

Změny hydrologické bilance způsobené vlivem klimatických změn na území Karlovarského kraje

ADAM BERAN, MARTIN HANEL, MAGDALENA NESLÁDKOVÁ

Klíčová slova: vodní zdroje — model Bilan — dostupnost vodních zdrojů

SOUHRN

Na území Karlovarského kraje byly identifikovány oblasti, jež se pravidelně potýkají s problémy nedostatku vody pro vodárenské i průmyslové využití. Od roku 2015 je ve spolupráci VÚV TGM, v. v. i., a státního podniku Povodí Ohře řešen projekt s názvem Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje. Projekt má za úkol navrhnout opatření vedoucí k zabezpečení požadavků na užívání vod v období nedostatku vody s důrazem na maximální využití stávající infrastruktury. V článku jsou popsány identifikované pozorované změny hydrologické bilance způsobené vlivem klimatických změn na zájmovém území Karlovarského kraje, spolu se změnami výhledovými pro budoucí časové horizonty 2021–2050 a 2071–2099.

ÚVOD

S postupem klimatické změny na území České republiky vznikají pro sektor vodního hospodářství nové výzvy, se kterými se musí postupně vypořádat. Jsou již identifikovány oblasti, jež v současné době mají problémy se zabezpečením dostatku vody, a na základě hydrologického modelování jsou identifikovány oblasti, jež jsou potenciálně, kvůli vlivu klimatické změny, zranitelné v budoucích časových horizontech. Problémy jsou se zabezpečením vody pro vodárenské i průmyslové účely. Článek se zaměřuje na současné a výhledové změny hydrologické bilance na území Karlovarského kraje.

V roce 2010 byla zpracována Výhledová studie potřeb a zdrojů vody v Karlovarském kraji [1], která vyhodnotila zabezpečení požadavků na užívání vody (odběry, minimální průtoky, režimy hladin v nádržích aj.) vzhledem k dostupným kapacitám vodních zdrojů (průtokům ve vodních tocích a disponibilních zásob ve vodních nádržích). Tato studie hodnotila zabezpečení pro

Tabulka 1. Dílčí povodí na území Karlovarského kraje (DBČ – databázové číslo, ČHP – číslo hydrologického pořadí)
Table 1. Catchments of the Karlovy Vary district (DBČ – database number, ČHP – number of hydrological order)

Dílčí povodí	DBČ uzávěrové vodoměrné stanice	ČHP	plocha povodí [km²]	výpočet odtoku
Ohře Cheb	206000	1-13-01-0140	690	-
Odrava Jesenice	206500	1-13-01-0662	412	-
Ohře Citice	207300	1-13-01-0910	678	207300-206000-206500
Teplá Březová	212000	1-13-02-0212	309	-
Ohře Karlovy Vary	214000	1-13-02-0340	821	214000-212000-207300
Ohře Žatec most	216000	1-13-03-0280	1172	216000-214000
Mže Stříbro	174000	1-10-01-1280	1144	-
Střela Čichořice	189000	1-11-02-0330	393	-
Mže Hracholusky	176100	1-10-01-1742	465	176100-174000
Střela Plasy	190000	1-11-02-0690	388	190000-189000
Blšanka Holedeč	217000	1-13-03-0830	374	-

současné i výhledové hydrologické podmínky. Již ze závěrů této studie vyplývá, že na území Karlovarského kraje se nachází oblasti, které mají problémy se zabezpečením dostatku vody v bezdeštných obdobích. Tyto problémy se ukazují již v současném období a i pro výhledová období, která uvažují postup klimatických změn, těchto zranitelných oblastí podle výsledků modelování přibývá. Identifikací zranitelných oblastí a návrhem adaptačních opatření se zabýval například projekt Navrhování adaptačních opatření pro snižování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci z roku 2012, který se zaměřil na území povodí Orlice, Chrudimky a Blšanky [2]. Na základě definování zranitelných oblastí z hlediska nedostatku vody na území ČR v roce 2015 byl Karlovarský kraj vyhodnocen jako mírně až středně zranitelný [3, 4].

Od roku 2015 je ve spolupráci VÚV TGM, v. v. i., a státního podniku Ohře řešen navazující projekt, jenž má za úkol vytvoření certifikované metodiky pro návrh opatření vedoucích k zabezpečení požadavků na užívání vod v období nedostatku vody s důrazem na maximální využití stávající infrastruktury. Projekt má název Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje a je spolufinancován Ministerstvem zemědělství ČR. V článku jsou popsány výsledky hydrologického modelování pro dílčí povodí Karlovarského kraje, jež bylo jedním z výsledků prvního roku řešení zmiňovaného projektu. V dalších letech budou pro boj s nedostatkem vody v rámci projektu navržena konkrétní opatření pro identifikované lokality.

DATA A METODY

Karlovarský kraj má rozlohu 3314 km². V severní části kraje leží Krušné hory s nejvyšší horou Klínovec (1244 m n. m.). Páteční řeka Ohře rozděluje kraj přibližně v polovině a odděluje Krušné hory na severu od Slavkovského lesa (Lesný, 983 m n. m.) na jihozápadě a Doupovských hor (Hradiště, 934 m n. m.) na jiho-východě. Slavkovský les a Doupovské hory jsou od sebe oddělené největším přítokem Ohře, řekou Teplou. Mezi další významné přítoky Ohře patří Rolava, Svatava, Libocký potok, Odava a Bystřice.

Plocha Karlovarského kraje byla pro účely hydrologického modelování rozdělena na 11 dílčích povodí o podobné rozloze, přehled se základními identifikačními údaji je uveden v *tabulce 1*. Pro analýzu současného stavu hydrologické bilance a pro kalibraci hydrologického modelu Bilan byla zvolena časová řada 1961–2010. K dispozici byly řady teplot, srážek a odtoku. V případech, kdy nebyly k dispozici hodnoty odtoku přímo pro vybraný uzávěrový profil, byly hodnoty dopočítány odečtením mezipovodí (uvedeno v *tabulce 1* – sloupec *výpočet odtoku*).

Model Bilan

Pro modelování hydrologické bilance na povodích byl použit konceptuální model Bilan simulující hydrologickou bilanci v denním či měsíčním časovém kroku, např. [5–7]. Pro potřeby modelování hydrologické bilance v předkládaném článku byl použit měsíční krok výpočtu. Vstupními daty jsou časové řady srážek a teploty vzduchu a pro kalibraci modelu i pozorovaný odtok. Model je řízen v měsíční verzi osmi volnými parametry, výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Výpočet potenciální evapotranspirace je prováděn buď výpočtem založeným na vegetačních zónách [8], nebo výpočtem založeným na slunečním záření pro určitou zeměpisnou šířku [9]. Odtok je modelován jako součet tří složek – přímého, hypodermického a základního odtoku. V předkládaném článku se zaměřujeme na změny průměrných teplot vzduchu, srážkových úhrnů, výparu, základního odtoku a celkového odtoku.

Scénáře klimatické změny

Pro modelování budoucích změn ve veličinách hydrologické bilance byly vybrány dva budoucí časové horizonty, a sice období 2021–2050 a 2071–2099. Tato období byla vybrána na základě obdobných studií řešených ve VÚV TGM, v. v. i., v posledních letech, aby byla zajištěna konzistentnost výsledků pro jejich porovnávání. K modelování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci bylo vybráno celkem 15 simulací regionálních klimatických modelů (RCM), které pokrývají časové období 1961–2099. RCM jsou výstupem projektu ENSEMBLES. Všechny simulace byly řízené emisním scénářem SRES A1B s prostorovým rozlišením 25 × 25 km. Uvažováno bylo 15 RCM simulací řízených čtyřmi globálními klimatickými modely (*tabulka 2*). Jako výsledná hodnota změny hydrologické veličiny byl brán průměr z těchto 15 simulací. Popis vybraných regionálních klimatických modelů je uveden ve zprávě Hanel aj. [10] nebo Hanel a Vizina [11]. K dispozici byla data za pozorované období 1961–2010. Změny bilančních prvků byly brány k průměru ze současného období 1981–2010.

Tabulka 2. Přehled simulací regionálních klimatických modelů (RCM)
Table 2. Regional climate model simulations (RCM)

Akronym	RCM	Časové období	Zdroj
řízené modelem ECHAM5			
RACMO_EH5 ¹	RACMO2.1	1950–2100	¹ Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)
REMO_EH5 ²	REMO5.7	1951–2100	² Max Planck Institute for Meteorology (MPI), Germany
RCA_EH5 ³	RCA3.0	1951–2100	³ Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
RegCM_EH5 ⁴	RegCM3	1951–2100	⁴ Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP), Italy
HIR_EH5 ⁵	HIRHAM5	1951–2100	⁵ Danish Meteorological Institute (DMI)
řízené modely HadCM3Q0, HadCM3Q3, HadCM3Q16			
HadRM_Q0 ⁶	HadRM3.0	1951–2099	⁶ Met Office Hadley Centre, UK
CLM_Q0 ⁷	CLM2. 4. 6	1951–2099	⁷ Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ)
HadRM_Q3 ⁶	HadRM3.0	1951–2099	⁸ Community Climate Change Consortium for Ireland (C4I)
RCA_Q3 ³	RCA3.0	1951–2099	⁹ National Centre of Meteorological Research (CNRM), France
HadRM_Q16 ⁶	HadRM3.0	1951–2099	¹⁰ Czech Hydrometeorological Institute (CHMI), Czech Republic
RCA_Q16 ⁸	RCA3.0	1951–2099	
řízené modelem ARPEGE4.5			
HIR_arp ⁵	HIRHAM5	1951–2100	
CNRM5_arp ⁹	CNRM-RM5.1	1951–2100	
CHMI_arp ¹⁰	ALADIN-CLIMATE/ CZ	1961–2100	
řízené modelem BCM2.0 driven			
RCA_BCM ³	RCA3.0	1961–2100	

VÝSLEDKY

Pozorované období

Vzhledem k dostatečně dlouhým pozorovaným časovým řadám 1961–2010 byly spočítány průměrné hodnoty jednotlivých členů hydrologické bilance pro časové horizonty 1961–1990 a 1981–2010. V klimatologii jsou jako standardní uvažována třicetiletá období, často je pro kontrolní klima voleno období 1961–1990. Změny udávající pozorované změny hydrologické bilance. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3. Změny v těchto pozorovaných obdobích nejsou většinou významné, nicméně jsou již viditelné. Za zmínku stojí změna celkové průměrné teploty o přibližně 0,5 °C. Při bližším pohledu na výsledky [12] je vidět největší oteplení v zimních měsících. S tímto souvisí zvýšený územní výpar během těchto měsíců. Vlivem popsanych změn se během jarního tání vsáknou do podzemních zásob menší množství vod (vyšší výpar a povrchový odtok), které by měly dotovat povrchové toky během letních suchých období.

Průměrné roční srážkové úhrny se v období 1961–1990 pohybovaly v rozsahu 600–800 mm v povodí Ohře, v povodí Mže průměr nepřesahoval 650 mm, v povodí Střely 600 mm a v povodí Blšanky méně než 500 mm. V období 1981–2010 byl zaznamenán nárůst srážek v rozsahu 3–10 %. Nejvyšší srážkové úhrny jsou dosahovány především v horských oblastech Krušných hor a Smrčín (část Krušnohorské pahorkatiny) na severu a severozápadě území. Na jihovýchodním okraji území se již naopak na srážkovém úhrnu projevuje srážkový stín Krušných hor.

Na velikosti celkového odtoku se na území Karlovarského kraje významně projevuje vliv orografie. Odtoková výška v západní a severní části území přesahuje 300 mm ročně (povodí Ohře po Cheb, Ohře po Karlovy Vary). V povodí Teplé činil průměr přibližně 250 mm. V dolní části kraje v povodí Střely a v povodí Blšanky klesá průměrná odtoková výška díky vyšší teplotě vzduchu až pod 100 mm ročně.

Budoucí změny v hydrologické bilanci

TEPLOTA

Podle modelování hydrologické bilance na základě dat ze simulací regionálních klimatických modelů se na území Karlovarského kraje zvýší průměrná teplota vzduchu v budoucím časovém horizontu 2021–2050 o přibližně 1 °C vzhledem k současnému měřenému průměru 1981–2010. Nejvíce se bude oteplovat v zimních měsících (o 1,2 °C), nejméně pak v jarních měsících (o 0,8 °C). Ve vzdálenějším časovém horizontu 2071–2099 ukazují modely zvýšení průměrné teploty o přibližně 2,7 °C vůči současnému období. Největší oteplení vykazují zimní (o 3,1 °C) a letní měsíce (o 3 °C). V podzimních měsících je nárůst průměrně o 2,7 °C, v jarních měsících je nárůst nejmenší o 2,2 °C. Změny průměrné teploty k časovému období 2071–2099 jsou znázorněny na obr. 1.

SRÁŽKY

Změny v průměrném ročním srážkovém úhrnu nejsou významné ani pro jeden budoucí časový horizont, v obou případech je změna do + 7 %. Pro dřívější časový horizont 2021–2050 vychází jarní a letní měsíce téměř beze změny, zimní a podzimní měsíce vykazují nárůst od 6 do 11 % vzhledem k časovému horizontu 1981–2010. Pro vzdálenější modelové období 2071–2099 je typický vyšší nárůst průměrných srážek během zimních měsíců (13–25 %), který vyvažuje pokles během letních měsíců (7–14 %). Změny průměrné srážky ve vzdálenějším časovém horizontu jsou znázorněny na obr. 2.

ODTOKOVÁ VÝŠKA

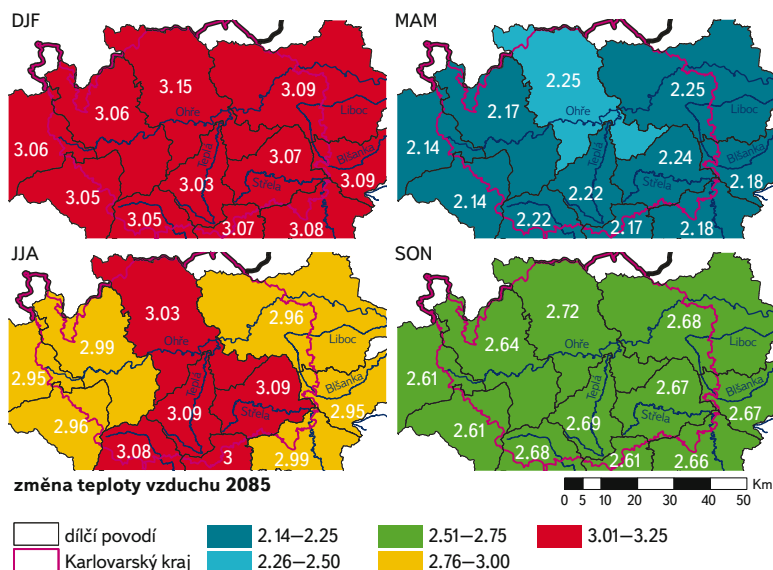
Průměrná roční odtoková výška se v časových horizontech 2021–2050 a 2071–2099 téměř nezmění, průměrné změny jsou do 5 %. Pro sezonní změny je typické zvýšení odtokové výšky během zimních měsíců, pro bližší období 2021–2050 do 24 %, pro vzdálenější časový horizont do 32 %. V ostatních měsících v tomto období dochází k významnému snížení odtokové výšky, během letních měsíců až o 30 %. Změny odtokové výšky v budoucím časovém horizontu jsou znázorněny na obr. 3. Pro změny základního odtoku na povodí je typický významný úbytek během letních a také podzimních měsíců.

Změny hydrologické bilance jsou podrobněji popsány a uvedeny v periodické zprávě k projektu [12].

Tabulka 3. Základní klimatické a hydrologické charakteristiky dílčích povodí Karlovarského kraje; drobné rozdíly mezi srážkami a součtem územního výparu s celkovým odtokem jsou způsobeny změnou zásob podzemní vody

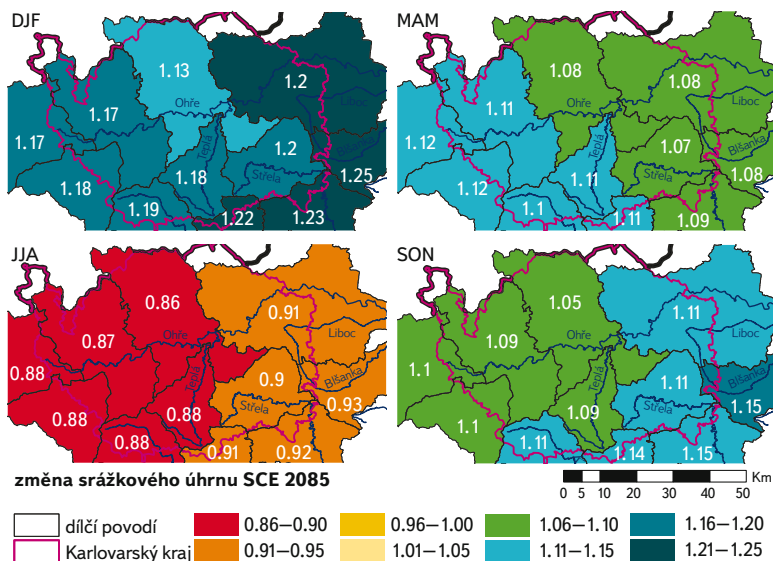
Table 3. Climatic and hydrological characteristics of Karlovy Vary district catchments

Dílčí povodí	Teplota vzduchu [°C]		Srážky [mm/rok]		Pot. evapotranspirace [mm/rok]		Územní výpar [mm/rok]		Celkový odtok [mm/rok]	
	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010	1961–1990	1981–2010
Ohře Cheb	6,6	7,1	795	833	529	552	474	501	319	328
Odrava Jesenice	6,5	7,1	706	741	526	549	491	514	214	224
Ohře Citice	6,5	7,1	687	734	527	549	446	467	241	264
Teplá Březová	5,8	6,2	690	751	501	518	473	493	217	255
Ohře Karlovy Vary	6,1	6,6	742	822	509	531	436	460	305	359
Ohře Žatec most	6,9	7,5	614	656	542	566	475	494	140	159
Mže Stříbro	6,7	7,2	642	682	536	556	445	462	197	217
Střela Čichořice	6,2	6,7	601	619	518	538	441	454	161	164
Mže Hracholusky	6,7	7,2	560	590	534	556	445	464	115	125
Střela Plasy	6,9	7,5	528	546	543	567	458	477	72	66
Blšanka Holedeč	7,6	8,2	495	515	569	594	445	465	52	49



Obr. 1. Absolutní změny průměrné teploty vzduchu v časovém období 2071–2099 od současnosti 1981–2010; DJF – prosinec, leden, únor, MAM – březen, duben, květen, JJA – červen, červenec, srpen, SON – září, říjen, listopad

Fig. 1. Absolute changes in mean air temperature in the scenario period 2071–2099 (with respect to 1981–2010); DJF – December, January, February, MAM – March, May, June, JJA – June, July, August, SON – September, October, November



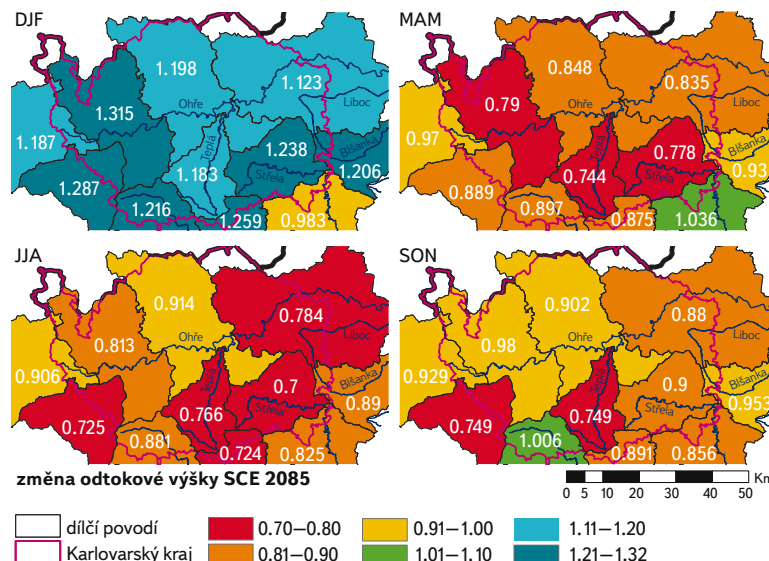
Obr. 2. Relativní změny průměrných srážkových úhrnů v časovém období 2071–2099 od současnosti 1981–2010; DJF – prosinec, leden, únor, MAM – březen, duben, květen, JJA – červen, červenec, srpen, SON – září, říjen, listopad

Fig. 2. Relative changes in mean precipitation in the scenario period 2071–2099 (with respect to 1981–2010); DJF – December, January, February, MAM – March, May, June, JJA – June, July, August, SON – September, October, November

ZÁVĚR

Na základě modelování změn hydrologické bilance se potvrdilo, že postup klimatické změny se Karlovarskému kraji v žádném případě nevyhýbá. Charakter probíhající a modelovaných změn hydrologické bilance v Karlovarském kraji je srovnatelný se změnami probíhajícími v měřítku celé České republiky. Vliv vyšších teplot vzduchu v průběhu celého roku spolu se zvýšenými srážkovými úhrny během zimy zvyšuje odtokové výšky vodních toků a zároveň zvyšuje územní výpar během tohoto období. To má za následek nedostatečnou akumulaci vody ve sněhové pokrývce, která by se během postupného jarního tání vsakovala do kolektorů podzemních vod. Dostatečné zásoby podzemních vod jsou důležité pro dotování povrchových toků základním odtokem během přelomu léta a podzimu (srpen, září), kdy je méně srážek. V případě delších bezdeštných období, jako tomu bylo například v roce 2015, se dostupnost vodních zdrojů o to zhoršuje.

Popsané změny hydrologické bilance způsobují problémy s nedostatečným zabezpečením vodních zdrojů v oblasti Karlovarského kraje. Řešený projekt Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje si klade za cíl identifikovat konkrétní lokality ohrožené nedostatkem vody a navrhnout účinná adaptační opatření pro boj s nedostatkem vodních zdrojů na těchto lokalitách. Projekt je řešen ve spolupráci VÚV TGM, v v. i., a Povodí Ohře, s. p., s předpokládaným termínem dokončení v roce 2018.



Obr. 3. Relativní změny odtokových výšek v časovém období 2071–2099 od současnosti 1981–2010; DJF – prosinec, leden, únor, MAM – březen, duben, květen, JJA – červen, červenec, srpen, SON – září, říjen, listopad

Fig. 3. Relative changes in mean runoff in the scenario period 2071–2099 (with respect to 1981–2010); DJF – December, January, February, MAM – March, May, June, JJA – June, July, August, SON – September, October, November



Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje (QJ1520318), který je financován Ministerstvem zemědělství ČR v rámci programu KUS. Scénáře změny klimatu byly vytvořeny v rámci projektu TA02020320, který byl spolufinancován Technologickou agenturou ČR.

Literatura

- [1] VYSKOČ, P. aj. *Výhledová studie potřeb a zdrojů vody v oblasti povodí Ohře a dolního Labe – východní část*. Technická zpráva. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., a Vodohospodářský rozvoj a výstavba, a. s., Praha, 2010.
- [2] MRKVIČKOVÁ, M. aj. *Navrhování adaptačních opatření pro snižování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v České republice*. Technická zpráva. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2012. SBN 978-80-87402-25-2.
- [3] BERAN, A. a HANEL, M. Definování zranitelných oblastí z hlediska nedostatku vody na území České republiky. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2015, 57, č. 4–5, ISSN 0322-8916.
- [4] HANEL, M., BERAN, A. a KAŠPÁREK, L. *Hydrologická bilance povodí 3. řádu*. Technická zpráva. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2015.
- [5] TALLAKSEN, L.M. and VAN LANEN, H.A.J. (eds). *Hydrological droughts – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Amsterdam, 2004.
- [6] VIZINA, A., HORÁČEK, S. a HANEL, M. Nové možnosti modelu BILAN. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2015, 57, č. 4–5, ISSN 0322-8916.
- [7] HORÁČEK, S., RAKOVEC, O., KAŠPÁREK, L. a VIZINA, A. Vývoj modelu hydrologické bilance – BILAN. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2009, 51, mimoř. č. 1, s. 2–5, ISSN 0322-8916, příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2009.
- [8] GIDROMETEIOIZDAT. *Rekomendatsii po roschotu isparenniia s poverhnosti suchi*. St. Petersburg: Gidrometeioizdat, 1976.
- [9] OUDIN, L., MOULIN, L., BENDJOURI, H., and RIBSTEIN, P. Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. *Hydrological Sciences Journal*, 2010, 55: 209. doi: 10.1080/02626660903546118.
- [10] HANEL, M., BERAN, A. a KAŠPÁREK, L. *Scénáře změny klimatu*. Technická zpráva. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2015.
- [11] HANEL, M. a VIZINA, A. Hydrologické modelování dopadů změn klimatu v denním kroku: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2010, 52, mimoř. č. II, s. 17–21, ISSN 0322-8916, příloha *Vodního hospodářství* č. 11/2010.
- [12] BERAN, A. aj. *Zajištění dostupnosti vodních zdrojů ve vybraných oblastech Karlovarského kraje*. Periodická zpráva k projektu za rok 2015. Technická zpráva. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2016.

Autoři

Ing. Adam Beran^{1,2}

✉ adam_beran@vuv.cz

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.^{1,2}

✉ martin_hanel@vuv.cz

Ing. Magdalena Nesládková¹

✉ magdalena_nesladkova@vuv.cz

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

²Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí

Příspěvek prošel lektorským řízením.

CHANGES IN THE HYDROLOGICAL BALANCE CAUSED BY CLIMATE CHANGE IMPACTS IN THE KARLOVY VARY DISTRICT

BERAN, A.^{1,2}; HANEL, M.^{1,2}; NESLADKOVA, M.¹

¹TGM Water Research Institute, p. r. i.

²Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Environmental Sciences

Keywords: hydrological balance — climate change — BILAN model — water resources availability

In the Karlovy Vary district, areas with lack of drinking and industrial water were identified. Since 2015, in cooperation of TGM WRI, p. r. i., and state enterprise Povodí Ohře a project called „Increasing water resources availability in selected regions of Karlovy Vary district“ is financed. The objective of the project is development of methods for proposal of adaptation measures leading to increasing reliability of water resources in the periods of water stress using existing infrastructures as much as possible. The methods will be verified on pilot basins in Karlovy Vary district. The paper describes observed changes in the hydrological balance components and future changes (2021–2050 and 2071–2099) in the hydrological balance components caused by the climate change impacts on the area of Karlovy Vary district.