívané v České republice i v zahraničí.

Data

Jako vstupní data byly použity denní časové řady klimatických veličin (teplot vzduchu, srážkových úhrnů a relativních vlhkostí vzduchu) a průtoků pro jednotlivá zkoumaná povodí (tabulka 1). V prvním sloupci je uvedeno databázové číslo měrného profilu (DBC), v druhém číslo hydrologického pořadí (ČHP), ve třetím plocha povodí a v posledních dvou délky časových řad.

Pro simulaci podmínek ovlivněných změnou klimatu byly k dispozici výstupy simulace regionálního klimatického modelu (RCM) ALADIN-CLIMATE/CZ pro období 1961–2100 řízené globálním klimatickým modelem ARPEGE podle emisního scénáře SRES A1B (IPCC, 2000) s horizontálním rozlišením cca 25 km x 25 km. Tyto simulace jsou řešeny v rámci projektu VaV „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“. Korigované simulace (Hanel aj., 2010) byly použity jako vstup pro hodnocení sucha v podmínkách změny klimatu.

Metodika

Syntetické časové řady – generátor počasí LARS-WG

Pro tvorbu syntetických časových řad klimatických veličin (teploty vzduchu a srážkových úhrnů) byl použit stochastický generátor počasí LARS-WG (Semenov, 1998), který je určen pro simulaci meteorologických dat v bodě pro současné podmínky a podmínky ovlivněné změnou klimatu. LARS-WG byl vyvinut v Hadley centru ve Velké Británii. Vstupem do modelu jsou časové řady denních teplot vzduchu [°C], srážkových úhrnů [mm] a solární radiace [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$].

Pomocí tohoto generátoru byly simulovány 100leté klimatické veličiny pro jednotlivá povodí a referenční období 1975, 2025, 2055 a 2085.

SPI index (Standardized precipitation index)

Ukazatel SPI byl vyvinut v roce 1993 (Mc Kee) k monitorování a určení suchých období. Narozdíl od jiných indexů má několik výhod: ke kalkulaci

Tabulka 1. Řešená povodí

| DBC | ČHP | Profil | Plocha povodí [km ²] | Od | Do |
|------|-------------|------------------------------------|----------------------------------|------|------|
| 0240 | 1-02-01-009 | Kláštelec nad Orlicí-Divoká Orlice | 155,15 | 1961 | 1990 |
| 1060 | 1-06-01-023 | Lenora-Teplá Vltava | 176,27 | 1961 | 1990 |
| 1370 | 1-08-01-040 | Rejstejn-Otava | 334,6 | 1961 | 1990 |
| 1530 | 1-08-04-064 | Varvažov-Skalice | 366,84 | 1961 | 1990 |
| 2110 | 1-13-02-021 | Teplá-nádrž Březová | 294,01 | 1961 | 1990 |

jsou nutná pouze srážková data, výpočet je relativně snadný (zavádí se jen dva další parametry) a má standardizovaný charakter. Posledně zmíněná věc však může být zároveň nevýhodou. Extrémně suchá období budou klasifikována se stejnou frekvencí jako extrémně vlhká období na různých lokalitách. Proto se doporučuje použít jako doplňující informace k jiným ukazatelům (Lloyd-Hughes, 2002).

Výpočet spočívá v transformaci srážkových časových řad na normální rozdělení. Měsíční nebo jiný časový interval jsou aproximovány pravděpodobnostním rozdělením (nejčastěji se používá gamma rozdělení, ale v některých případech může být vhodnější Poissonovo nebo log-normální rozdělení). Česká povodí byla aproximována gamma rozdělením s obdobným nebo lepším výsledkem než s log-normálním rozdělením. Poissonovo rozdělení nereflektuje srážkové řady pro česká povodí.

Pro daný srážkový úhrn se pak vypočte distribuční funkce (kumulativní pravděpodobnost) k již parametrizovanému gamma rozdělení a výsledná hodnota se transformuje zpátky na normální rozdělení:

Klasifikace indexu SPI odpovídá normálnímu rozdělení, extrémní události (sucho/vlhko) se tak budou vyskytovat s pravděpodobností cca 2,5 %. Hodnoty SPI s charakteristikou období jsou znázorněny v tabulce 2.

Tabulka 2. Hodnoty SPI

| Hodnota indexu | Charakter období |
|----------------|------------------|
| > = 2 | extrémně vlhký |
| 1,5 až 1,99 | velmi vlhký |
| 1 až 1,49 | mírně vlhký |
| 0 až 0,99 | slabě vlhký |
| 0 až -0,99 | slabě suchý |
| -1 až -1,49 | mírně suchý |
| -1,5 až -1,99 | silně suchý |
| < = -2 | extrémně suchý |

Metoda efektivní srážky

Denní úbytek vodních zdrojů reprezentuje efektivní srážka EP (Effective Precipitation) (Wilhite, 1999), která je dána rovnicí:

$$EP_i = \sum_{m=1}^i \left(\frac{\sum_{m=1}^n P_m}{n} \right)$$

kde i je doba sumace (DS), P_m je srážka před m dny. P_1 značí aktuální srážku (Blinka, 2002).

Pro vyhodnocení bylo použito EP15, což charakterizuje vodní zdroje akumulované za posledních 15 dní a hodnotí deficit půdní vlhkosti. Metoda EP byla aplikována pro jednotlivá referenční období a 1000leté časové období. Z EP jsou počítány další indexy (MEP, DEP a SEP), které umožní vymezit období sucha, zhodnotit jejich intenzitu a rovněž umožní jejich vzájemné srovnání (Blinka, 2002). MEP určuje průměr za dané období (1000 let). DEP vyjadřuje nadbytek nebo nedostatek zdrojů k určitému datu:

$$DEP = EP - MEP$$

Standardizací DEP dostáváme index SEP, který umožňuje srovnání intenzity sucha mezi různými místy:

$$SEP = \frac{DEP}{\sigma(EP)}$$

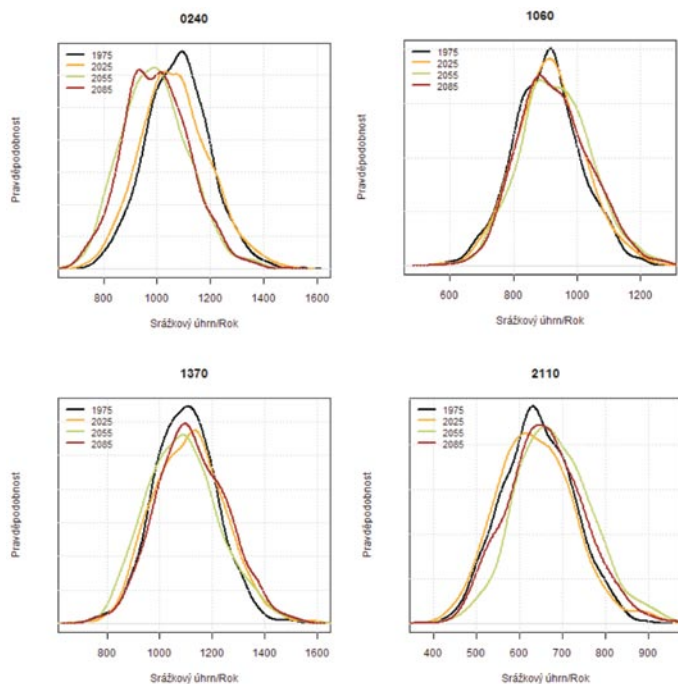
Hydrologický model BILAN

Model BILAN schematizuje povodí na soustavu nádrží ve třech vertikálních úrovních – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody. Velikost toků mezi jednotlivými nádržemi je určována algoritmy modelu, které jsou řízeny šesti volnými parametry. Vstupem do modelu jsou pozorované časové řady srážek, teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu (v této studii 1961–1990), která slouží k výpočtu potenciální evapotranspirace. Bilance na povrchu půdy je dána vstupními srážkovými úhrny a územním výparem určeným na základě potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda 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) odevzu povodí, celkový odtok je pak dán jejich součtem (Horáček et al., 2009).

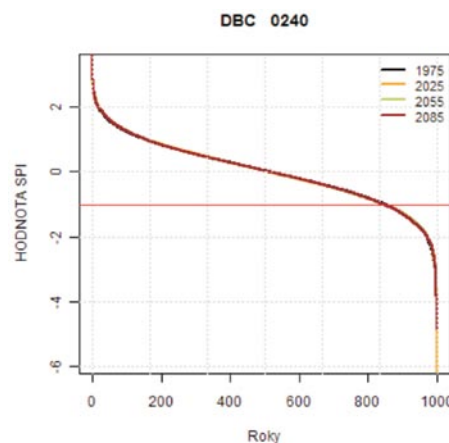
Model je nejprve nakalibrován na pozorovaných datech, nakalibrované parametry jsou dále využity při dalších simulacích. Ve studii byly modelem BILAN modelovány veličiny hydrologické bilance pro 1000leté období (pro všechny uvažované referenční roky) v denním kroku.

Metoda nedostatkových objemů

Metoda nedostatkových objemů se zabývá obdobími, kdy je průtok menší než mezní průtok (threshold level). Pro posouzení hydrologického sucha byl použit jako mezní průtok Q_{330} vypočítaný z dat pro jednotlivá povodí z období



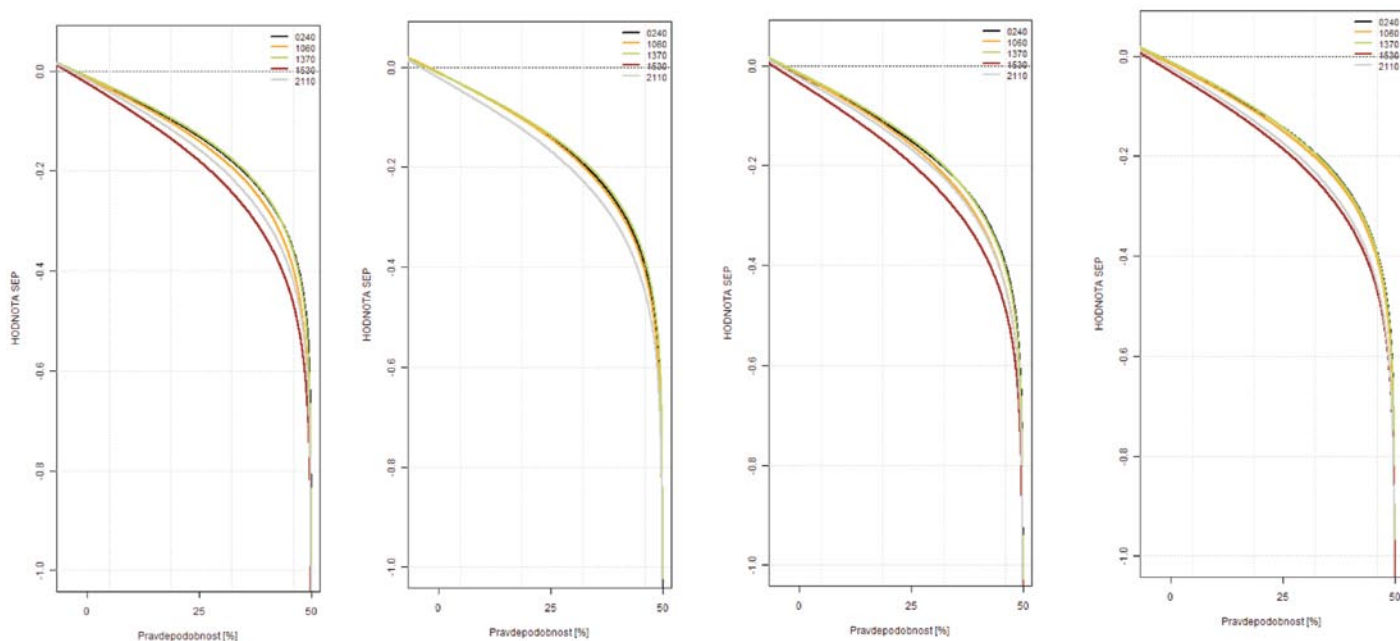
Obr. 1. Rozdělení srážkových úhrnů generovaných pro jednotlivá referenční období



Obr. 2. Hodnoty SPI pro povodí Divoké Orlice po profil Klášterec nad Orlicí

Tabulka 3. N-leté minimální denní průtoky

| DBC | Rok | N-letost | | | | | |
|------|------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 |
| 240 | 1975 | 0,495 | 0,253 | 0,152 | 0,099 | 0,065 | 0,043 |
| 240 | 2025 | 0,247 | 0,086 | 0,047 | 0,032 | 0,020 | 0,014 |
| 240 | 2055 | 0,117 | 0,034 | 0,018 | 0,013 | 0,007 | 0,005 |
| 240 | 2085 | 0,054 | 0,020 | 0,011 | 0,007 | 0,005 | 0,004 |
| 1060 | 1975 | 1,251 | 1,067 | 0,977 | 0,883 | 0,814 | 0,742 |
| 1060 | 2025 | 1,150 | 0,949 | 0,855 | 0,795 | 0,683 | 0,645 |
| 1060 | 2055 | 1,048 | 0,855 | 0,759 | 0,696 | 0,618 | 0,565 |
| 1060 | 2085 | 0,911 | 0,754 | 0,661 | 0,612 | 0,545 | 0,516 |
| 1370 | 1975 | 2,908 | 2,269 | 1,940 | 1,677 | 1,363 | 1,259 |
| 1370 | 2025 | 2,275 | 1,587 | 1,255 | 1,092 | 0,910 | 0,798 |
| 1370 | 2055 | 1,663 | 1,041 | 0,797 | 0,658 | 0,558 | 0,503 |
| 1370 | 2085 | 1,460 | 0,940 | 0,720 | 0,604 | 0,492 | 0,449 |
| 1530 | 1975 | 0,671 | 0,471 | 0,382 | 0,335 | 0,284 | 0,263 |
| 1530 | 2025 | 0,594 | 0,420 | 0,344 | 0,297 | 0,246 | 0,216 |
| 1530 | 2055 | 0,437 | 0,310 | 0,255 | 0,216 | 0,178 | 0,157 |
| 1530 | 2085 | 0,459 | 0,326 | 0,259 | 0,221 | 0,187 | 0,157 |
| 2110 | 1975 | 0,548 | 0,476 | 0,446 | 0,408 | 0,381 | 0,368 |
| 2110 | 2025 | 0,531 | 0,446 | 0,408 | 0,378 | 0,364 | 0,354 |
| 2110 | 2055 | 0,514 | 0,436 | 0,402 | 0,381 | 0,350 | 0,330 |
| 2110 | 2085 | 0,463 | 0,391 | 0,357 | 0,333 | 0,303 | 0,296 |



Obr. 3. Hodnoty SEP pro jednotlivá časová období (1975, 2025, 2055 a 2085) a pro všechna řešená období

1961–1990. Nedostatkový objem určuje kumulativní objem vody za období, kdy průtok nedosáhl zvoleného mezního průtoku (Tallaksen et al., 2004):

$$NO = \sum Q_{330} - Q_i$$

Výsledky

Na obr. 1 jsou znázorněny kumulativní roční srážkové úhrny pro jednotlivá řešená povodí a všechny uvažované časové horizonty o délce trvání 1000 let. Lze vidět pokles kumulativních ročních srážkových úhrnů pro výhledová období. Denní srážkové úhrny byly modelovány generátorem LARS-WG (1000 let). Vstupem do generátoru byly výstupy z RCM ALADIN/CLIMATE-CZ pro jednotlivá období o délce trvání 30 let.

Meteorologické sucho

Na obr. 2 jsou znázorněny měsíční hodnoty SPI. Jako limitní hodnota pro identifikaci sucha byla zvolena hodnota SPI = 1. Jak již bylo zmíněno

výše, index SPI ztrácí určitou výpovědní hodnotu standardizací, a proto je dobré ho brát pouze jako doplňující informaci. K jednotlivým referenčním obdobím má proto index obdobné rozložení, vyskytovaly se pouze extrémnější hodnoty na obou spektrech indexu.

Metoda efektivní srážky

Pomocí metody efektivní srážky a její standardizace byly porovnány očekávané intenzity sucha na jednotlivých povodích (obr. 3). Meteorologické sucho s největší intenzitou lze očekávat na povodí Skalice po profil Varvažov.

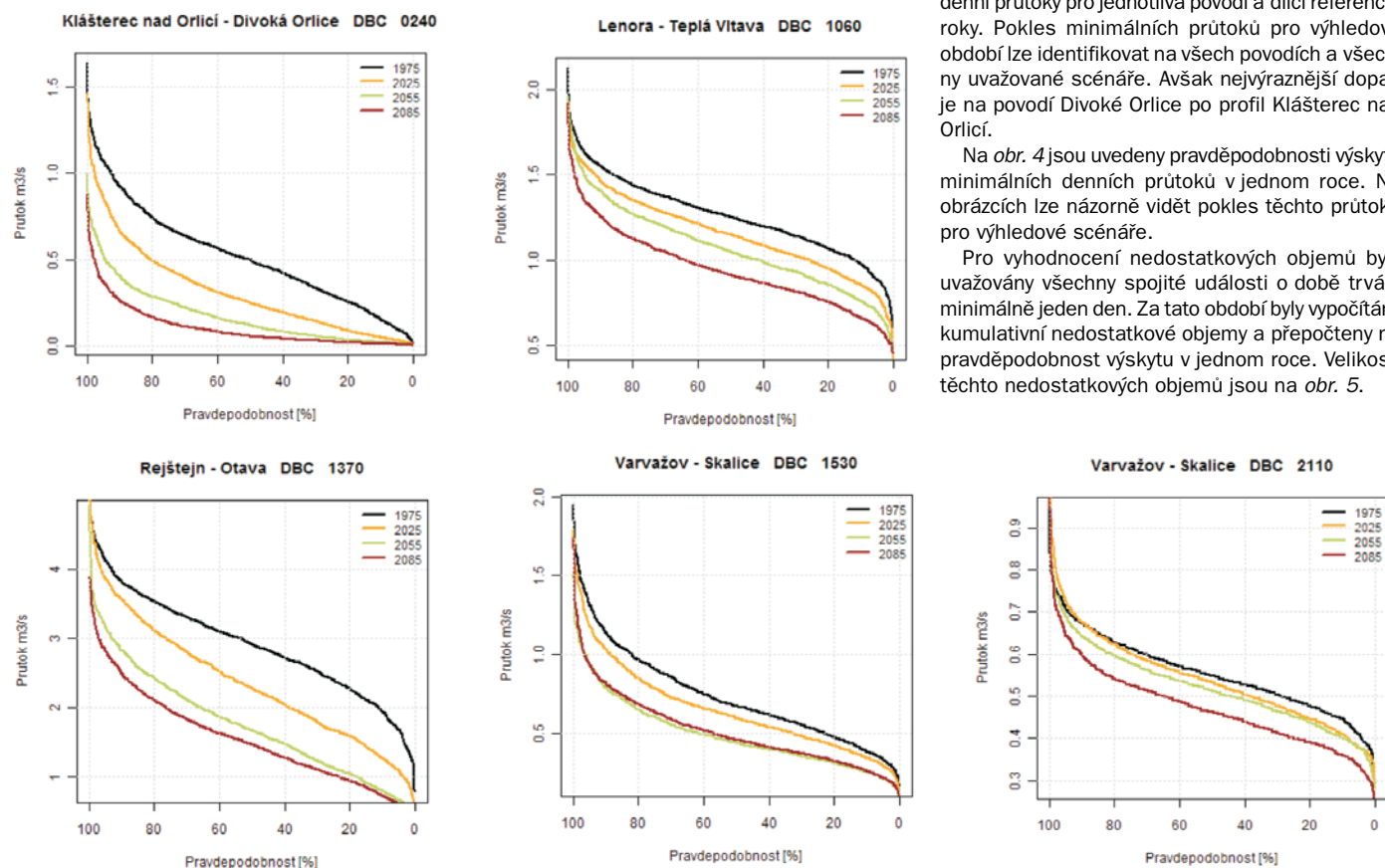
Hydrologické sucho

Pro posouzení hydrologického sucha byly modelovány průtoky modelem BILAN v denním kroku o délce trvání 1000 let. Pro kvantifikaci byly vytvořeny N-leté minimální denní průtoky, pravděpodobnosti výskytu minimálních denních průtoků v jednom roce a pravděpodobnosti výskytu nedostatkového objemu za celé řešené období.

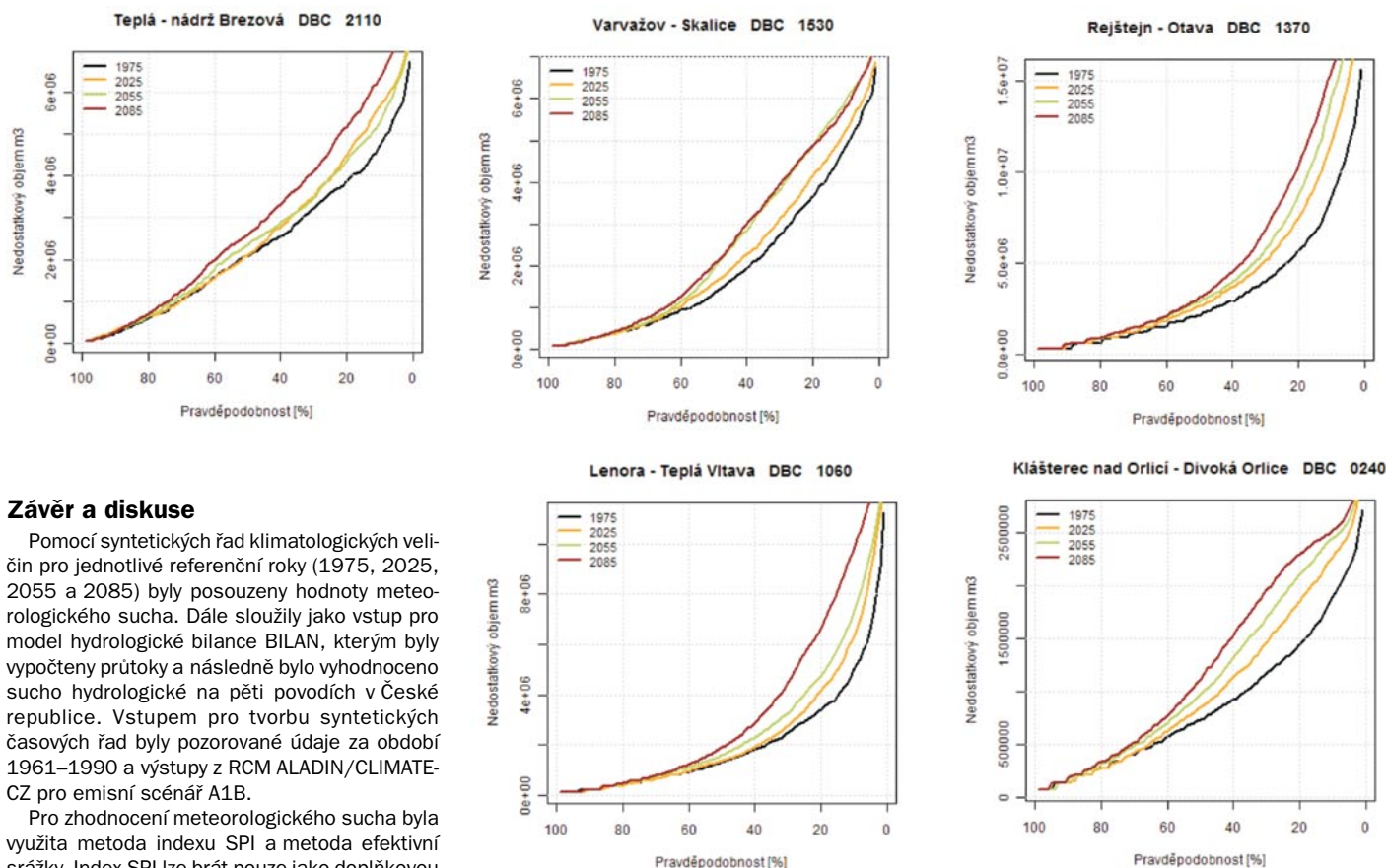
V tabulce 3 jsou znázorněny N-leté minimální denní průtoky pro jednotlivá povodí a dílčí referenční roky. Pokles minimálních průtoků pro výhledová období lze identifikovat na všech povodích a všechny uvažované scénáře. Avšak nejvýraznější dopad je na povodí Divoké Orlice po profil Klášterec nad Orlicí.

Na obr. 4 jsou uvedeny pravděpodobnosti výskytu minimálních denních průtoků v jednom roce. Na obrázcích lze názorně vidět pokles těchto průtoků pro výhledové scénáře.

Pro vyhodnocení nedostatkových objemů byly uvažovány všechny spojitě události o době trvání minimálně jeden den. Za tato období byly vypočítány kumulativní nedostatkové objemy a přepočteny na pravděpodobnost výskytu v jednom roce. Velikosti těchto nedostatkových objemů jsou na obr. 5.



Obr. 4. Pravděpodobnosti výskytu minimálních denních průtoků v jednom roce pro jednotlivé scénáře



Obr. 5. Pravděpodobnost výskytu nedostatkového objemu za jeden rok pro jednotlivé časové horizonty

Závěr a diskuse

Pomocí syntetických řad klimatologických veličin pro jednotlivé referenční roky (1975, 2025, 2055 a 2085) byly posouzeny hodnoty meteorologického sucha. Dále sloužily jako vstup pro model hydrologické bilance BILAN, kterým byly vypočteny průtoky a následně bylo vyhodnoceno sucho hydrologické na pěti povodích v České republice. Vstupem pro tvorbu syntetických časových řad byly pozorované údaje za období 1961–1990 a výstupy z RCM ALADIN/CLIMATE-CZ pro emisní scénář A1B.

Pro zhodnocení meteorologického sucha byla využita metoda indexu SPI a metoda efektivní srážky. Index SPI lze brát pouze jako doplňkovou informaci, nevypovídá o skutečnosti, jak byla epizoda sucha intenzivní v globálním měřítku, ale pouze v měřítku řešeného území. O charakteristikách spíše vypovídají parametry rozdělení, které byly použity pro vyhodnocení jednotlivých řad. Metoda efektivní srážky dává obecnější výsledky a v praxi dává lépe využitelné výsledky. Pomocí standardizace bylo provedeno srovnání jednotlivých povodí (obr. 3)

Při kvantifikaci hydrologického sucha lze pozorovat negativní dopad na minimální denní průtoky (obr. 4) pro jednotlivé časové horizonty, kdy pokles těchto průtoků je v řádu desítek procent, a proto nebudou splňovat současné hodnoty minimálních zůstatkových průtoků. Ještě větší pokles byl simulován u N-letých minimálních denních průtoků (tabulka 3), kde pro časový horizont k roku 2085 je pokles pro dobu opakování 20 let v rozmezí 30–50 % pro všechna povodí kromě povodí Divoké Orlice, kde je tento pokles ještě mnohem výraznější. Zajímavé je, že i přes pokles minimálních denních průtoků není u nedostatkových objemů tento trend tak výrazný a liší se povodí od povodí. K největší změně dochází na povodí Teplé Vltavy.

Pro vyhodnocení dopadů změn klimatu na intenzitu meteorologického sucha metodou SPI a efektivní srážky jsou nevýhodou vstupní data (počítají pouze se změnou srážkových úhrnů). Ostatní klimatologické veličiny pro posouzení meteorologického sucha nebyly uvažovány.

Při kvantifikaci dopadu změn klimatu na suchá období se jeví jako vhodnější kvantifikace hydrologického sucha (vstupem jsou klimatologické veličiny, z kterých jsou počítány průtoky). Následné vyhodnocení průtoků závisí na zvolené metodě. U metody deficitních objemů lze jako problém identifikovat jednotnou úroveň mezních hodnot (ve studii Q_{330}), které nemusí být směrodatné pro jednotlivá povodí. Řešením by mohlo být vytvoření nové metodiky na tvorbu minimálních zůstatkových průtoků, které by byly dále použity jako mezní hodnoty.

Poděkování

Tento článek vznikl v rámci řešení projektu VaV „Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky“ (SP/1a6/125/08).

Literatura

- Blinka, P. (2002) Metoda hodnocení sucha. Česko-slovenská bioklimatologická konference, s. 32–44. ISBN 80-85813-99-8.
 IPCC (2000) Special Report on Emissions Scenarios – SRES. [on-line] Dostupné z URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>. [cit. 2008-22-4].
 Hanel (2010) Vodní hospodářství, VTEI, v tisku.
 Horáček (2009) Vodní hospodářství, VTEI, listopad 2009.
 LARS WG (2010). <http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/larswg.php>

- Lloyd-Hughes, B. and Saunders, MA. (2002) A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, vol. 22.
 McKee, TB., Doesken, NJ., and Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, January 17–22, Anaheim, California, p. 179–184.
 Semenov, MA., Brooks, RJ., Barrow, EM., and Richardson, CW. (1998) Comparison of WGEM and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, Vol. 10, Inter-research, Germany, p. 95–107.
 Tallaksen, LM. and van Lanen HAJ. (eds) (2004) Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam.
 Wilhite, DA. and Byun, H. (1999) Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*, vol. 12, No. 9, p. 2747–2756. ISSN: 0894-8755.

Adam Vizina^{1,2}, Martin Hanel^{1,2}
¹VÚV TGM, v.v.i.

²Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze
 Příspěvek prošel lektorským řízením.

Assessment of Drought by Using Synthetic Time Series in the Modified Climate (Vizina, A.; Hanel, M.)

Key words

drought – synthetic time series – SPI, ALADIN/CLIMATE-CZ – deficit volume – effective precipitation – LARS-WG

The present article deals with the assessment of hydrological and meteorological droughts and their quantification in conditions affected by climate change. To assess the probability of various types were created by weather generator (LARS WG, 2010) 1000-year time series of daily air temperature, precipitation. Then was modeled hydrological balance by model BILAN. As input data were used daily time series of the five basins for period 1961–1990. To simulate the conditions affected by climate change were used outputs from regional climate model (RCM) ALADIN/Climate-CZ for the reference years 2025, 2055 and 2085. Meteorological drought was assessed by SPI (Standard precipitation index) and the effective precipitation, hydrological drought was assessed by deficit volumes and determining the N-year occurrence of minimum flows.

NEJVÝZNAMNĚJŠÍ OBDOBÍ SUCHA V LETECH 1956–2009 NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

Pavel Tremil

Klíčová slova

sucho – metoda součtových řad – metoda efektivních srážek – metoda nedostatkových objemů

Souhrn

Příspěvek vymezuje období sucha pomocí metod součtových řad, efektivních srážek a nedostatkových objemů a porovnává výsledky jejich výstupů. Kromě samotného srovnání vhodnosti užití jednotlivých metod pro vyhodnocení výskytu období sucha je analyzován i počet dnů během roku, které jsou součástí období sucha, a zhodnocena četnost výskytu dnů sucha v jednotlivých letech a pětiletých obdobích let 1956–2009.

Úvod

Téměř každý rok postihne některý z regionů České republiky sucho. Sucho má prvotní příčiny v atmosférických procesech. Převládá nedostatek srážek a vysoký výpar. U hydrologického sucha jsou dalšími limitními faktory možnost doplňování vody ze zásob podzemních vod či zásoba vody ve sněhové pokrývce, popř. možnost nadlepšování průtoků pomocí přehradních nádrží, rybníků apod.

Podle sektoru, na který sucho působí, resp. podle faktorů vzniku sucha lze zjednodušeně rozdělit sucho na meteorologické, hydrologické, agronomické, socioekonomické apod. a poté důsledky jednotlivých typů sucha ve vybraných sektorech analyzovat, avšak stále se zřetelem na synoptický původ prvotních příčin sucha. Pro analýzu jednotlivých typů sucha existuje mnoho metod. Výzkum se zpravidla soustředí pouze na jeden typ sucha, bez hodnocení návaznosti na ostatní typy. Tento příspěvek se proto pokusí porovnat výsledky vybraných metod pro hodnocení meteorologického a hydrologického sucha. Budou srovnávány výsledky metody součtových řad, metody efektivních srážek (metody užívaných pro analýzu meteorologického sucha) a metody nedostatkových objemů (která se užívá pro analýzu hydrologického sucha).

Data a metody

Použitá data

Pro vypracování příspěvku byly použity údaje poskytnuté ČHMÚ o průměrných denních teplotách vzduchu a denních úhrnech srážek z meteorologických stanic Brandýs nad Labem, Bechyně, Přibyslav, Brno-Pisárky, Olomouc-Slavonín a Opava a údaje o velikosti průtoků z vodoměrných stanic v Brandýse nad Labem, Bechyni, Sázavě u Žďáru nad Sázavou (v dalším textu zkráceně Sázava), Brně-Poříčí, Olomouci-Nových Sadech a Opavě. Byla vyhodnocena data z období let 1956–2009, pouze u řady průtoků v Brandýse nad Labem byla analyzována datová řada do konce roku 2006, neboť v tomto roce byla ukončena měření.

Metoda součtových řad

Metodu součtových řad pro analýzu výskytu období sucha navrhl I. Sládek (Sládek, 2001). Lze ji užít ale např. i pro určení období převládajících teplot nad určitou hranicí (Sládek, 1989), analýzu ročního chodu teploty (Tremil, 2010a), zjišťování počtu dní se slunečním svitem, k analýze kvality vody apod. Více informací o historii užití metody součtových řad lze nalézt v příspěvku Období sucha – výskyt a možnost jeho predikce (Tremil, 2010b).

Metoda součtových řad pro hodnocení sucha je založena na kumulaci transformovaných hodnot srážek spolu s vyhodnocením údajů o teplotě vzduchu.

Nejprve se ze srážkových úhrnů vymezi období nedostatku srážek. Jednotlivým srážkovým úhrnům je přiřazena váha, srážkové úhrny jsou transformovány na tzv. proměnnou Z , kde se nulovým nebo neměřitelným srážkám přiřadí hodnota -1 , srážkám v intervalu $0,1$ – $0,2$ mm hodnota 0 a poté se transformovaný interval srážek zvětší o dvojnásobek velikosti předešlého intervalu a hodnota Z o 1 . Hodnoty pomocné proměnné Z se postupně kumulují, čímž vznikne součtová řada. Na základě hledání lokálních extrémů součtové řady je určeno období s nedostatkem srážek. Výraznost těchto vymezených období se následně analyzuje pomocí tzv. indexu suchosti S , který závisí jednak na velikosti rozdílu extrémů součtové řady hodnot Z každého jednotlivého období sucha a jednak na sumě denních průměrů teplot vzduchu v daném období sucha, přičemž se uvažuje o sumě teplot nad určitou hranicí (obvykle nad 0 °C, což je případ i tohoto příspěvku).

Dny s nízkým indexem suchosti lze charakterizovat jako dny, v nichž převládá období bez srážek. Pro dny se suchem musí být index suchosti větší. V tomto článku jsou za dny s výskytem sucha považovány dny, v nichž je index suchosti S větší než 1 .

Ukázku konkrétního výpočtu meteorologického sucha metodou součtových řad lze nalézt v článku s názvem Spells of Drought: Climatological Treatment (Sládek, 2001), popř. v článku Vymezení období sucha a období převládající teploty vzduchu pomocí metody součtových řad na příkladu Vráže u Písku (Fiala, 2006).

Metoda efektivních srážek

Metodu efektivních srážek poprvé použili H.-R. Byun a D. A. Wilhite (1999). Metoda spočívá v kumulaci předchozích srážek k vybranému datu, kdy se kumulují vážené srážky uplynulého roku. Velikost vážené srážky pro předcházející n -tý den roku (kde n má hodnotu od 0 do 364 , přičemž 0 je vybrané datum a 364 je datum před rokem) je dána podílem velikosti srážky pro předcházející n -tý den roku a jejím stářím ($n+1$). Takto získaná charakteristika srážek (kumulovaná hodnota vážené srážky) je nazývána EP (Effective Precipitation – efektivní srážka). Z této charakteristiky jsou poté odvozeny další veličiny. Průměrná hodnota EP pro jednotlivé kalendářní dny v roce se nazývá MEP. Odchylka EP od MEP se nazývá DEP. Pro srovnávací výpočet pro tento článek byl využit indikátor SEP, který standardizuje DEP pomocí směrodatné odchylky EP. Díky této standardizaci lze porovnávat indexy DEP mezi různými místy. Dále byl odvozen index PD_{st} , který hodnotí srážkové poměry suchého období a srovnává je s dlouhodobým srážkovým normálem pro jednotlivé kalendářní dny suchého období. Výpočet je standardizován směrodatnou odchylkou normálu dlouhodobých srážek pro každý den suchého období. Obdobným indexem, ale pro teplotu vzduchu, je index T_{st} . Na základě kombinace (součtu) indexů PD_{st} a T_{st} vzniká index DI. Ten srovnává velikost srážek a výparu. Čím nižší je tento index, tím větší je rozdíl mezi srážkami a výparem.

Jako dny, ve kterých bylo zaznamenáno sucho, byly v této studii uvažovány dny s DI pod -10 .

Podrobný popis všech indikátorů užívaných v souvislosti s metodou efektivních srážek lze nalézt v článku Objective Quantification of Drought Severity and Duration (Byun, Wilhite, 1999), popř. v češtině v článku Klimatologické hodnocení sucha a suchých období na území České republiky v letech 1876–2002 (Blinka, 2005).

Metoda nedostatkových objemů

Pro vyhodnocení hydrologického sucha byla použita metoda nedostatkových objemů. Metoda nedostatkových objemů se zabývá analýzou období, kdy je průtok menší než mezní průtok, a popisem vlastností objemů, které chybí pro doplnění na mezní průtok. Hodnota nedostatkového objemu odpovídá množství vody, které by bylo teoreticky potřeba akumulovat v době hydrologického sucha, aby byl zabezpečen zvolený mezní průtok. Hodnota nedostatkového objemu závisí na zvolené hodnotě požadovaného mezního průtoků. V tomto příspěvku byl použit pro porovnávání vlastností mezního průtok Q_{300} (300-denní průtok). Tento mezní průtok byl zvolen z toho důvodu, že ještě stále dobře charakterizuje malé průtoky, na straně druhé byl předpoklad, že by se tento průtok měl vyskytnout ve většině let, a tudíž že bude možno dobře srovnat jeho časovou shodu s výsledky metody součtových řad a metody efektivních srážek. Pro výpočet nedostatkových objemů byl použit program EXDEV (Experiments with Deficit Volumes).

Podrobnější popis metody nedostatkových objemů lze nalézt např. v učebnici Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater (Tallaksen et al., 2004).

Výsledky

Počet dnů, které jsou součástí období sucha

Nejprve bylo analyzováno období roku s nejčastějším výskytem sucha (obr. 1). Metoda součtových řad indikuje v největší míře období s nejčastějším výskytem sucha v období od 2. poloviny září do konce října, kdy se vyskytlo meteorologické sucho přibližně ve 40–50 % všech dnů, v Brně 11. října dokonce v 61 % všech dnů vyhodnocovaného období let 1956–2009. Dalším častým obdobím výskytu meteorologického sucha je druhá polovina měsíce dubna (kdy např. v Bechyni, Brně nebo v Olomouci byla kolem 23. dubna až polovina dnů suchá). Obecně mírné navýšení počtu suchých dnů oproti ročnímu průměru je zaznamenáváno již od měsíce března. Naopak nejnižší počet suchých dnů indikuje metoda součtových řad v období Medarda v měsíci červnu a na většině stanic i v zimě, kdy je malý výpar. Výjimkou je klimatologická stanice v Opavě, kde je i v zimě relativně velký počet dnů se suchem (např. na 15. leden připadá až 52 % dnů se suchem). Tuto zvýšenou četnost sucha lze pozorovat i na hydrologickém suchu analyzovaném pomocí metody nedostatkových objemů, jež indikuje zhruba dvojnásobnou četnost hydrologického sucha než na ostatních vodoměrných stanicích s obdobnou velikostí průtoků.

Dále byly vyhodnocovány výsledky metody efektivních srážek. Denní hodnoty odchylek této metody od ročního průměru jsou oproti výsledkům získaným metodou součtových řad významně vyrovnanější s tím, že odchylka denních hodnot se pohybuje do 10 % od ročního průměru. V Brandýse nad Labem je procento dnů se suchem po celý rok skoro stejné. Proč je u četnosti počtu dnů se suchem analyzovaného pomocí metody efektivních srážek takto malá variabilita hodnot? Je to kvůli vztažení hodnot k indexu MEP. Metoda efektivních srážek se proto hodí k analýze suchosti období

oproti typickému průběhu v průměrném roce (např. zda je podzim sušší než obvykle), avšak k hodnocení delšího období nikoliv (tam pouze z hlediska počtu četností jednotlivých dnů se suchem a hodnocení změn jejich počtu). U hodnocení delšího období je možno denní hodnoty indexu MEP nahradit ročním průměrem z denních hodnot indexu MEP, čímž by byly denní hodnoty analyzované charakteristiky porovnávány v celém roce s jednou hodnotou indexu MEP a bylo by možno hodnotit i variabilitu v jednotlivých dnech.

Hydrologické sucho hodnocené pomocí metody nedostatkových objemů je v roce nejčetnější buď v měsíci srpnu, nebo v měsíci září (ve dnech s nejčetnějšími suchy připadá na tyto dny až 40 % všech dnů). Nejméně časté je naopak na konci zimy a na jaře, v měsících březnu až květnu, kdy jsou průtoky značně nadlepšovány táním sněhu a pomocí zásob podzemních vod a na jednotlivé dny období let 1956–2009 nepřipadá ani jeden den výskytu sucha, popř. jeden či ojedinelé dva (Brno a Opava). Na intenzitě hydrologického sucha se kromě přirozených vlivů podílí i člověk, který může svými zásahy hydrologické sucho zmírnit – např. upouštěním přehrad či rybníků (viz obr. 1, kde je zachycena nulová četnost such na vodoměrných stanicích Bechyně a Sázava v měsíci říjnu, jež je důsledkem upouštění rybníků), nebo naopak zhoršit nadměrnými odběry vody – např. v povodí Blšanky (Kašpárek a Mrkvičková, 2009).

Počet dnů sucha v jednotlivých letech

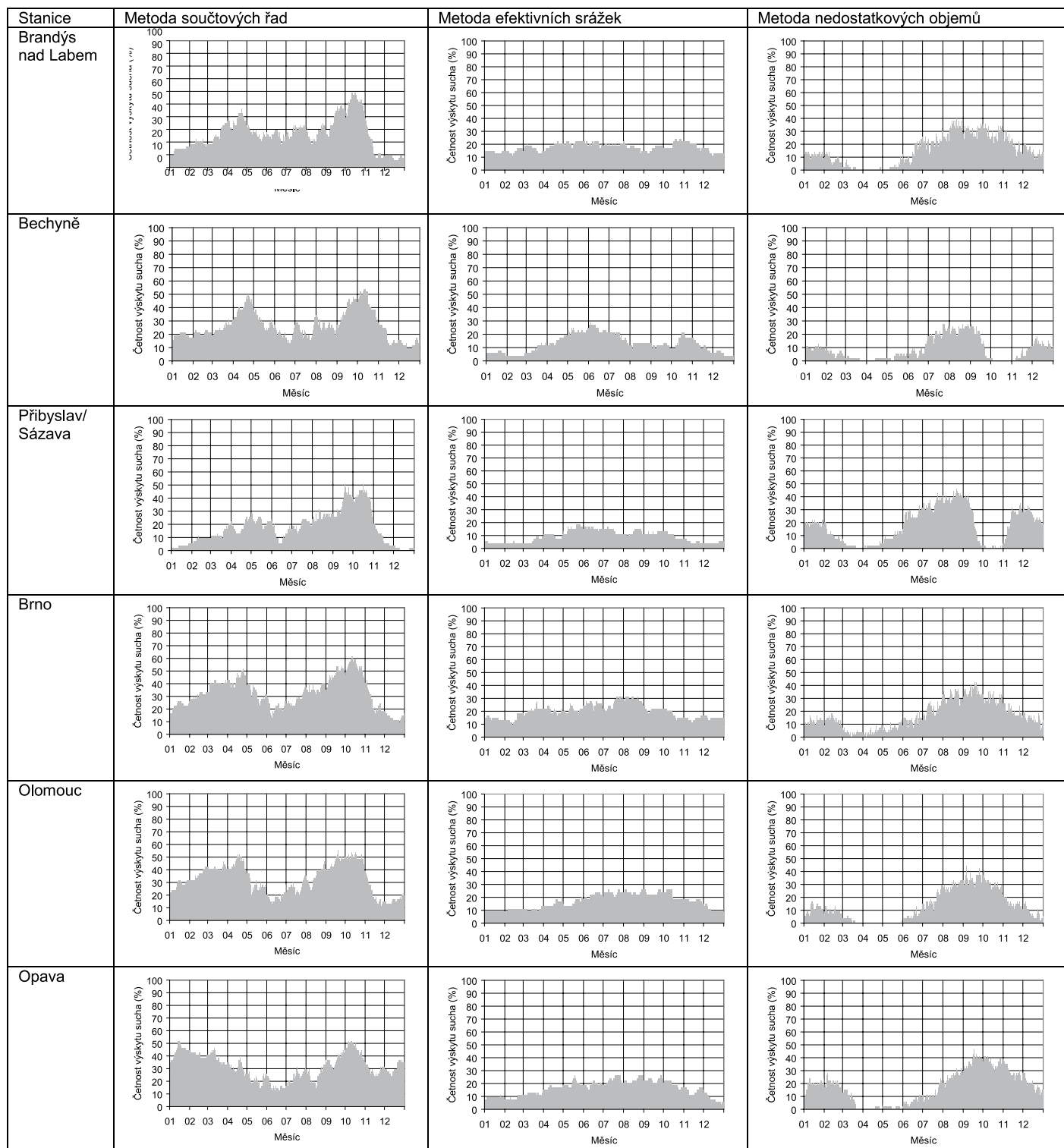
Metoda součtových řad

Dále byl hodnocen počet dnů se suchem v jednotlivých letech. Podle výsledků metody součtových řad byly velmi suché roky 1959, 1982 a 2003, kdy na většině z analyzovaných stanic překročil počet dnů se suchem 200 dnů. Nad 150 dnů se suchem v roce bylo v letech 1964, 1976 a 1991 a na Moravě i v letech 1972, 1983, 1989 a v roce 1992. Na jedné nebo dvou stanicích byl překročen počet 150 dní se suchem ještě v letech 1957, 1960, 1967–1969, 1971, 1973, 1978, 1984, 1988, 1990, 1993, 1997, 1998, 2000 a 2005.

Nejvyšší počet dnů se suchem byl v Olomouci – 239 dnů (v roce 1997), dále v Bechyni 235 dnů (v roce 1959), v Brně 221 dnů (v roce 1998), v Opavě 215 dnů (v roce 1982), v Brandýse nad Labem 212 dnů (v roce 1991) a v Přibyslavi 207 dnů (v roce 1959).

Z hlediska jednotlivých pětiletých období let 1956–2009 byl největší počet suchých dnů pravděpodobně v pětiletí 1971–1975, v Brně a Olomouci je nadprůměrný výskyt suchých dnů i v pětiletí 1996–2000.

Největší počet dnů se suchem podle jednotlivých pětiletí byl v Opavě



Obr. 1. Procento dnů, které jsou součástí období sucha

– 782 dnů (v pětiletí 1971–1975), v Brně 711 dnů (v pětiletí 1971–1975), v Olomouci 699 dnů (v pětiletí 1996–2000), v Bechyni 616 dnů (v pětiletí 1981–1985), v Brandýse nad Labem 593 dnů (v pětiletí 1986–1990) a v Přibyslavi 433 dnů (v pětiletí 1956–1960). Podrobný počet dnů sucha v jednotlivých pětiletích na každé stanici je uveden v *tabulce 1*.

Pro četnost výskytu období sucha platí, že s vyšší mírou kontinentality podnebí na meteorologické stanici roste pravděpodobně i četnost počtu dní se suchem.

Tabulka 1. Počet dnů meteorologického sucha určených metodou součtových řad v jednotlivých pětiletích období 1956–2009

| Od | Do | Bechyně | Brandýs nad Labem | Brno | Olomouc | Opava | Přibyslav |
|--------|------|---------|-------------------|------|---------|-------|-----------|
| 1956 | 1960 | 518 | 454 | 669 | 607 | 436 | 433 |
| 1961 | 1965 | 400 | 430 | 587 | 472 | 496 | 220 |
| 1966 | 1970 | 286 | 388 | 552 | 552 | 669 | 324 |
| 1971 | 1975 | 510 | 581 | 711 | 639 | 782 | 351 |
| 1976 | 1980 | 488 | 438 | 472 | 602 | 502 | 301 |
| 1981 | 1985 | 616 | 520 | 658 | 617 | 673 | 366 |
| 1986 | 1990 | 574 | 593 | 626 | 637 | 606 | 343 |
| 1991 | 1995 | 512 | 575 | 605 | 621 | 676 | 333 |
| 1996 | 2000 | 496 | 524 | 703 | 699 | 472 | 229 |
| 2001 | 2005 | 468 | 416 | 536 | 540 | 564 | 384 |
| 2006 | 2009 | 182 | 325 | 344 | 404 | 423 | 230 |
| Celkem | | 5050 | 5244 | 6463 | 6390 | 6299 | 3514 |

Pozn.: Poslední vyhodnocované období let 2006–2009 je čtyřletí.

Metoda efektivních srážek

Největší počet dnů se suchem byl v letech 1989, 1992 a 2007, kdy bylo na většině stanic více než 200 dnů se suchem. Nad 150 dnů se suchem bylo ještě v letech 1982, 1998 a 2000. Další případy s vyšší četností suchých dnů (nad 150 dnů se suchem za rok), které byly zaznamenány alespoň na jedné stanici, nikoliv na většině stanic, byly v letech 1969, 1973, 1974, 1976, 1981, 1983, 1988, 1999 a 2003–2009.

Největší počet dnů se suchem byl v Brně – 343 dnů (v roce 1989), v Olomouci 320 dnů (v roce 1989), v Brandýse nad Labem 320 dnů (v roce 2004), v Bechyni 256 dnů (v roce 1989), v Opavě 241 dnů (v roce 2007) a v Přibyslavi 207 dnů (v roce 2007).

Největší počet dnů se suchem v pětiletí byl v Olomouci v pětiletí 1986–1990 (709 dnů), v Brně ve čtyřletí 2006–2009 (705 dnů), v Brandýse nad Labem v pětiletí 1996–2000 (680 dnů), v Opavě ve čtyřletí 2006–2009 (660 dnů), v Bechyni v pětiletí 1981–1985 (stejně pětiletí jako u metody součtových řad, délka období 580 dnů) a v Přibyslavi v pětiletí 2001–2005 (436 dnů). Podrobné počty dnů sucha v jednotlivých pětiletích na každé stanici jsou uvedeny v *tabulce 2*.

Tabulka 2. Počet dnů meteorologického sucha určených metodou efektivních srážek v jednotlivých pětiletích období 1956–2009

| Od | Do | Bechyně | Brandýs nad Labem | Brno | Olomouc | Opava | Přibyslav |
|--------|------|---------|-------------------|------|---------|-------|-----------|
| 1956 | 1960 | 215 | 120 | 77 | 157 | 114 | 131 |
| 1961 | 1965 | 31 | 86 | 217 | 39 | 160 | 27 |
| 1966 | 1970 | 92 | 37 | 104 | 104 | 423 | 18 |
| 1971 | 1975 | 53 | 370 | 140 | 583 | 147 | 58 |
| 1976 | 1980 | 73 | 31 | 193 | 50 | 0 | 210 |
| 1981 | 1985 | 580 | 326 | 346 | 223 | 415 | 203 |
| 1986 | 1990 | 367 | 413 | 663 | 709 | 455 | 71 |
| 1991 | 1995 | 442 | 352 | 435 | 354 | 109 | 116 |
| 1996 | 2000 | 234 | 680 | 534 | 294 | 491 | 198 |
| 2001 | 2005 | 137 | 622 | 566 | 304 | 226 | 436 |
| 2006 | 2009 | 243 | 452 | 705 | 540 | 660 | 359 |
| Celkem | | 2467 | 3489 | 3980 | 3357 | 3200 | 1827 |

Pozn.: Poslední vyhodnocované období let 2006–2009 je čtyřletí.

Metoda nedostatkových objemů

U hydrologického sucha analyzovaného pomocí metody nedostatkových objemů trvalo toto hydrologické sucho více než 150 dnů na většině stanic pouze v roce 2003. Na jedné až dvou stanicích trvalo déle než 150 dnů ještě v letech 1959, 1964, 1973, 1983–1984, 1990–1991, 1993–1994, 1999, 2000 a 2005.

Nejvíce dnů s hydrologickým suchem bylo na vodoměrné stanici v Brně – 219 dnů (v roce 1973), v Opavě 203 dnů (v roce 1990), v Sázavě 192

dnů (v roce 2000), v Olomouci 166 dnů (v roce 1993), v Brandýse nad Labem 165 dnů (v roce 1973) a v Bechyni 136 dnů (v roce 2003).

Nejvíce dnů s hydrologickým suchem bylo v pětiletích 1961–1965 a 1991–1995, nejméně pak v pětiletích 1966–1970 a 1976–1980.

Z hlediska jednotlivých pětiletí bylo nejdelší hydrologické sucho v Brně v pětiletí 1981–1985 (643 dnů), v Opavě v pětiletí 1961–1965 (572 dnů), v Sázavě v pětiletí 1991–1995 (508 dnů), v Brandýse nad Labem v pětiletí 1991–1995 (442 dnů), v Olomouci v pětiletí 2001–2005 (433 dnů) a v Bechyni v pětiletí 1991–1995 (330 dnů).

Naopak ve čtyřletí 2006–2009 nebylo v Brně a v Bechyni hydrologické sucho na mezním průtoku Q_{300} detekováno. To je možno vysvětlit použitou metodikou, kdy jsou indikovány pouze nedostatkové objemy nad mezním průtokem Q_{300} (tj. mezní průtoky mezi Q_{300} až Q_{365}). Pokud jsou průtoky těsně pod mezním průtokem Q_{300} , tak již detekovány nejsou. V období let 2006–2009 bylo těchto případů v Bechyni i Brně několik. Podrobné počty dnů sucha v jednotlivých pětiletích na každé stanici jsou uvedeny v *tabulce 3*.

Tabulka 3. Počet dnů hydrologického sucha určených metodou nedostatkových objemů v jednotlivých pětiletích období 1956–2009

| Od | Do | Bechyně | Brandýs nad Labem | Brno | Olomouc | Opava | Sázava |
|--------|------|---------|-------------------|------|---------|-------|--------|
| 1956 | 1960 | 61 | 246 | 530 | 222 | 271 | 113 |
| 1961 | 1965 | 176 | 414 | 506 | 363 | 572 | 323 |
| 1966 | 1970 | 198 | 189 | 100 | 79 | 238 | 342 |
| 1971 | 1975 | 115 | 332 | 488 | 116 | 257 | 312 |
| 1976 | 1980 | 98 | 116 | 156 | 71 | 32 | 207 |
| 1981 | 1985 | 148 | 216 | 643 | 303 | 381 | 393 |
| 1986 | 1990 | 109 | 164 | 334 | 159 | 364 | 270 |
| 1991 | 1995 | 330 | 442 | 544 | 425 | 477 | 508 |
| 1996 | 2000 | 296 | 332 | 24 | 260 | 260 | 470 |
| 2001 | 2005 | 227 | 355 | 80 | 433 | 453 | 346 |
| 2006 | 2009 | 0 | 0* | 0 | 277 | 211 | 248 |
| Celkem | | 1758 | 2806 | 3405 | 2708 | 3516 | 3532 |

Pozn.: Poslední vyhodnocované období let 2006–2009 je čtyřletí.

Rozdíly mezi metodami

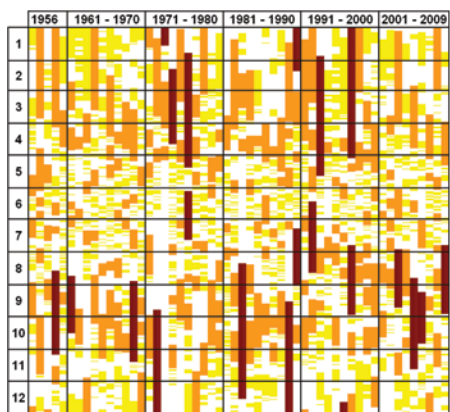
Rozdíly mezi vybranými metodami jsou zachyceny na *obr. 2*, jenž ukazuje rozdíly u hodnocených metod na příkladu analyzovaných dat z Olomouce. Obrázek znázorňuje jednak období, v nichž byla jednotlivá sucha zaznamenána, a jednak jejich intenzitu (oranžová a hnědá barva; u metody součtových řad a efektivních srážek jsou navíc žlutou barvou vyznačena období bez srážek či s malými srážkami a s malým výparem, v nichž sucho není, ale vyskytl se v nich malý index suchosti – období nebyla v analýze vlastností jednotlivých metod uvažována) – viz popis metod v kapitole Data a metody.

Je zřetelná odlišnost metody efektivních srážek oproti metodě součtových řad a metodě nedostatkových objemů. U metody efektivních srážek jsou nalezená období sucha podstatně delší než u ostatních metod. To souvisí s konstrukcí metody efektivních srážek, která je vztažena k proměnlivému indexu MEP, jenž má roční chod. Díky tomu je charakterizováno sucho u metody efektivních srážek vůči konkrétnímu ročnímu období – zda je sušší než obvykle, či nikoliv. Naopak u metody součtových řad a nedostatkových objemů jsou výsledky vztažené ke konstantě, která se během roku nemění.

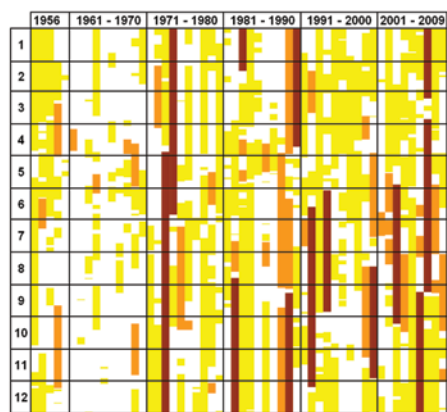
Výhodou metody součtových řad oproti ostatním metodám je, že se její výsledky vzhledem k délce vyhodnocovaného období nemění, na rozdíl od ostatních metod. U metody efektivních srážek se s časem mírně mění hodnota MEP, vůči níž se porovnává srážková abnormalita. Avšak ve srovnání s rozdíly, které se vyskytují u nedostatkových objemů u stejnojmenné metody, jsou rozdíly zanedbatelné. U metody nedostatkových objemů se totiž může lišit velikost mezi jednotlivými zvolenými mezními nedostatkovými objemy v různé dlouhých vyhodnocovaných obdobích i v řádu desítek procent a zásadní roli hraje i zvolená velikost nedostatkového objemu.

Mezi metodami součtových řad a nedostatkových objemů je největší shoda výsledků v období od srpna do listopadu, nejmenší naopak v období od března do května, na části stanic až do června. Tato neshoda je způsobena minimálním počtem dnů s hydrologickým suchem. To je dáno tím, že jsou v jarním období nepříznivé synoptické podmínky dostatečně kompenzovány navýšením odtoku v důsledku tání sněhu a velké dotace vody ze zásob podzemních vod. V období léta a podzimu jsou naopak synoptické faktory pro vznik obou typů such dominantní.

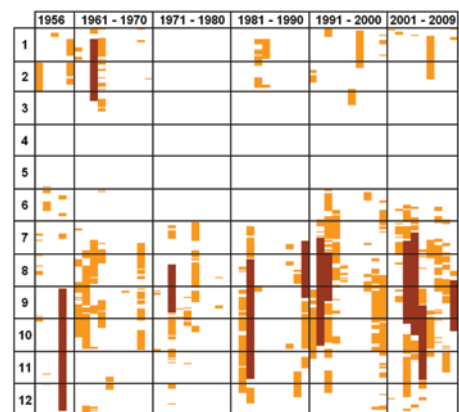
U výskytu významných období such platí, že na většině analyzovaných stanic předcházelo meteorologické sucho vymezené pomocí metody součtových řad hydrologickému suchu vymezenému metodou nedostatkových



a) Metoda součtových řad (žlutě – index S od 0 do 1, oranžově – index S od 1 do 20, hnědě – index S nad 20)



b) Metoda efektivních srážek (žlutě – index DI větší než -10, avšak různý od 0, oranžově – index DI od -50 do -10, hnědě – index DI pod -50)



c) Nedostatkové objemy (oranžově – nedostatkový objem od 0 do 1 %, hnědě – nedostatkový objem nad 1 % objemu z průměrného objemu odtoklé vody)

Obr. 2. Sucho a jeho intenzita v Olomouci vymezené metodami součtových řad, efektivních srážek a nedostatkových objemů v období let 1956–2009 (Pozn.: První vyhodnocované období je pětiletí 1956–1960 (vzhledem k nedostatku místa uveden pouze počáteční rok 1956), poslední vyhodnocované období 2006–2009 je čtyřletí)

objemů přibližně o osm dní. Mezi konci meteorologického a hydrologického sucha žádný těsnější vztah vyhodnocen nebyl.

Grafické znázornění období překryvu všech vymezených období sucha za pomoci metody součtových řad a nedostatkových objemů je ukázáno na obr. 3.

Závěr

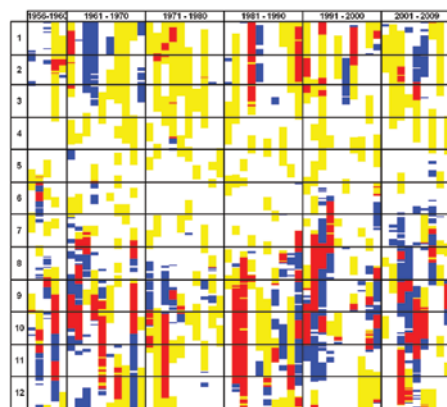
V rámci příspěvku byla hodnocena vazba mezi meteorologickým suchem analyzovaným metodou součtových řad a meteorologickým suchem analyzovaným metodou nedostatkových objemů. Bylo zjištěno, že mezi meteorologickým suchem analyzovaným metodou součtových řad a meteorologickým suchem existuje vazba především v období měsíců srpen až listopad. V tomto období jsou průtoky ve vodních tocích malé a sucho působí největší problémy. Naopak v jarním období je vztah mezi meteorologickým a hydrologickým suchem minimální, neboť hlavním činitelem, který ovlivňuje průtoky, je zvýšený odtok z tajícího sněhu a nadlepšování množství vody z podzemních vod. Velikost hydrologického sucha ovlivňuje i možnost nadlepšování vody z přehradních nádrží a další činnosti člověka, což je velmi dobře patrné na analýze hydrologického sucha na vodoměrných stanicích Bechyně a Sázava, u nichž díky vypouštění rybníků v měsíci říjnu hydrologické sucho nenastává. U meteorologického sucha analyzovaného pomocí metody efektivních srážek bylo potvrzeno, že se tato metoda hodí spíše k analýze suchosti hodnoceného období ve srovnání s průměrem daného kalendářního období než ke srovnání s jinými obdobími roku či metodami.

Poděkování

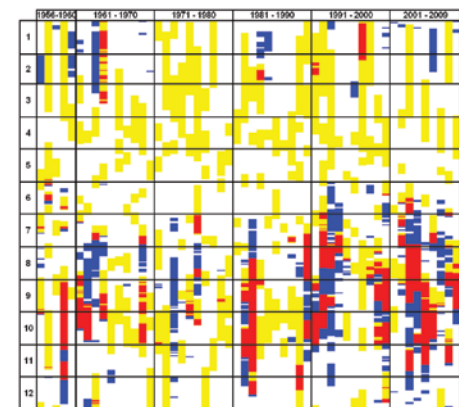
Vznik tohoto příspěvku byl podpořen Ministerstvem životního prostředí ČR v rámci subprojektu Stanovení vhodných indikátorů pro identifikaci výskytu, předpověď a vyhodnocení intenzity období sucha pro podmínky České republiky, který je součástí výzkumného záměru Výzkum a ochrana hydrosféry – výzkum vztahů a procesů ve vodní složce životního prostředí, orientovaný na vliv antropogenních tlaků, její trvalé užívání a ochranu, včetně legislativních nástrojů (identifikační kód MZP0002071101).

Literatura

- Blinka, P. (2005) Klimatologické hodnocení sucha a suchých období na území České republiky v letech 1876–2002. *Meteorologické zprávy*, roč. 58, č. 1, s. 10–18. ISSN 0026-1173.
- Byun, HR. and Wilhite, DA. (1999) Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*, vol. 12, No. 9, p. 2747–2756. ISSN 0894-8755.
- Fiala, T. (2006) Vymezení období sucha a období převládající teploty vzduchu pomocí metody součtových řad na příkladu Vráže u Písku. *Meteorologické zprávy*, roč. 59, č.3, s.76-79. ISSN 0026-1173.
- Kašpárek, L. a Mrkvíčková, L. (2009) Studie dopadů klimatické změny na hydrologické poměry v povodí Blšanky a návrh adaptačních opatření. *VTEI*, roč. 51, mimořádné číslo I, s. 19–22, příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2009. ISSN 0322-8916.
- Sládek, I. (1989) Určování nástupu a ukončení zvolených teplot vzduchu metodou součtových řad a odchylek. *Meteorologické zprávy*, roč. 42, č. 2, s.52–56. ISSN 0026-1173.



Opava



Olomouc

Obr. 3. Výskyt sucha analyzovaný pomocí metody součtových řad a metody nedostatkových objemů v Opavě a Olomouci v období let 1956–2009 (žlutě – meteorologické sucho analyzované metodou součtových řad, modře – hydrologické sucho analyzované metodou nedostatkových objemů, červeně – meteorologické i hydrologické sucho)

- Sládek, I. (2001) Spells of drought: climatological treatment. *Acta Universitatis Carolinae – Geographica*, roč. 36, č. 2, s. 147–153. ISSN 0300-5402.
- Tallaksen, LM. and Van Lanen, HAJ. (2004) *Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Amsterdam : Elsevier, 579 p.
- Tremil, P. (2010) Vymezení období největšího růstu a největšího poklesu teploty vzduchu a vody metodou součtových řad. *Meteorologické zprávy*, roč. 63, č. 2, s. 52–56, ISSN 0026-1173.
- Tremil, P. (2010) Období sucha – výskyt a možnost jeho predikce [přednesený příspěvek a příspěvek ve sborníku konference Hydrologické dny 2010, v tisku].

Mgr. Pavel Tremil
VÚV TGM, v.v.i., Praha
pavel_tremil@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

The most severe drought events in the Czech Republic in the period 1956–2009 (Tremil, P.)

Key words

drought – sum consecution method – effective precipitation – deficit volumes

In this paper, the historical drought periods are identified by sum consecution method, effective precipitation and deficit volumes. The characteristics of the identified droughts are compared and the differences are discussed. In addition, the length of the dry spells and the frequency of droughts are assessed for the individual years and pentades in the period 1956–2009.

HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ DOPADŮ ZMĚN KLIMATU V DENNÍM KROKU: KOREKCE SYSTEMATICKÝCH CHYB A PŘÍRŮSTKOVÁ METODA

Martin Hanel, Adam Vizina

Klíčová slova

přírůstková metoda – korekce systematických chyb – ALADIN-CLIMATE/CZ – změna hydrologické bilance

Souhrn

Přímé použití simulací regionálních klimatických modelů pro hydrologické modelování dopadů změn klimatu není možné kvůli systematickým chybám. Předkládaný článek se zabývá porovnáním výsledků modelování změn hydrologické bilance pomocí dvou metod používaných k překonání těchto chyb (přírůstková metoda a korekce systematických chyb). Obě metody jsou testovány na patnácti povodích v České republice. K hydrologickému modelování je použit model BILAN v denním kroku. V modelovaných obdobích (2025, 2055 a 2085) dochází ve většině případů k poklesu zkoumaných bilančních veličin. Rozdíly mezi změnami odtoku podle jednotlivých metod jsou v případě let 2025 a 2085 zpravidla menší než 20 %. Pro rok 2055 se výsledky relativně rozcházejí v důsledku podstatných rozdílů ve změnách relativní vlhkosti vzduchu. Překvapivě jsou změny hydrologické bilance podle původní nekorigované simulace regionálního klimatického modelu srovnatelné se změnami odvozenými oběma použitými metodami.

Úvod

Plánování v oblasti vodního hospodářství stále častěji vyžaduje výhledové studie dopadů změn klimatu na hydrologický režim, zároveň jsou tyto studie důležitým podkladem pro návrh adaptačních opatření. V současné době je běžně dostupná řada výstupů simulací globálních i regionálních klimatických modelů (RCM). Tyto simulace jsou nicméně zatíženy systematickými chybami, jež znemožňují jejich přímé použití pro hydrologické modelování. Je např. známo, že v Evropě řada RCM nadhodnocuje zimní srážky, zejména kvůli příliš silnému západnímu proudění, jež je z velké části zděděno z řídicích globálních klimatických modelů. Naopak v létě je západní proudění slabší a letní srážkové úhrny jsou podhodnocené (van Ulden et al., 2007). Klimatické modely navíc zpravidla produkují velké množství dní s lehkými srážkami, takže četnost dní s deštěm bývá nadhodnocena.

V praxi se používají dva přístupy k překonání těchto nedostatků: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. Korekce systematických chyb (někdy nazývána i škálování – scaling nebo kalibrace) se snaží transformovat simulovaná data tak, aby vybrané charakteristiky těchto dat odpovídaly pozorování pro zvolené kontrolní období, následně aplikuje stejnou korekci na období budoucí. Přírůstková metoda se snaží transformovat pozorovaná data tak, aby změny mezi kontrolním a výhledovým obdobím odpovídaly změnám odvozeným ze simulace klimatického modelu.

Předkládaná studie se zabývá porovnáním výsledků modelování dopadů změn klimatu na hydrologický režim pomocí modelu BILAN v denním kroku s použitím vstupních dat odvozených podle výše zmíněných metod na patnácti povodích v České republice pro časové horizonty let 2025, 2055 a 2085. Cílem studie není analyzovat samotné změny hydrologického režimu, ale zjistit, do jaké míry jsou závěry získané oběma metodami konzistentní.

Data

V rámci projektu VaV Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření jsou od poloviny letošního roku k dispozici výstupy simulace regionálního klimatického modelu (RCM) ALADIN-CLIMATE/CZ pro období 1961–2100 řízené globálním klimatickým modelem ARPEGE podle emisního scénáře SRES A1B s horizontálním rozlišením cca 25 km x 25 km. Podle Pretela et al. (2008) tato simulace relativně věrně vystihuje průměrné denní teploty v zimním a letním období, avšak model podhodnocuje průměrné denní teploty v podzimním (o cca 1 °C) a zejména jarním (o cca 2 °C) období. U atmosférických srážek se projevuje tendence k nadhodnocování zimních

srážkových úhrnů, nicméně systematické chyby jsou značně prostorově proměnlivé. Mírné nadhodnocení srážkových úhrnů je patrné i v jarním období.

Pro hydrologické modelování modelem BILAN a zároveň jako referenční data pro transformaci RCM výstupů byly použity časové řady srážek, teplot vzduchu, relativních vlhkostí vzduchu a průtoků, jež byly získány od Českého hydrometeorologického ústavu. Patnáct vybraných povodí je znázorněno na obr. 1, jejich základní charakteristiky udává tabulka 1. Většina povodí (12) má rozlohu do 500 km², nejmenší povodí má 67 km², největší 13 111 km². Pozorovaná data jsou dostupná pro různá časová období, většinou od první poloviny šedesátých let do nedávné minulosti. Nejkratší řada má 20, nejdelší 44 let. Řady nebyly očištěny o antropogenní vlivy, nicméně většinu povodí lze považovat za relativně málo ovlivněná.

Model BILAN

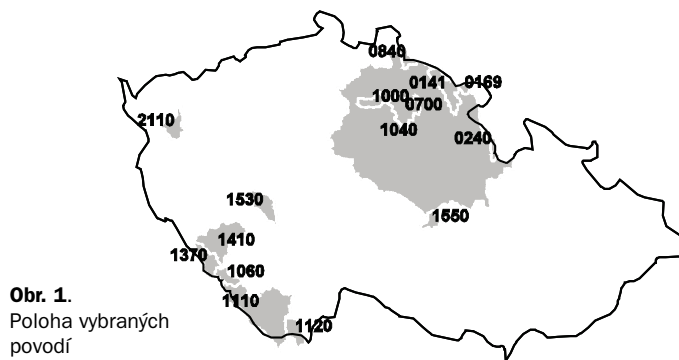
Model BILAN schematizuje povodí na soustavu nádrží ve třech vertikálních úrovních – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody. Velikost toků mezi jednotlivými nádržemi je určována algoritmy modelu, které jsou řízeny šesti volnými parametry. Vstupem do modelu jsou pozorované časové řady srážek, teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu, která slouží k výpočtu potenciální evapotranspirace. Bilance na povrchu půdy je dána vstupními srážkovými úhrny a územním výparem určeným na základě potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda 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 (Horáček et al., 2009).

Vstupní data do modelu jsou zpravidla odvozena interpolací pozorování z okolních stanic k těžišti povodí. Podobně jsou v případě klimatických modelů vstupní řady vztahující se k těžišti povodí odvozeny interpolací z gridboxů zasahujících plochu daného povodí. Model je nejprve nakalibrován na pozorovaných datech, nakalibrované parametry jsou dále využity při simulaci s použitím dat odvozených na základě klimatických modelů.

Scénáře klimatické změny

Jak korekce systematických chyb, tak přírůstková metoda jsou založeny na transformaci dané časové řady na časovou řadu, jež bude mít (a) požadované charakteristiky (korekce systematických chyb), popř. (b) časovou řadu, jejíž charakteristiky se budou od dané časové řady lišit požadovaným způsobem (přírůstková metoda).

Obě metody mohou být schematizovány následujícím vztahem:



Obr. 1. Poloha vybraných povodí

Tabulka 1. Přehled vybraných povodí

| DBC | ČHP | | Plocha povodí [km ²] | Od | Do |
|------|-------------|------------------------------------|----------------------------------|------|------|
| 0141 | 1-01-02-051 | Slatina nad Úpou-Úpa | 400,5 | 1980 | 2000 |
| 0169 | 1-01-03-009 | Teplice nad Metují- Metuje | 67,11 | 1981 | 2007 |
| 0240 | 1-02-01-009 | Kláštepec nad Orlicí-Divoká Orlice | 155,15 | 1962 | 2004 |
| 0700 | 1-04-02-049 | Nový Bydžov-Cidlina | 456,77 | 1962 | 2004 |
| 0840 | 1-05-01-011 | Vilémov-Jizera | 146,29 | 1964 | 2004 |
| 1000 | 1-05-02-102 | Mladá Boleslav-Klenice | 169,11 | 1965 | 2004 |
| 1040 | 1-05-04-005 | Brandýs nad Labem-Labe | 13 111 | 1975 | 2004 |
| 1060 | 1-06-01-023 | Lenora-Teplá Vltava | 176,27 | 1962 | 2006 |
| 1110 | 1-06-01-214 | Březí-Kamenný Újezd-Vltava | 1 824,59 | 1972 | 2006 |
| 1120 | 1-06-02-019 | Kaplice-Malše | 259,03 | 1965 | 2006 |
| 1370 | 1-08-01-040 | Rejstejn-Otava | 334,6 | 1962 | 2006 |
| 1410 | 1-08-01-125 | Katovice-Otava | 1 134,53 | 1980 | 2006 |
| 1530 | 1-08-04-064 | Varvažov-Skalice | 366,84 | 1962 | 2006 |
| 1550 | 1-09-01-009 | Sázava u Žďáru-Sázava | 131,26 | 1962 | 2006 |
| 2110 | 1-13-02-021 | nádrž Březová-Teplá | 294,01 | 1962 | 2006 |

$$X_{TRG} = f(X_{SRC}), \quad (1)$$

kde f je zvolená transformace, X_{SRC} je daná veličina, X_{TRG} je požadovaná veličina. Při korekci systematických chyb odpovídá X_{SRC} nekorigované simulaci klimatického modelu, X_{TRG} simulaci korigované a korekce f je založena na porovnání simulované a pozorované veličiny pro kontrolní období. V případě přírůstkové metody je X_{SRC} pozorovaná veličina pro kontrolní období, X_{TRG} transformovaná veličina odpovídající budoucímu období a transformace f je odvozena porovnáním simulace dané veličiny pro kontrolní a budoucí období. Klíčovým předpokladem při korekci systematických chyb je, že tyto chyby jsou stacionární, tedy že korekční vztahy odvozené pro kontrolní období platí i pro období budoucí. Přírůstková metoda je založena na předpokladu, že změny odvozené ze simulace klimatického modelu nejsou závislé na chybách simulace. Žádný z těchto předpokladů nelze spolehlivě ověřit.

V případě obou metod je možno použít stejnou transformaci. V rámci korekce systematických chyb použitá transformace podmiňuje, které charakteristiky dané veličiny jsou korigovány a které zůstávají stejné či podobné jako v klimatickém modelu. Podobně volba transformace pro přírůstkovou metodu podmiňuje, které charakteristiky příslušné veličiny budou upraveny podle projevu klimatického modelu a které zachovány. Tradiční námitka proti přírůstkové metodě, upozorňující na neschopnost této metody postihnout změny variability dané veličiny (např. Graham et al., 2007), se tedy ve skutečnosti týká použité transformace, a nikoliv podstaty této metody. Při úspěšném použití stejné transformace nelze apriori rozhodnout, která ze zmiňovaných metod je „správnější“. Přírůstková metoda je svou podstatou blízká klasické citlivostní analýze, kdy jsou uvažované změny jasně definovány.

U srážek a teplot je žádoucí, aby zvolené transformace zohledňovaly změny/chyby jak v průměru, tak ve variabilitě. Zejména u srážek je známo, že změny průměru mohou být značně odlišné od změn extrémů (Christensen and Christensen, 2004; Boberg et al., 2009). Tvorbu scénářů klimatické změny jsme proto založili na postupu popsaném Shabalovou et al. (2003) v rámci přírůstkové metody a Leanderem a Buishandem (2007) pro korekci systematických chyb, jež vyhovuje této podmínce.

Srážky (P), teplota vzduchu (T) a relativní vlhkost vzduchu (H) jsou transformovány následujícím způsobem:

$$P_{TRG} = aP_{SRC}^b \quad (2)$$

$$T_{TRG} = a + b(T_{SRC} - \bar{T}_{SRC}) + \bar{T}_{SRC} \quad (3)$$

Tabulka 2. Přehled veličin vstupujících do transformačních vztahů a odhadu jejich parametrů

| | | Odhad parametrů | Transformace |
|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|---|
| korekce systematických chyb | X_{SRC} | simulovaná data pro kontrolní období | simulovaná data pro budoucí období |
| | X_{TRG} | pozorovaná data pro kontrolní období | korigovaná simulace pro budoucí období |
| přírůstková metoda | X_{SRC} | simulovaná data pro kontrolní období | pozorovaná data pro kontrolní období |
| | X_{TRG} | simulovaná data pro budoucí období | transformovaná pozorování odpovídající budoucímu období |

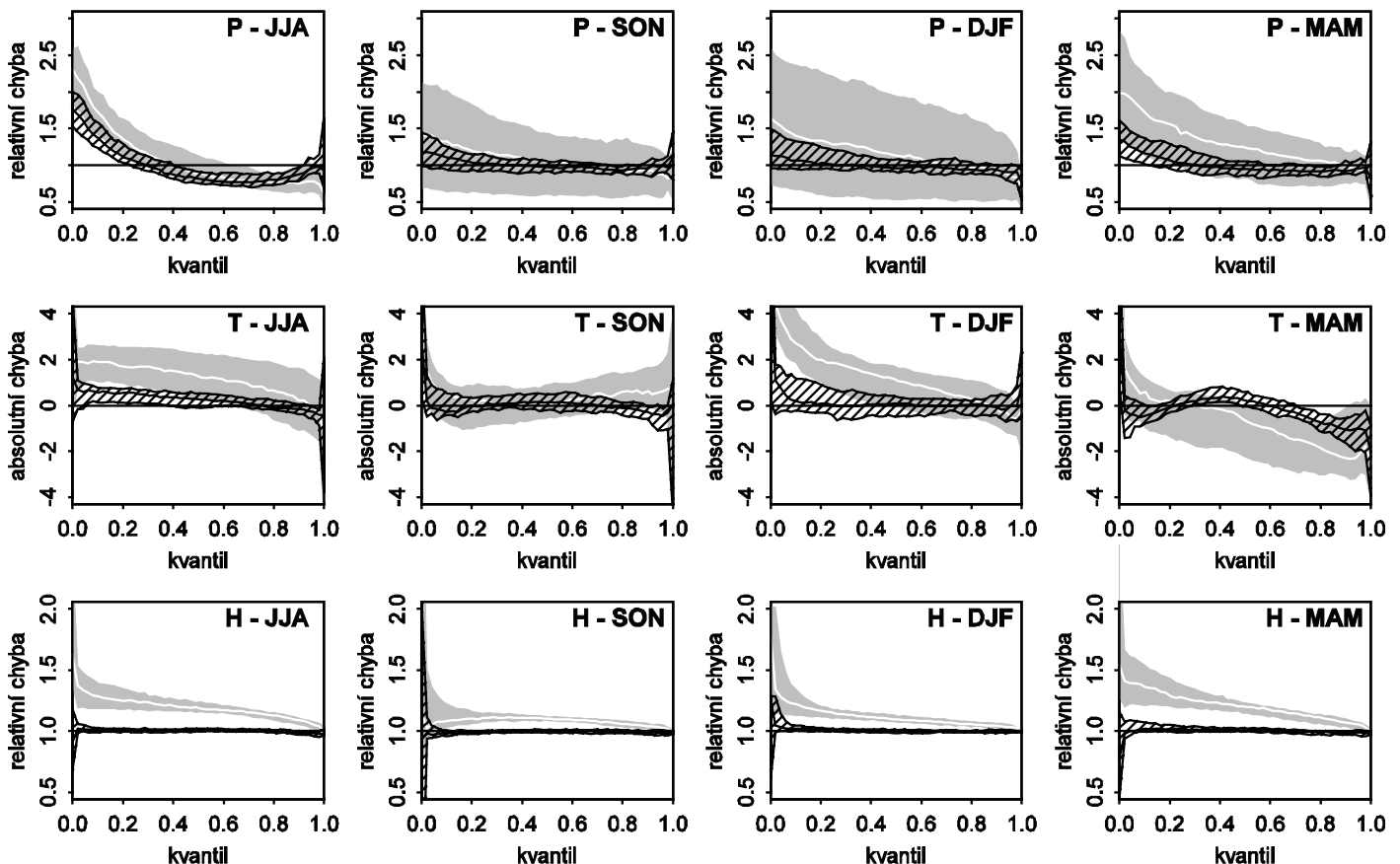
$$H_{TRG} = 1 - a(1 - H_{SRC})^b \quad (4)$$

Index $_{TRG}$ značí požadovanou, index $_{SRC}$ danou veličinu a \bar{T}_{SRC} značí průměr. Tvar výrazu (2) omezuje srážkové úhrny P_{TRG} na kladné hodnoty, obdobně tvar výrazu (4) zaručuje, že relativní vlhkost vzduchu H_{TRG} nebude vyšší než 1.

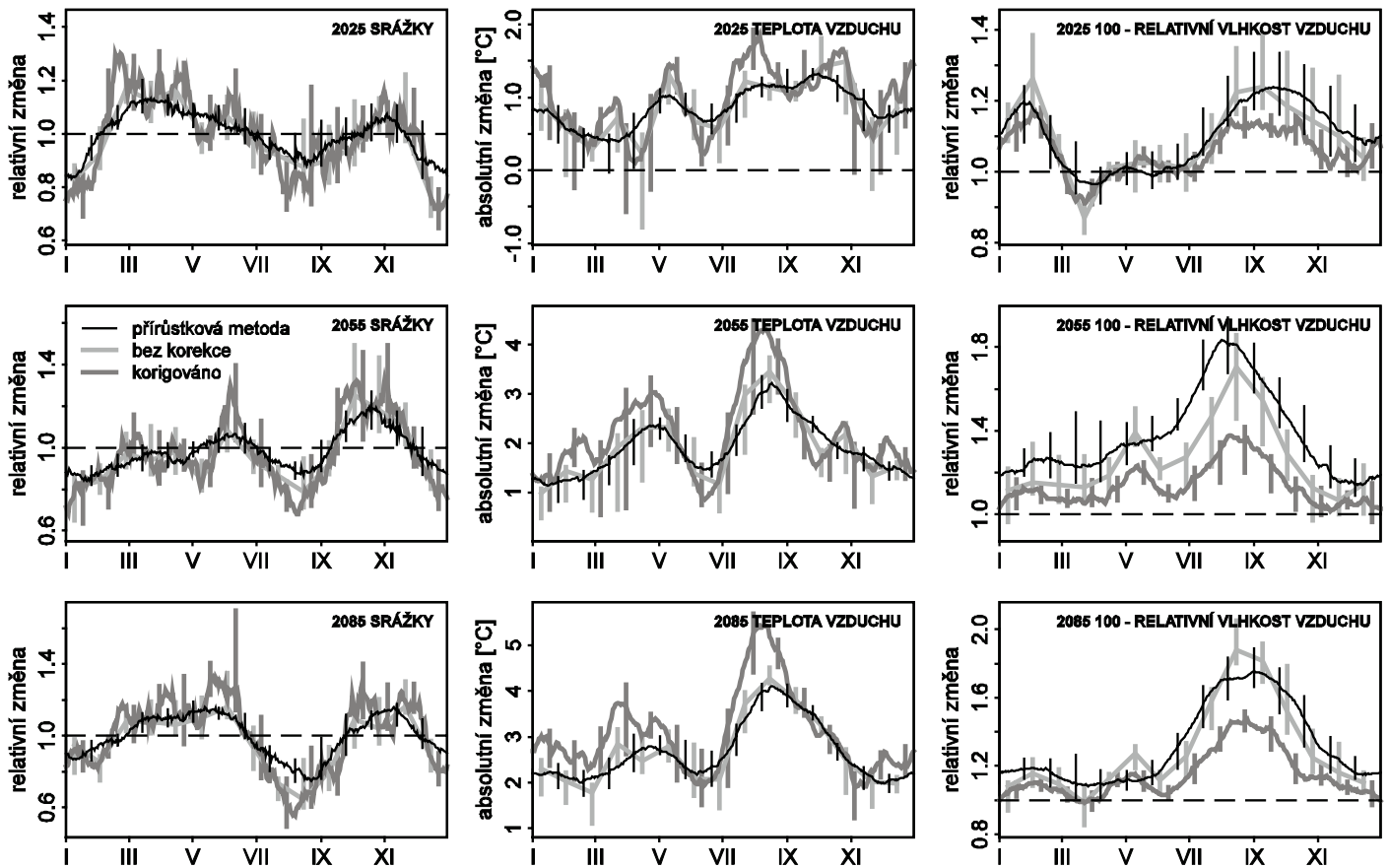
V případě srážek a relativní vlhkosti byla nejprve optimalizována hodnota parametru b tak, aby $cv(P_{TRG}) = cv(P_{SRC}^b)$, resp. $cv(1 - H_{TRG}) = cv[(1 - H_{SRC})^b]$, kde cv je koeficient variace. Následně byla vypočítána hodnota parametru a , jako poměr $a = \bar{P}_{TRG} / \bar{P}_{SRC}^b$, resp. $a = (1 - H_{TRG}) / (1 - H_{SRC})^b$. V případě teploty byly parametry a a b odvozeny přímo z rozdílu průměrů teplot, respektive podílu směrodatných odchylek (sd) teplot, tedy $a = \bar{T}_{TRG} - \bar{T}_{SRC}$, $b = sd(T_{TRG}) / sd(T_{SRC})$. Pro přehlednost uvádíme veličiny dosazované za X_{TRG} a X_{SRC} v případě odhadu parametrů a v případě transformace pro obě metody (tabulka 2).

Jelikož nelze předpokládat, že by chyby/změny byly během roku konstantní, byly parametry a a b pro všechny veličiny odvozeny pro každý den roku (podobně jako Shabalova et al., 2003 a Leander a Buishand, 2007) z časového okna zahrnujícího předcházejících a následujících 30 kalendářních dní ze všech let v uvažovaném období (tedy např. pro 9. 4. v případě období 1961–1990 byly parametry a a b odhadovány z dat zahrnujících časové okno 10. 3.–9. 5. pro roky 1961, 1962, ..., 1990).

Výše uvedeným způsobem byly odvozeny transformační parametry pro všechny gridboxy zasahující plochy jednotlivých povodí. Výsledné řady vstupních veličin byly následně získány interpolační k těžišti povodí. Na obr. 2 jsou shrnuty výsledky korekce systematických chyb. Nekorigovaná simulace modelu ALADIN/CLIMATE-CZ nadhodnocuje nízké kvantily srážek



Obr. 2. Relativní (P a H) a absolutní (T) chyba v empirické distribuční funkci pro jednotlivá roční období pro neopravená (šedý polygon) a opravená (šrafovaný polygon) data; plocha polygonů odpovídá rozpětí hodnot na všech modelovaných povodích, čarou je znázorněn průměr povodí; v případě srážek jsou zobrazeny pouze relativní chyby srážek větších než 1 mm



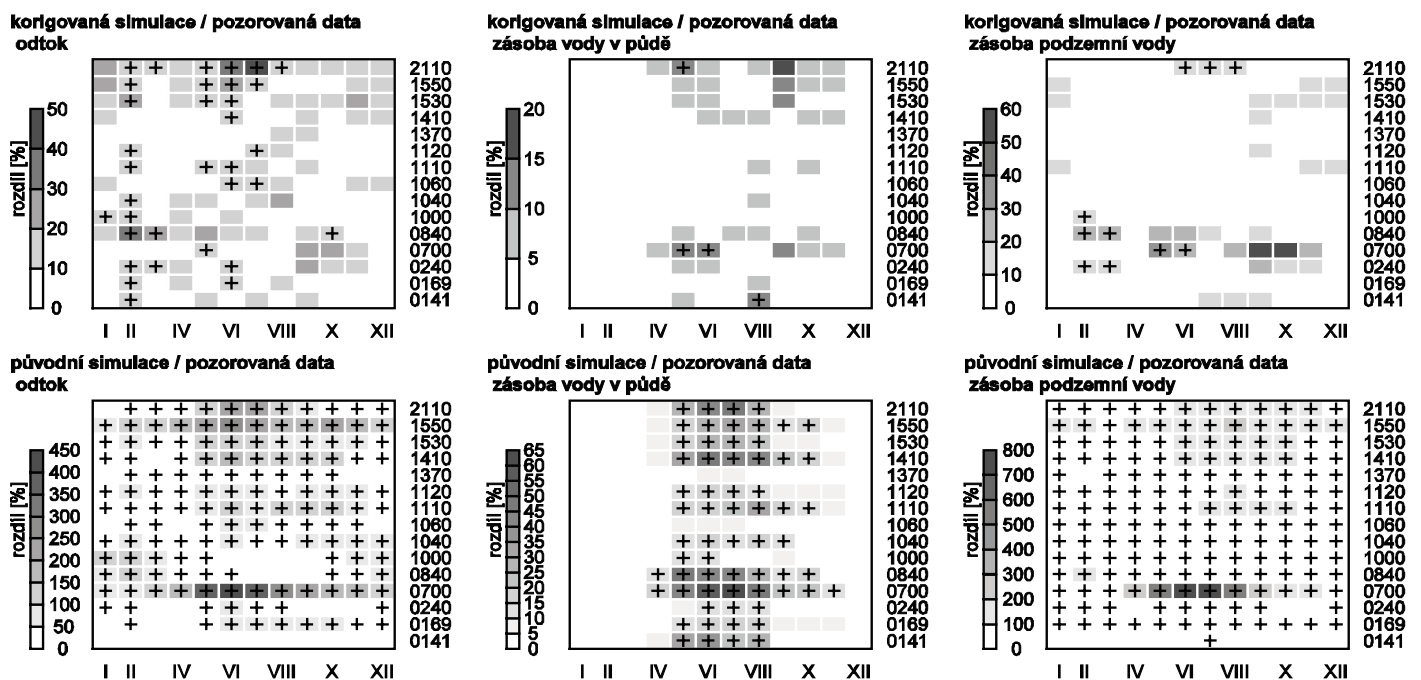
Obr. 3. Relativní a absolutní změny srážek, teploty vzduchu a doplňku vlhkosti do 100 % mezi pozorovaným a scénářovými obdobími (2025, 2055 a 2085); křivky znázorňují průměry všech povodí, svislé čáry odpovídají rozpětí mezi jednotlivými povodími

ve všech ročních obdobích, nejvíce v letním, naopak srážková maxima jsou simulována relativně věrně. Teploty jsou nadhodnoceny o cca 1 až 3 stupně, výjimku tvoří jarní období, v němž jsou teploty naopak podhodnoceny o 1 až 2 stupně. Nadhodnocení teplot u nekorigované simulace je u menších povodí do jisté míry způsobeno rozdílem v průměrné nadmořské výšce gridboxu modelu a průměrné nadmořské výšce povodí. Relativní vlhkost vzduchu je nadhodnocena, zejména v oblasti nižších hodnot. Je zřejmé, že použitá metoda korekce není schopna systematické chyby kompletně odstranit, ale v porovnání s nekorigovanou simulací dochází k významnému zlepšení. Výjimkou jsou systematické chyby nízkých kvantilů srážek pro letní

období, jež jsou odstraněny pouze částečně, nicméně průměrná chyba nízkých kvantilů (do cca 30 %) je i tak redukována o zhruba 50 %.

Obrázek 3 znázorňuje 30denní klouzavé průměry relativních a absolutních změn srážek, teplot a doplňku vlhkosti do nasycení mezi pozorovaným a scénářovými obdobími (2025, 2055 a 2085) pro všechna povodí a jednotlivé kalendářní dny roku získané přírůstkovou metodou a odvozené z neopravené a opravené RCM simulace.

Průměrné srážkové úhrny vykazují pokles v letním a zimním období a stagnaci či mírný vzestup v obdobích ostatních. Pokles srážek v zimním období, jenž je nejsilnější pro období 2025, je v rozporu s obecnými



Obr. 4. Souhrn absolutních hodnot rozdílů [%] v odtoku, zásobě vody v půdě a zásobě podzemní vody simulovanými na základě korigovaných a pozorovaných dat (horní řádek) a na základě nekorigovaných a pozorovaných dat (dolní řádek) pro všechna povodí (svislá osa) a měsíce (vodorovná osa); symbolem + jsou znázorněny kladné rozdíly větší než 10 % (ostatní vyplněné plochy odpovídají poklesu)

poznatky o výsledcích RCM simulací pro střední Evropu, které zpravidla vykazují růst srážkových úhrnů v zimním období. Teploty rostou nejvíce na konci léta. Relativní vlhkost vykazuje pokles (tj. růst doplňku do 100 %) během celého roku, nejvíce v letním období.

Změny získané přírůstkovou metodou dobře korespondují se změnami podle nekorigované RCM simulace, ze které byly parametry pro transformaci přírůstkovou metodou odvozeny. Změny podle korigované RCM simulace se od předchozích dvou odlišují větším oteplením v letních měsících a nižším poklesem relativní vlhkosti vzduchu ve stejném období.

Modelovaná hydrologická bilance

Hydrologická bilance byla pro zájmová povodí modelována modelem BILAN s využitím

1. pozorovaných dat,
2. neopravené simulace modelu ALADIN-CLIMATE/CZ,
3. simulace modelu ALADIN-CLIMATE/CZ opravené o systematické chyby,
4. přírůstkové metody se změnami založenými na simulaci modelu ALADIN-CLIMATE/CZ.

Obrázek 4 udává rozdíly měsíčních průměrů odtoku, zásoby vody v půdě a zásoby podzemní vody modelované na základě pozorovaných dat a s použitím korigovaných a nekorigovaných RCM dat. Výsledky získané použitím korekce systematických chyb jsou konzistentní s výsledky získanými modelováním s pozorovacími daty – rozdíly jsou ve většině případů v rozmezí 0–10 %. Odtok podle nekorigované RCM simulace je podstatně vyšší (často dvojnásobně a více), a to zejména kvůli výraznému nadhodnocení srážkových úhrnů a relativní vlhkosti vzduchu. Podobným způsobem je pro nekorigovanou RCM simulaci ovlivněna modelovaná zásoba podzemní vody a zásoba vody v půdě.

Větší srovnatelnost charakteristik opravené RCM simulace s charakteristikami odvozenými na základě pozorování je doložena i v tabulce 3 udávající koeficient determinace a střední kvadratickou chybu pro korigovanou a nekorigovanou simulaci.

Relativní změny odtoku, zásoby podzemní vody a zásoby vody v půdě mezi pozorovaným a scénářovými obdobími jsou zobrazeny na obr. 5. Na většině povodí dochází k poklesu odtoku pro všechna tři období během celého roku v případě přírůstkové metody i opravené a neopravené simulace. Podobně je tomu i v případě zásoby vody v půdě a zásoby podzemní vody. Obecně nejsou rozdíly mezi jednotlivými variantami příliš velké, výsledky získané na základě korekce systematických chyb jsou v některých případech z hlediska vodních zdrojů mírně příznivější než ostatní. Zřetelná je relativně značná prostorová proměnlivost změn bilančních veličin podle všech tří variant.

Tabulka 3. Průměrné hodnoty Nash-Sutcliffova koeficientu a střední kvadratické chyby pro průtok simulovaný modelem BILAN na základě původní a opravené simulace modelu ALADIN-CLIMATE/CZ v porovnání s průtokem pozorovaným

| | Nash-Sutcliffův koeficient ¹ | | Střední kvadratická chyba | |
|----------------------|---|------------|---------------------------|------------|
| | původní | korigovaná | původní | korigovaná |
| odtok | -2,42 | 0,59 | 0,49 | 0,08 |
| zásoba podzemní vody | -26,29 | 0,80 | 3 338,68 | 33,42 |
| zásoba vody ve sněhu | 0,49 | 0,87 | 215,13 | 76,23 |
| zásoba vody v půdě | 0,01 | 0,86 | 118,77 | 16,38 |

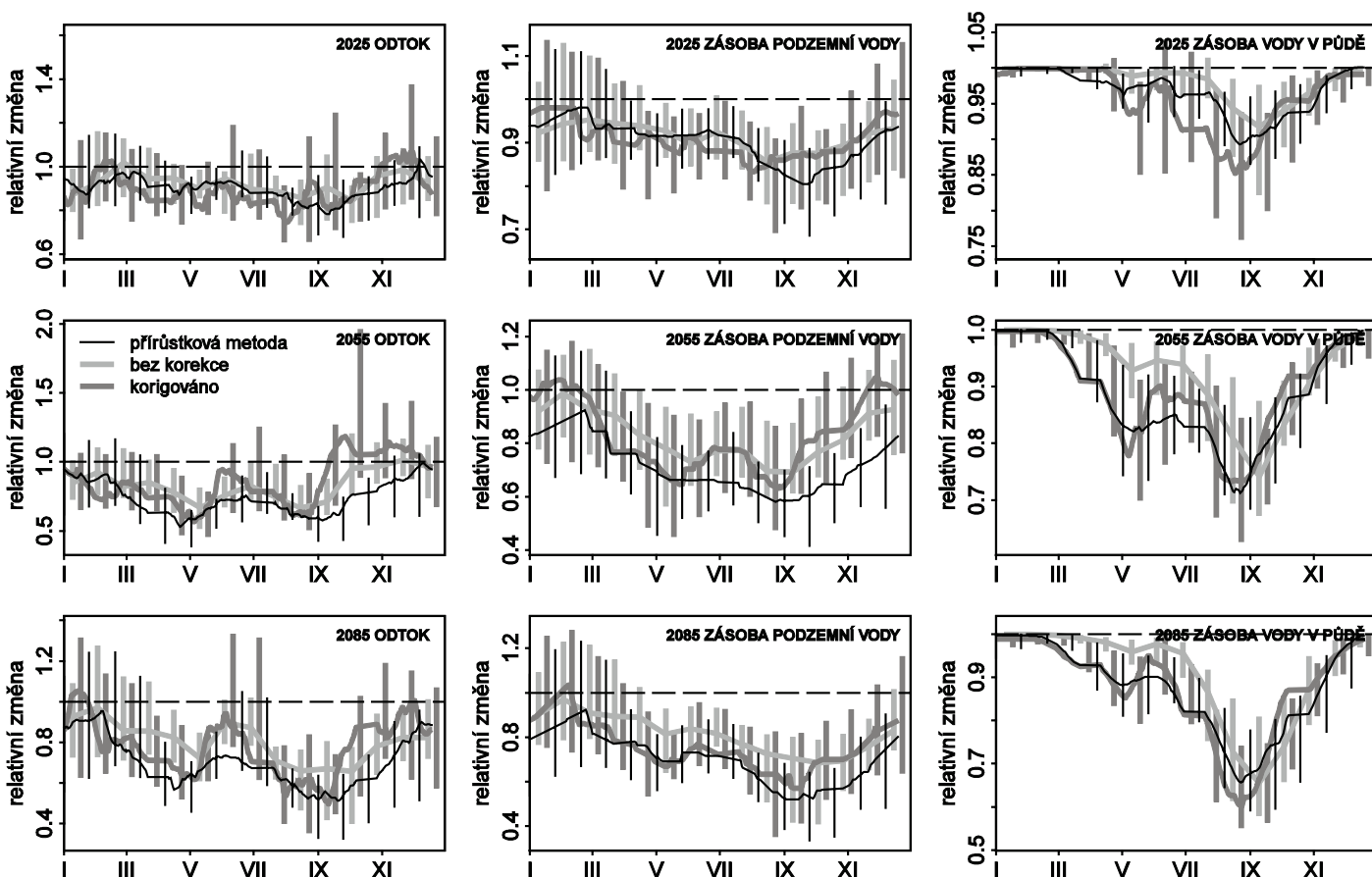
Zejména v zimním období je možné u některých povodí pozorovat nárůst odtoku a zásoby podzemní vody, zatímco u ostatních pokles. Na druhou stranu, pokles odtoku a zásoby podzemní vody a zásoby vody v půdě v letním období můžeme konstatovat pro všechna povodí.

Diskuse a závěr

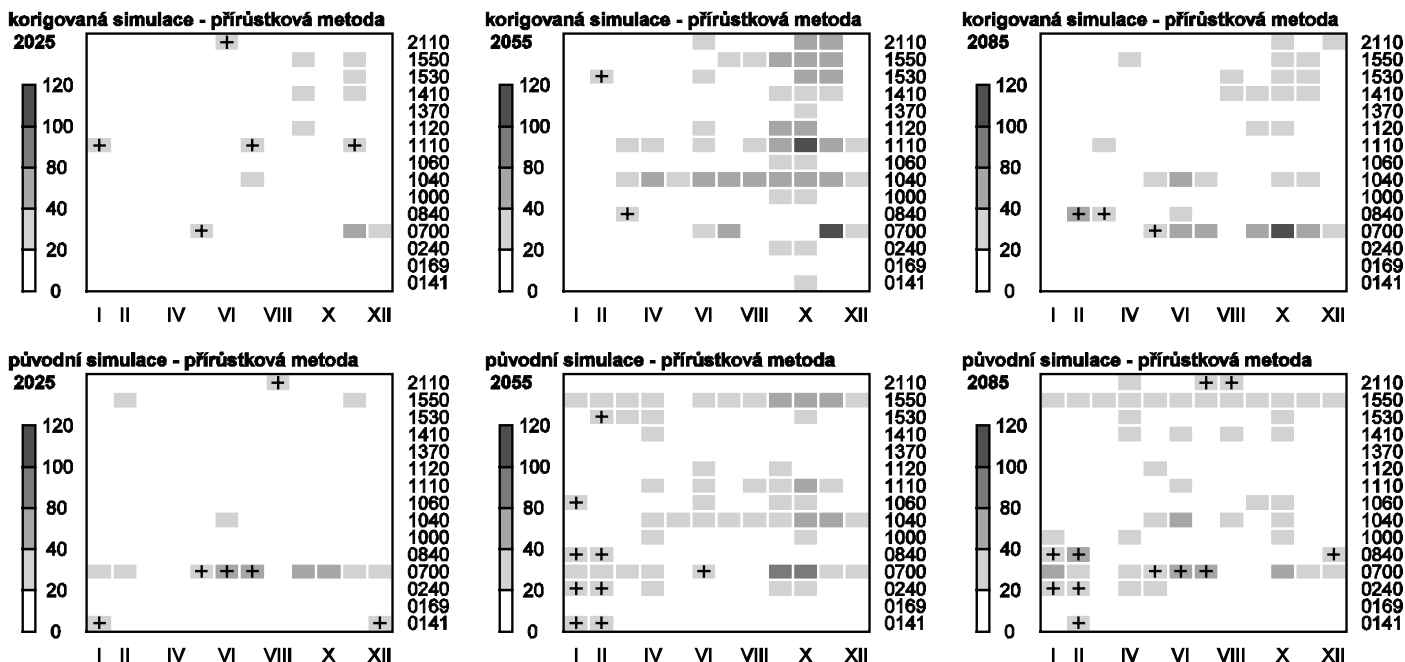
Pomocí hydrologického modelu BILAN byly otestovány dva přístupy použití RCM dat pro tvorbu scénářových meteorologických řad ovlivněných změnou klimatu: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. Uvažováno bylo patnáct povodí v České republice, modelování hydrologické bilance probíhalo v denním kroku. Pro obě metody byla použita transformace ovlivňující průměr i variabilitu dané veličiny. Transformační parametry byly odvozeny pro každý kalendářní den roku.

Pro pozorované období bylo ukázáno, že výsledky získané korekcí systematických chyb se dobře shodují s výsledky založenými na pozorování. Naopak výsledky získané na základě nekorigované RCM simulace výrazně nadhodnocují odtok, zásobu vody v půdě a zásobu podzemní vody, což je způsobeno zejména nadhodnocením srážkových úhrnů a do jisté míry i nadhodnocením relativní vlhkosti vzduchu, jejíž vliv na odtok je sice menší než u srážek, avšak nezanedbatelný (Kašpárek, 2009).

Pro všechny modelované časové horizonty dochází k poklesu odtoku, zásoby vody v půdě a zásoby podzemní vody na většině povodí, zejména v průběhu letního období. Rozdíly mezi průměrnými měsíčními změnami zkoumaných veličin na základě přírůstkové metody a korekce systematických chyb (obr. 6) nejsou velké v případě časových horizontů 2025 a 2085: pro většinu měsíců a povodí se pohybují v rozmezí 0–20 %, jen výjimečně více. Pro horizont 2055 jsou téměř v polovině případů rozdíly větší než 20 %, zejména na podzim. Je pravděpodobné, že rozdíly ve změnách pod-



Obr. 5. Relativní změny odtoku, zásoby podzemní vody, zásoby vody ve sněhu a zásoby vody v půdě mezi pozorovaným a scénářovými obdobími (2025, 2055 a 2085); křivky znázorňují průměry všech povodí, svislé čáry odpovídají rozpětí mezi jednotlivými povodími



Obr. 6. Souhrn rozdílů změn simulovaného odtoku [%] podle korigované simulace a přírůstkové metody (horní řádek) a podle nekorigované simulace a přírůstkové metody (dolní řádek) pro scénářová období 2025, 2055 a 2085 (sloupce) pro všechna povodí (svíslá osa) a měsíce roku (vodorovná osa); barevně je odlišena velikost absolutní hodnoty rozdílů, symbol + označuje kladné rozdílů větší než 10 % (ostatní vyplněné plochy odpovídají poklesu)

zimní hydrologické bilance jsou způsobeny rozdílnými změnami relativní vlhkosti vzduchu (obr. 3). Vyšší vliv změn relativní vlhkosti na odtokový režim v podzimním období konstatuje i Vlnas (2009).

Relativní vlhkost vzduchu vstupuje do modelu BILAN jako podklad k výpočtu potenciální evapotranspirace. Vzhledem k obtížné měřitelnosti relativní vlhkosti vzduchu a vzhledem k nejnovějším poznatkům, které ukazují, že pro úspěšné modelování hydrologické bilance je možno potenciální evapotranspiraci počítat i podstatně zjednodušeným způsobem (Oudin, 2010), by bylo vhodné předloženou analýzu zopakovat s použitím zjednodušeného výpočtu potenciální evapotranspirace bez zahrnutí relativní vlhkosti vzduchu.

Zajímavé je, že rozdíl mezi výsledky podle korigované simulace a přírůstkové metody nejsou výrazně odlišné od rozdílů mezi výsledky podle nekorigované simulace a přírůstkové metody (obr. 6). To naznačuje, že v oblastech s nedostatkem pozorovaných dat by mohlo být možné využít nekorigovaných RCM simulací k odhadu změn hydrologického režimu. Nicméně tento problém vyžaduje další výzkum.

Pro přesné odvození parametrů pro přírůstkovou metodu i korekci systematických chyb by byly teoreticky potřeba nekonečné časové řady. Použití zhruba třicetiletých časových období vnáší do celého procesu další nejistoty. Ty by bylo možné vyhodnotit např. nějakou z metod založených na resamplingu, což by zároveň umožnilo posouzení statistické významnosti rozdílů mezi jednotlivými metodami.

Obě zkoumané metody jsou teoreticky rovnocenné, rozdíly ve výsledcích modelování změn hydrologické bilance je proto nutno chápat jako základní kvantifikaci nejistot spojených s tvorbou scénářů klimatické změny. Nutno podotknout, že mimo tyto nejistoty a nejistoty spojené s konečnou délkou časových řad je dalším výrazným zdrojem nejistot samotné modelování klimatu – zejména použitý klimatický model, emisní scénář a počáteční podmínky simulace.

Poděkování

Tento článek vznikl v rámci řešení projektu VaV „Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“ (SP/1a6/108/07).

Literatura

- Boberg, F., Berg, P., Thejll, P., Gutowski, W.J., and Christensen, J.H. (2009) Improved confidence in climate change projections of precipitation evaluated using daily statistics from the PRUDENCE ensemble. *Climate Dynamics*, 32, 1097–1106.
- Graham, L.P., Andréasson, J., and Carlsson, B. (2007) Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 81, 293–307.
- Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L. a Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance –BILAN. *VTEI*, 51, mimořádné číslo I, s. 2–5.
- Christensen, O.B. and Christensen, J.A. (2004) Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global and Planetary Change*, 44, 107–117.
- Kašpárek, L. Analýza citlivosti hydrologické bilance na změny srážek a relativní vlhkosti

vzduchu při zvyšování teploty vzduchu. *VTEI*, 2009, roč. 51, č. 1, s. 3–5, příloha *Vodního hospodářství* č. 2/2009. ISSN 0322-8916.

- Leander, R. and Buishand, T.A. (2007) Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332, 487–496.
- Oudin, L., Moulin, L., Bendjoudi, H., and Ribstein, R. (2010) Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. *Hydrological Sciences Journal*, 55(2), 209–222.
- Pretel, J. et al. (2008) Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření (II). Závěrečná zpráva o řešení projektu VaV – SP/1a6/108/07 v roce 2008. Praha: ČHMÚ.
- Shabalova, M.V., van Deursen, W.P.A., and Buishand, T.A. (2003) Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Climate Research*, 23, 233–246.
- van Ulden, A., Lenderink, G., van den Hurk, B., and van Meijgaard, E. (2007) Circulation statistics and climate change in Central Europe: PRUDENCE simulations and observations. *Climatic Change*, 81, 179–192.
- Vlnas, R. (2009) Vliv relativní vlhkosti vzduchu na celkový odtok v podmínkách klimatické změny. *VTEI*, 51, mimořádné číslo I, s. 8–12.

Ing. Martin Hanel^{1,2}, Ing. Adam Vizina^{1,2}

¹VÚV T.G.M., v.v.i., Praha

²Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze

Martin_Hanel@vuv.cz, Adam_Vizina@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

Hydrological modelling of climate change impact in daily time step: bias correction and delta method (Hanel, M.; Vizina, A.)

Key words

delta method – bias correction – ALADIN-CLIMATE/CZ – changes in hydrological balance

Assessment of changes in hydrological regime cannot be directly based on the output of regional climate model simulations owing to the bias, which is inherent to all climate models. In the present paper we compare two strategies to overcome the biases in climate model simulations (delta method and bias correction). Both methods are tested at fifteen catchments over the Czech Republic. For the hydrological modelling the BILAN model in daily time step is used. The simulated runoff, as well as the soil and ground water storage are decreasing in future periods (2025, 2055 and 2085) for most of the catchments and months. The differences in the estimated changes derived by the bias correction and delta method are in general smaller than 20% for the periods 2025 and 2085. The estimated changes are less consistent for the period 2055 because of differences in changes of relative air humidity in the two methods. Surprisingly, the changes derived using uncorrected simulations are in relatively good agreement with those of the other two methods.

METODIKA POSOUZENÍ DOPADŮ KLIMATICKÉ ZMĚNY A NÁVRHU ADAPTAČNÍCH OPATŘENÍ NA VODNÍCH ZDROJÍCH

Magdalena Mrkvičková, Zdeněk Kos

Klíčová slova

adaptace – adaptační opatření – dopady klimatické změny – management rizika

Souhrn

I přesto, že se možnosti modelování dopadů klimatické změny stále zlepšují, nejistoty spojené s výsledky stále významně komplikují proces navrhování adaptačních opatření. Jeden z možných přístupů, jak se s daným úkolem vypořádat, je využívat metody managementu rizika v procesu plánování. Management rizika umožňuje uvážit klimatickou změnu jako jeden z rizikových vnějších vlivů působících na množství a jakost povrchových a podzemních vod.

V příspěvku je provedena literární rešerše dokumentů, které se věnují problematice navrhování adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství. Poznatky z těchto dokumentů byly využity při přípravě Metodiky posouzení dopadů klimatické změny a návrhu adaptačních opatření na vodních zdrojích, která je v příspěvku představena.

Úvod

Podle Doria et al. (2009) lze úspěšnou adaptaci definovat jako „jakoukoliv úpravu, která vede ke snížení zranitelnosti vůči dopadům klimatické změny na stanovenou úroveň, aniž by byla ohrožena kvalita životního prostředí a ekonomický potenciál rozvoje“. Zranitelnost může být chápána jako míra rizika, že daný systém nebude schopen s požadovanou spolehlivostí plnit svou funkci. Adaptace tedy představuje proces, který vede ke snižování rizika poruchy daného systému způsobené dopady klimatické změny (Novický aj., 2010).

I přesto, že se možnosti modelování dopadů klimatické změny stále zlepšují, nejistoty spojené s výsledky modelování stále významně komplikují proces navrhování vhodných adaptačních opatření. Vznikají tak různé přístupy, jak tuto skutečnost překonat.

Možné přístupy při stanovování adaptačních opatření

Jedním z možných přístupů, jak hledat vhodná adaptační opatření, je vycházet z hodnocení zranitelnosti (vulnerability approach). Na základě výsledků hodnocení současné zranitelnosti daného systému (za systém je zde považován samostatný funkční celek, pro který jsou hledána vhodná adaptační opatření – stát, společnost, povodí, organizace atd.) vůči nepříznivým klimatickým poměrům jsou identifikovány nejzranitelnější prvky systému, pro které jsou následně navrhována opatření směřující k posílení jejich odolnosti do budoucna (Johnstone et al., 2009).

Hodnocení zranitelnosti uplatnili Brooks et al. (2005) pro porovnání stávající míry zranitelnosti jednotlivých států mezi sebou a pro identifikování těch nejzranitelnějších. V rámci studie navrhli systém indikátorů zranitelnosti společnosti vůči přírodním katastrofám a porovnávali jejich vypovídací schopnost. Z výsledků hodnocení zranitelnosti lze odvodit, které oblasti je třeba v dané zemi rozvíjet pro posílení adaptační kapacity (např. zlepšování dostupnosti hygienických zařízení, zvyšování vzdělanosti, nekorupční prostředí). Přístup je vhodný především pro oblasti, kde nejsou k dispozici výsledky modelování dopadů klimatické změny. Hodnocení zranitelnosti umožňuje uvážit schopnost společnosti vyrovnávat se s nepříznivými jevy spojenými s vývojem klimatu, adaptační opatření jsou však stanovována z výsledků hodnocení zranitelnosti nepřímo.

Přímočarý přístup představuje navrhování adaptačních opatření na základě výsledků modelování dopadů klimatické změny pomocí scénářů (scenario-centered approach). Opatření jsou navrhována tím způsobem, že se původní model používaný pro modelování dopadů upraví tak, aby reprezentoval stav po uplatnění daného opatření, a hodnotí se změna v průběhu sledované veličiny. Hledá se takové opatření, které bude dostatečně účinné pro co nejširší rozpětí očekávaných klimatických poměrů (CIS WFD, 2009) nebo pro nejpravděpodobnější scénář (Wardekker et al., 2009). Daný přístup umožňuje ověřovat očekávanou účinnost navrhovaných opatření za předpokladu, že nedojde k překvapivým událostem (např. neočekávané reakci společnosti na probíhající změny nebo neočekávanému vývoji klimatu). Staví však řešitele před zásadní otázku, do jaké míry navrhovat opatření pro nejjevně nepříznivé scénáře za cenu neúměrných nákladů.

Přístup založený na posilování odolnosti (resilience approach) pracuje s logikou opačnou k té, která je uplatňována při hodnocení zranitelnosti. Přístup pracuje s myšlenkou rozvíjet takové vlastnosti systému, které

ho činí odolným vůči nepříznivým krátkodobým extrémům i dlouhodobým nepříznivým trendům ve vývoji klimatu. Tento přístup aplikovali (Wardekker et al., 2009) pro urbanizované oblasti Rotterdamu. Identifikovali šest principů odolnosti, jejichž rozvíjením je možné dosáhnout vyšší odolnosti dané oblasti vůči očekávaným i překvapivým dopadům klimatické změny. Mezi tyto principy patří např. využívání zpětných vazeb pro stabilizaci systému, alternativní řešení pro případ omezené funkce některého prvku systému nebo vytváření nárazníkových zón pro zvládnání krátkodobých extrémů. Daný přístup nestaví před řešitele otázku, jaký scénář zvolit pro navrhování opatření, na druhou stranu však neumožňuje stanovení očekávané účinnosti navržených adaptačních opatření.

Mezinárodní a zahraniční metodiky pro adaptaci na klimatickou změnu

V současné době jsou připravovány metodické dokumenty pro adaptaci jak na mezinárodní úrovni, tak na úrovni národní. Přístupy, které jsou doporučovány, zpravidla tvoří kombinaci výše popsaných základních přístupů.

V rámci Společné implementační strategie Rámcové směrnice pro vodní politiku vznikla metodika River Basin Management in Changing Climate (CIS WFD, 2009), která uvádí doporučení, jakým způsobem využít informace o očekávaných dopadech klimatické změny při přípravě plánů povodí, aby nové plány povodí byly relevantní s uvážením dopadů klimatické změny a přispívaly k adaptaci. Metodika doporučuje pro ověřování účinnosti navrhovaných opatření využívat scénáře klimatické změny (scenario-centered approach).

Metodika je určena především správcům povodí a odborníkům, kteří se podílejí na přípravě plánů povodí. Metodika pojednává zvlášť o adaptaci v rámci plánů povodí připravovaných podle Rámcové směrnice o vodní politice, zvlášť o problematice uvážení klimatické změny při zvládnání povodňových rizik a zvlášť o adaptaci v oblasti zvládnání sucha a nedostatku vody. Přitom je zřejmé, že tyto otázky nelze řešit odděleně. Na druhou stranu obsahuje řadu konkrétních doporučení, která jsou doprovázena příklady jejich aplikace a která jsou velmi dobře využitelná při přípravě komplexní adaptační strategie.

Obecný rámec procesu adaptace a základní principy přípravy národní adaptační strategie ve vodním hospodářství jsou popsány v dokumentu Guidance on Water and Climate Change (UNECE, 2009), který byl vydán Evropskou hospodářskou komisí Spojených národů. Metodika je určena především vládním představitelům. Uvádí principy pro zajištění legislativního a institucionálního rámce procesu adaptace na národní úrovni, principy přeshraniční spolupráce a principy pro přípravu adaptační strategie na národní úrovni. Zvládnání nejistot spojených se současnou úrovní poznání očekávaných dopadů klimatické změny na vodní hospodářství je jedním z klíčových témat metodiky. Jedním z možných přístupů je snažit se snížit míru nejistot spojených s výsledky modelování dopadů klimatické změny na úroveň, která umožní přistoupit k navrhování konkrétních opatření. Druhou možností je pracovat s „dolními a horními“ hodnotami rozpětí budoucích klimatických poměrů jako s potenciálními nepříznivými stavy, které mohou ovlivňovat množství a jakost povrchových a podzemních vod, a pro jejich zvládnání využívat metody managementu rizika.

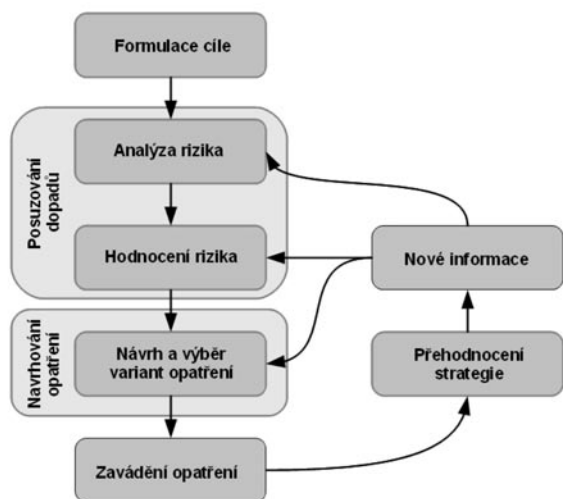
Metodika doporučuje tzv. twin-track approach, tj. přistoupit k procesu navrhování a zavádění opatření na základě dostupných informací a průběžně podle aktuálních informací a získaných zkušeností tento proces upravovat. Jedná se o rozumný postup jak zahájit proces adaptace již v současnosti.

Metody managementu rizika pro přípravu adaptační strategie jsou podrobněji rozpracovány v dokumentu Adapting to climate change: a guide to its management in organisations (Johnstone et al., 2009), který vznikl jako podpůrný dokument v rámci národního programu pro dopady změny klimatu ve Velké Británii (UK Climate Impacts Programme). Dokument je určen obchodním společnostem a organizacím, které mají zájem minimalizovat nebezpečí a využívat příležitosti spojené s očekávanými dopady klimatické změny. Popisuje proces přípravy adaptační strategie od překonávání počátečních překážek daných nedostatečnou úrovní všeobecného povědomí, přes fázi porozumění rizikům spojeným s očekávanými dopady klimatické změny v dané oblasti, až k vlastní přípravě adaptační strategie s využitím metod managementu rizika. Vhodná adaptační opatření jsou stanovována na základě propojení přístupu založeného na hodnocení zranitelnosti a přístupu založeného na modelování dopadů klimatické změny pomocí scénářů.

Metodika pro posouzení dopadů klimatické změny a návrh adaptačních opatření na vodních zdrojích

Metodika, která je připravovaným výstupem projektu Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadů klimatické změny na vodní zdroje, rovněž aplikuje propojení přístupů hodnocení zranitelnosti a modelování dopadů klimatické změny pomocí scénářů. Je připravována tak, aby byla využitelná pro správce povodí a pro další subjekty hospodářství s vodními zdroji (vodárenské společnosti, obce, podniky aj.). Metodika zahrnuje fázi posouzení dopadů klimatické změny na základě dostupných studií

a na základě znalosti zranitelných prvků v systému a dále fází navrhování vhodných opatření a jejich výběr na základě hodnocení jejich účinnosti. Pro zpracování obou těchto fází aplikuje metody managementu rizika. Proces je schématicky znázorněn na obr. 1.



Obr. 1. Proces přípravy a zavádění adaptační strategie s využitím metod managementu rizika

Formulace cíle

Prvním krokem při sestavování adaptační strategie je formulace rámcového cíle, který má být prostřednictvím strategie dosažen. Cílem sledovaným v připravované metodice je zajištění udržitelnosti stávajících vodních zdrojů, omezení dopadů změny klimatu na disponibilní vodní zdroje a předcházení střetům zájmů mezi odběrateli a rovněž mezi odběrateli a požadavky ekosystémů závislých na vodním prostředí.

Analýza rizika

Vlastní příprava adaptační strategie začíná analýzou rizik. Jedná se o aktivitu, která vede k identifikaci potenciálních nebezpečí a ke stanovení rizika pro sledovaný systém (povodí, vodárenskou soustavu atd.). Riziko lze definovat různými způsoby, ale zpravidla se riziko vyjadřuje jako kombinace pravděpodobnosti výskytu nežádoucí události a jejich následků (ČSN IEC 300-3-9). Cílem analýzy rizika je získat odpověď na otázku, jaká konkrétní nebezpečí hrozí v zájmové oblasti na daném vodním zdroji v souvislosti s klimatickou změnou, jaká je jejich pravděpodobnost a možné následky.

Pro identifikaci nebezpečí spojených s dopady klimatické změny na vodní zdroje je vhodné na začátku vycházet ze znalostí krizových situací, které se vyskytly během fungování systému v souvislosti s krátkodobými projevy extrémního počasí nebo s dlouhodobými trendy ve vývoji klimatu v posledních desetiletích (Johnstone et al., 2009).

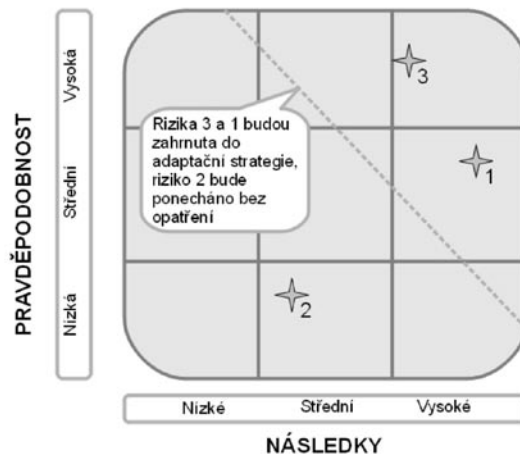
Dalším podkladem jsou výsledky modelování dopadů klimatické změny na klimatické a hydrologické poměry s výhledem do budoucnosti podle scénářů klimatické změny. Volba scénářů použitých pro studii dopadů závisí na časovém horizontu, pro který má být modelování provedeno a na požadovaném časovém kroku výstupů. V rámci modelování dopadů by mělo být zahrnuto více scénářů, aby byla zachována informace o nejistotách, které jsou s výsledky spojeny (CIS WFD, 2009).

Nebezpečí, která je možné identifikovat na základě současných výsledků modelování dopadů klimatické změny na vodní režim krajiny a na vodní hospodářství, zahrnují možný pokles průtoků zejména v málovodných obdobích, klesající míru dotace podzemních vod a s tím související ohrožení vydatnosti dostupných vodních zdrojů, zvýšení frekvence výskytu extrémních hydrologických jevů představujících nebezpečí porušení funkce vodohospodářské infrastruktury a zvýšené nároky na odběry vody pro zemědělskou závlahu, které by mohly vést ke střetu zájmů mezi odběrateli (Novický aj., 2009). Vyšší teplota vzduchu způsobuje vyšší teploty vody (Novický aj., 2009a), což indikuje nebezpečí urychlení procesu eutrofizace ve vodních nádržích. Zhoršení kvality vod ve vodních tocích během málovodných období nebo možný pokles hladiny v útvarech podzemních vod indikuje nebezpečí nedosažení environmentálních cílů Rámcové směrnice o vodní politice.

Na identifikaci nebezpečí navazuje stanovení jejich pravděpodobnosti výskytu a možných následků. Pro stanovení pravděpodobnosti výskytu nebezpečí, které není ovlivněno vývojem klimatu, je možné vycházet z analýzy četnosti výskytu daného jevu v minulosti. Pokud se však jedná o nebezpečí spojené s klimatickou změnou, pak je vhodné pro stanovení pravděpodobnosti jeho výskytu využívat výsledky simulačního modelování pro scénáře klimatické změny. Hodnocení spolehlivosti vodních zdrojů s výhledem do budoucna bylo provedeno v rámci několika studií VÚV TGM, v.v.i. (pro povodí Vltavy, Labe, Ohře a Moravy). Vstupy do simulačního

modelu zahrnovaly čtyři varianty odtokových výšek ovlivněných scénářů klimatické změny a hodnoty potřeby vody upravené podle dostupných informací o budoucí spotřebě vody v daném povodí. Výsledkem jsou hodnoty zabezpečení požadovaných odběrů z vodních zdrojů s výhledem do budoucna pro čtyři varianty scénářů (Kašpárek aj., 2009). Z těchto hodnot je možné odvodit pravděpodobnost nebezpečí pasivní vodohospodářské bilance na konkrétním vodním zdroji.

Pokud nejsou podobné výsledky simulačního modelování k dispozici, je možné využít zjednodušený postup metody předběžné analýzy rizika, která využívá kvalifikovaný odhad pravděpodobnosti výskytu dané nebezpečné události a rozsahu jejích následků. Postup zahrnuje sestavení stupnic pro hodnocení pravděpodobnosti a následků, přiřazení hodnot stupnice jednotlivým nebezpečím a sestavení rizikové matice. Příklad rizikové matice je uveden na obr. 2.



Obr. 2. Hodnocení rizik pomocí rizikové matice se znázorněnou hranicí přijatelnosti rizika

Hodnocení rizika, návrh a výběr opatření

Při hodnocení rizika se stanoví míra přijatelného rizika pro daný systém. Přijatelná rizika nejsou dále zpracovávána a jsou ponechána bez opatření. Rizika, která přesahují míru přijatelnosti, jsou seřazena do hierarchie podle závažnosti a v následujícím kroku jsou pro ně navrhována opatření.

Na základě identifikace prioritních rizik je možné definovat konkrétní specifické cíle adaptační strategie. Příkladem takového cíle je např. minimalizace nákladů spojených s řešením škod způsobených přívalovou povodní nebo zabránění poklesu hladiny podzemní vody v konkrétním vodním útvaru pod stanovenou úroveň. Každý specifický cíl by měl být měřitelný pomocí určitého monitorovaného kritéria, aby bylo možné zpětně vyhodnocovat účinnost zaváděných opatření.

Klíčovým bodem při sestavování adaptační strategie je vlastní návrh různých variant opatření na minimalizaci prioritních rizik a výběr výsledných opatření, která se stanou součástí adaptační strategie. Jde o aktivitu, která vyžaduje spolupráci zkušených provozovatelů a odborníků. Pro identifikaci vhodných adaptačních opatření je možné využívat různé přístupy. Je možné využívat zkušenosti s řešením problémů spojených s extrémním počasím, které se vyskytly během provozu, uspořádat brainstorming mezi pracovníky organizace, provést analýzu nově dostupných technologií a inovací nebo získat informace od organizací, které mají dlouholeté zkušenosti s řešením podobných problémů. Kromě opatření pro eliminaci zásadní příčiny prioritních rizik je možné hledat i opatření, která by umožnila redukovat míru dopadů nebo která by přesunula riziko na jiný subjekt, např. pojištění (Johnstone et al., 2009).

Téměř vždy existuje řada možností, jak se s daným problémem vypořádat. Pro výběr výsledné varianty opatření je klíčová jeho očekávaná účinnost, proveditelnost a celkové náklady. Účinnost technických opatření je možné ověřovat simulačním modelováním, jehož vstupy jsou ovlivněny pomocí scénářů klimatické změny. Účinnost opatření směřujících na změnu využití území lze zjednodušeně stanovit na základě odhadu změny v rozdělení jednotlivých složek vodní bilance, které je daným opatřením dosaženo (Kašpárek aj., 2010). Další porovnávání opatření je možno provést pomocí vícekritériální rozhodovací analýzy, rozboru zisků a nákladů (cost-benefit analysis) nebo metody řízení rizika (Novický aj., 2010).

Obecně platí pravidlo přednostně provádět taková opatření, která jsou užitečná již v současnosti (win-win) nebo taková, kterých nebudeme litovat ani v případě, že se očekávané dopady klimatické změny neuskuteční (no-regret). Výsledná strategie by měla zahrnovat opatření různého charakteru (opatření v krajině, organizační opatření, legislativní opatření, technická opatření aj.). Neměla by být zaměřena jednostranně buď pouze na posilování vodních zdrojů, nebo pouze na omezování odběrů (CIS WFD, 2009).

Pro realizaci opatření, která mění fyzikální poměry na útvarech povrchových vod (nové nádrže, jezy aj.) nebo mění hladiny na útvarech podzemních vod, musí být splněna řada podmínek daných Rámcovou směrnicí. Proto je třeba nejprve ověřit možnosti jiných opatření pro eliminaci daného rizika, například přehodnotit funkci existujících hydrotechnických staveb a optimalizovat jejich funkci na změněné hydrologické poměry a požadavky odběratelů.

Hodnocení strategie

Adaptační strategie musí zůstat relevantní s měnícími se přírodními podmínkami a měnícími se požadavky. Proto je třeba, aby adaptační strategie měla dynamický charakter. Pro zajištění zpětné vazby se provádí monitorování účinnosti opatření a jejich pravidelná revize (UNECE, 2000). Revize adaptační strategie by měla následovat, především pokud došlo ke změně specifických cílů, které vyplývají z prioritních rizik, v případě změny časového horizontu nebo harmonogramu implementace strategie, v případě nových poznatků o očekávaných dopadech klimatické změny, pokud výsledky monitorovaných kritérií ukazují na nízkou efektivitu zaváděných opatření (Johnstone et al., 2009).

Přínosy zavádění metod managementu rizika

Tuchovčák aj. (2010) se zabývali uplatněním metod managementu rizika v systémech zásobování pitnou vodou v rámci projektu WaterRisk. V publikaci k projektu uvádějí následující přínosy zavádění metod managementu rizika: Logický, systematický přístup metod managementu rizika usnadňuje sestavování priorit, které je třeba ošetřit konkrétním opatřením a tvoří podklad pro rozhodování při výběru vhodných opatření. Hledání možných rizik a vhodných opatření vede k neustálému zlepšování poskytovaných vodohospodářských služeb a k předcházení poruch a škod, což šetří náklady nutné na jejich odstraňování. Během společných porad a konzultací prováděných v rámci celého procesu řízení rizik dochází k širší výměně informací a zkušeností mezi jednotlivými pracovníky. Tyto informace mohou být lépe využity při zdokonalování prováděných procesů a činností.

Závěr

V příspěvku jsou představeny základní obecné přístupy pro zvládání nejistot spojených s navrhováním adaptačních opatření a dále jsou představeny přístupy, které jsou uplatněny ve vybraných mezinárodních a zahraničních metodických dokumentech věnovaných problematice adaptace ve vodním hospodářství. Metodika posouzení dopadů klimatické změny a návrhu adaptačních opatření na vodních zdrojích využívá propojení přístupu založeného na hodnocení zranitelnosti a přístupu založeného na modelování dopadů pomocí scénářů klimatické změny. Jednotlivé fáze přípravy adaptační strategie jsou založeny na metodách managementu rizika. Celý proces se skládá z aktivit formulace cíle, analýzy rizika, hodnocení rizika a řízení rizika pomocí navrhování a výběru vhodných opatření. Adaptace je dynamický proces, je tedy třeba zvolenou adaptační strategii upravovat na základě nově dostupných informací. Popsaná metodika bude v následujícím řešení projektu Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadů klimatické změny na vodních zdrojích aplikována na pilotních povodích a bude dále upravována, aby ji bylo možné využít v následujícím cyklu plánování v oblasti vod a pro potřeby organizací hospodařících s vodními zdroji.

Literatura

- Novický, O. aj. (2010) Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech České republiky. Příloha k periodické zprávě za rok 2009. Praha : VÚV T.G.M., v.v.i.
- Doria, M. de F. et al. (2009) Using expert elicitation to define successful adaptation to climate change. *Environmental Science and Policy*, vol. 12 (May 2009) p. 810–819.
- Johnstone, K., Brown, A., and Goldthorpe, M. (2009) Adapting to climate change: a guide to its management in organizations. Lincoln : Institute of Environmental Management and Assessment. ISSN 147-849X.

- Brooks, N., Adger, W.N., and Kelly, P.M. (2005) The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*, 15, p. 151–163.
- CIS-WFD (2009) Guidance document No. 24 River basin management in a changing climate, Technical Report – 2009-040.
- Wardekker, J.A., de Jong, A., and van der Sluijs, J.P. (2010) Operationalising a resilience approach to adapting an urban delta to uncertain climate changes. *Technological Forecasting & Social Change*, 77, p. 987–998.
- UNECE (2009) Guidance on water and adaptation to climate change. Geneva : United Nations Economic Commission for Europe, ISBN 978-92-1-117010-8.
- ČSN IEC 300-3-9 Management spolehlivosti. Část 3: Návod k použití, Oddíl 9: Analýza rizika technologických systémů. Praha : ČNI.
- Novický, O. aj. (2009) Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech České republiky. příloha k periodické zprávě za rok 2008. Praha : VÚV T.G.M., v.v.i.
- Novický, O. aj. (2009a) Teploty vody v tocích České republiky. Praha : VÚV T.G.M., v.v.i., ISBN 978-80-85900-91-0.
- Kašpárek, L. aj. (2009) Výhledová studie potřeb a zdrojů vody v oblasti povodí Ohře II. Praha : VÚV T.G.M., v.v.i.
- Kašpárek, L. aj. (2010) Možnosti zmírnění současných dopadů klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka (Pilotní projekt). Příloha k periodické zprávě za rok 2009. Praha : VÚV T.G.M., v.v.i.
- Tuhovčák, L., Ručka, J., Kožíšek, F., Pumann, P., Hlaváč, J., Svoboda M. aj. (2010) Analýza rizik veřejných vodovodů. Brno : VUT v Brně. ISBN 978-80-7204-676-8.

Poděkování

Příspěvek vznikl na základě výsledků projektu NAZV 81331 – Výzkum adaptačních opatření pro eliminaci dopadu klimatické změny v regionech ČR realizovaného z prostředků Ministerstva zemědělství ČR.

Ing. Magdalena Mrkvičková
VÚV T.G.M., v.v.i.,
magdalena_mrkvicova@vuv.cz

prof. Ing. Zdeněk Kos, DrSc.
ČVUT v Praze, Fakulta stavební
zkos@atlas.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

Guidance for climate change impacts assessment and for adaptation measures proposal on water resources (Mrkvičková, M.; Kos, Z.)

Key words

adaptation – adaptation measures – impacts of climate change – risk management

Since uncertainties of results of climate change impact assessment are still significant, the process of adaptation measures proposal is uneasy. A possible approach for dealing with this task is to incorporate risk management into the planning procedures. Risk management enables us to handle climate change as one of the significant pressures on surface and groundwater quantity and quality. The paper describes the essential steps of risk management in the preparation and assessment of an adaptation strategy, as proposed in the Guidance for Climate Change Impact Assessment and Proposal of Adaptation Measures on Water Resources, which should be a result of a project Research on adaptation measures for dealing with climate change impacts on water resources in the regions of the Czech Republic.

VTEI VODOHOSPODÁŘSKÉ
TECHNICKO-EKONOMICKÉ
INFORMACE

Water Management Technical and Economical Information

Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti vodního hospodářství

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

Ročník 52

ISSN 0322 - 8916
MK ČR 6365

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

VÚV
TGM

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