

Zabezpečení odběrů vody z vodárenských nádrží v podmínkách klimatické změny

ADAM VIZINA, PETR VYSKOČ, MARTINA PELÁKOVÁ,
JIŘÍ PICEK, ADAM BERAN, ROMAN KOŽÍN

Klíčová slova: klimatická změna — vodní zdroje — nedostatek vody — zásobování pitnou vodou — vodní bilance

Preservation of drinking water demand from water reservoirs in climate change conditions

ADAM VIZINA, PETR VYSKOČ, MARTINA PELÁKOVÁ,
JIŘÍ PICEK, ADAM BERAN, ROMAN KOŽÍN

Keywords: climate change — water resources — water scarcity — drinking water supply — water balance

SOUHRN

Článek představuje průběžné výsledky vyhodnocení možného dopadu klimatické změny na zabezpečení odběrů vody pro vodárenské účely zajišťovaných vodními nádržemi k časové úrovni roku 2050. Při řešení byly aplikovány postupy hydrologické a vodohospodářské bilance, včetně modelování zásobní funkce vodohospodářských soustav. Možný dopad klimatické změny na hydrologické charakteristiky a následně na zabezpečení odběrů vody byl vyhodnocen u celkem 45 vodních nádrží v ČR. Riziko nedostatečného zajištění současných požadavků na vodárenské odběry v podmínkách klimatické změny bylo identifikováno u 17 zhodnocených vodních nádrží.

ÚVOD

Sucho spolu s povodněmi patří k extrémním hydrologickým jevům, ke kterým dochází přirozeně a nahodile. S rostoucími dopady klimatické změny se však frekvence výskytu i časový a plošný rozsah extrémních hydrologických jevů může měnit. Výsledky modelování dopadů klimatické změny pro ČR předpovídají četnější výskyt přívalových povodní a dlouhotrvajícího sucha. Tato skutečnost se v posledních letech potvrzuje na mnoha povodích. Nepříznivá situace může vést i k ohrožení spolehlivosti zásobování obyvatel pitnou vodou. Významná část odběrů vody pro vodárenské účely je v ČR zajišťována prostřednictvím vodních nádrží. Podle aktuálních dat evidovaných pro potřebu sestavení vodní bilance [1] je pomocí vodních nádrží (a to jak odběry vody přímo z vodních nádrží, tak nadlepšováním průtoků do míst odběrů vody níže položených) zajišťováno cca 50 % z celkového množství vody odebrané pro veřejné vodovody (92 % z odběrů povrchových vod pro veřejné vodovody).

Prezentované vyhodnocení zabezpečení vodárenských odběrů zajišťovaných vodními nádržemi bylo zpracováno v rámci řešení projektu VI20192022159 „Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou“ programu BV III/1-VS Ministerstva vnitra. Řešitelem projektu je Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i. Řešení projektu bylo zahájeno v červenci 2019, dokončení je plánováno na prosinec 2022. Projekt je zaměřen na vyhodnocení rizik zásobování pitnou vodou v důsledku klimatické změny a vytvoření technických nástrojů pro posouzení možných opatření ke zmírnění případných nepříznivých dopadů.

SUMMARY

This study presents interim results of an evaluation of a potential climate change impact on the preservation of drinking water demand provided by water reservoirs in the timeframe of the year 2050. Hydrological and water sources and demands balance procedures have been applied, including modelling of the storage ability of water resources and water supply systems. A potential climate change impact on hydrological characteristics and subsequently on the security of water demand has been evaluated in a total of 45 water reservoirs in the Czech Republic. A risk of insufficient supply of current drinking water abstraction requirements in climate change conditions has been identified in 17 of the evaluated water reservoirs.

INTRODUCTION

Drought together with floods belong among extreme hydrological phenomena that occur naturally and randomly. However, with increasing climate change impacts, frequency of the occurrence, temporal and spatial distribution of extreme hydrological phenomena may change. The results of modelling climate change impacts for the Czech Republic predict a more frequent occurrence of flash floods and long-lasting drought. In recent years, this fact has been proven in many catchment areas. An unfavourable situation may even lead to putting the reliability of drinking water supply for citizens at risk. A significant part of drinking water demand in the Czech Republic is provided by water reservoirs. According to current data recorded for the sake of water balance compilation [1], approximately 50% of the total water demand for public water mains (92% of surface water for public water mains) are provided for by water reservoirs (both by water abstraction directly from water reservoirs and by ameliorating discharge to water abstraction sites at lower altitudes).

The presented evaluation of the preservation of drinking water demand provided for by water reservoirs has been made within project No. VI20192022159 “Water Resources and Water Supply Systems and Preventive Measures to Reduce Risks for Drinking Water Supply” under a Ministry of the Interior programme No. BV III/1-VS. The T. G. Masaryk Water Research Institute is the project investigator. Work on the project was launched in July 2019 and is envisaged to be

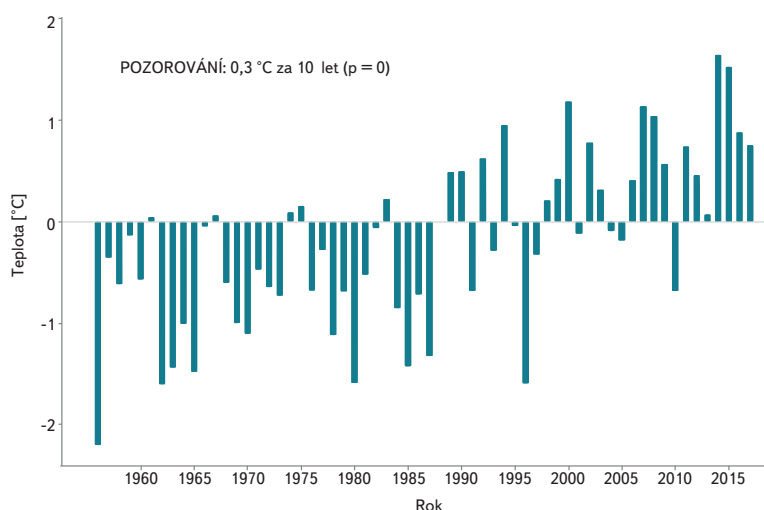
METODIKA A MATERIÁL

Posouzení možných dopadů klimatické změny na zajištění vodárenských odběrů vodními nádržemi vychází z metodiky [2]. Při řešení jsou aplikovány v metodice uvedené postupy zpracování hydrologické a vodohospodářské bilance, včetně simulačního modelování zásobní funkce vodohospodářských soustav. Posouzení bylo zpracováno k výhledovému období roku 2050.

Dopad klimatické změny na hydrologické charakteristiky a zabezpečení odběrů vody byly posouzeny u vodních nádrží evidovaných jako vodárenské podle [3] (s výjimkou vodních nádrží Husinec, Jezeří, Boskovice a Fryšták, které nejsou v současnosti pro vodárenské odběry využívány). Rovněž byla posouzena zabezpečení vodárenských odběrů z vodních nádrží Seč, Vranov a Slezská Harta. Kromě odběrů vody z těchto nádrží byly posuzovány i vodárenské odběry vody na vodních tocích, kam je průtok z vodních nádrží pro potřebu zajištění odběrů aktivně nadlepšován (ÚV Plzeň na Úhlavě z vodní nádrže Nýrsko, ÚV Milíkov na Mži z vodní nádrže Lučina) nebo převáděn (ÚV Šumná na Bílém potoce z vodní nádrže Fláje). Uvažovány byly převody vody z Třebízského potoka a z vodní nádrže Podhora do vodní nádrže Mariánské Lázně, z Černé vody do vodní nádrže Přísečnice, z vodní nádrže Fláje do Pekelského potoka (pro ÚV Šumná), z Lužce do vodní nádrže Jirkov, z Jiřínského a Jedlovského potoka do vodní nádrže Hubenov. Při simulaci zásobní funkce byla rovněž uvažována možnost spolupráce či vzájemná zastupitelnost vodních nádrží Karhov – Zhejral, Podhora – Mariánské Lázně, Vranov – Znojmo, Seč – Křižanovice, Slezská Harta – Kružberk a Morávka – Šance.

Současné klimatické podmínky

Pro samotné hodnocení současných podmínek byla využita data za období 1941–2017, a to časové řady teplot vzduchu, srážkových úhrnů a odtoků. Na obr. 1 jsou znázorněny odchylky průměrných ročních teplot vzduchu od průměrné roční teploty za referenční období 1981–2010 (znázorněno žlutým polygonem). Lze pozorovat výrazný nárůst teplot, a to především v posledních letech. Tento nárůst teplot je statisticky významný na vysoké hladině významnosti. Zeleně jsou zobrazena období tří nejvýznamnějších such v tomto časovém úseku. Zvyšující se teplota má vliv na velikost potenciální evapotranspirace, a pokud je k dispozici voda v půdním profilu, tak samozřejmě i na aktuální výpar.



Obr. 1. Průměrné roční teploty vzduchu za období 1955–2017 (trend 0,3 °C za 10 let, který je statisticky významný)

completed in December 2022. The project focuses on evaluating risks of drinking water supply as a result of climate change and on devising technical tools for assessing possible measures to mitigate potential unfavourable impacts.

METHODOLOGY AND MATERIAL

The assessment of potential climate change impacts on the preservation of drinking water demand from water reservoirs is based on a methodology [2]. Procedures for processing hydrological and water management balance stated in the methodology have been applied in the project, including simulation modelling of the storage ability of water management systems (water reservoirs). The assessment has been made for the prospective period of 2050.

The climate change impact on hydrological characteristics and on the security of water demand have been assessed in water reservoirs that are recorded as water supply ones pursuant to [3] (with an exception of water reservoirs Husinec, Jezeří, Boskovice and Fryšták, which are at present not used for drinking water abstraction). At the same time, the security of drinking water demand from water reservoirs Seč, Vranov and Slezská Harta has also been assessed. Besides water abstraction from these reservoirs, drinking water demand has also been assessed on watercourses where discharge from water reservoirs is actively ameliorated for the sake of securing water demand (the Plzeň water treatment plant on the Úhlava River from the Nýrsko water reservoir and the Milíkov water treatment plant on the Mže River from the Lučina water reservoir) or transferred (the Šumná water reservoir on Bílý Brook from the Fláje water reservoir). Water transfers from Třebízský Brook and from the Podhora water reservoir to the Mariánské Lázně water reservoir have been considered, from Černá voda Brook to the Přísečnice water reservoir and from the Fláje water reservoir to Pekelský Brook (for the Šumná water treatment plant), from Lužec Brook to the Jirkov water reservoir and from Jiřínský Brook and Jedlovský Brook to the Hubenov water reservoir. When the storage function was simulated, the possibility of cooperation or mutual replaceability of water reservoirs Karhov – Zhejral, Podhora – Mariánské Lázně, Vranov – Znojmo, Seč – Křižanovice, Slezská Harta – Kružberk and Morávka – Šance has also been considered.

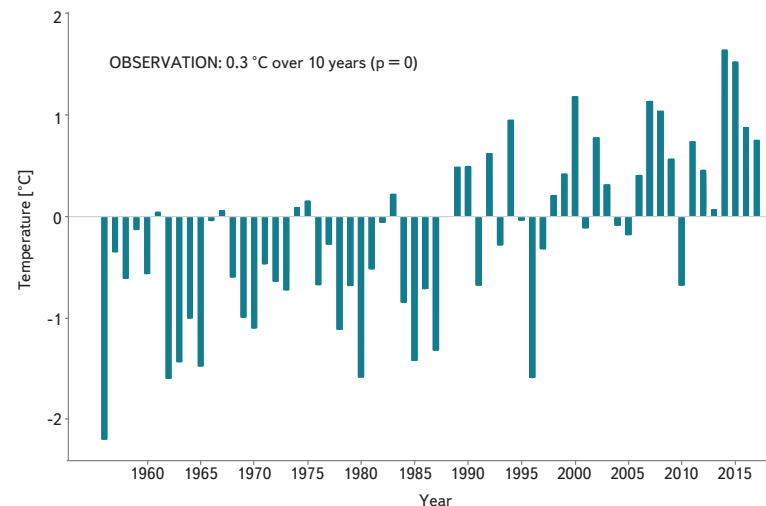
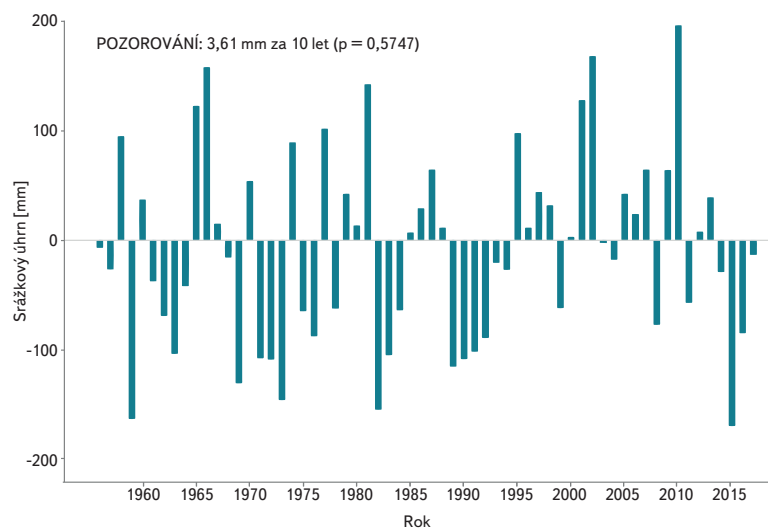
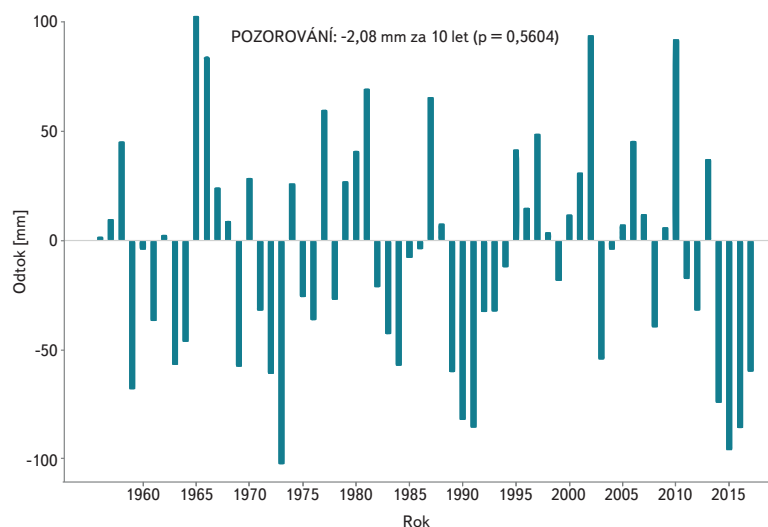


Fig. 1. Mean annual air temperature during the period of 1955–2017 (a statistically significant trend of 0.3 °C over 10 years)

Analogicky jsou na dalších grafech zobrazeny srážkové úhrny a odtokové výšky. Na *obr. 2* lze vidět rozdíly srážkových úhrnů od referenčního období. Z nich je zřejmé, že se období, kdy byla snížena dostupnost srážkových úhrnů (1969–1974, 1989–1994, 2014–2017), opakuje, deficit byl dokonce větší než v posledních pěti letech. Vyhodnocení ročních srážkových úhrnů neukazuje trend, který by byl statisticky významný. Tento fakt lze odvodit také z *obr. 3*, který zachycuje odtokové výšky. Z dlouhodobého hlediska u průměrných ročních odtoků (průměrných za celé území ČR) nelze vysledovat statisticky významný trend. V posledních letech však lze pozorovat výrazný pokles odtoků v letních a jarních měsících a nárůst v měsíci lednu (což je dáno především nárůstem teplot – kapalnými srážkami a táním sněhu). Pro představu, změna odtoku o 1 mm znamená snížení o 78,87 mil. m³. Tato hodnota odpovídá téměř objemu vody ve VN Rozkoš.



Obr. 2. Průměrné roční rozdíly srážkových úhrnů (od normálu) za období 1955–2017 (trend 3,61 mm za 10 let, který je statisticky nevýznamný)



Obr. 3. Průměrné roční rozdíly odtoků (od normálu) za období 1955–2017 (trend -2,08 mm za 10 let, který je statisticky nevýznamný)

Current Climate Conditions

Data from the period of 1941–2017 have been used for the actual evaluation of current conditions, namely time series of air temperature, precipitation totals and runoff. *Fig. 1* presents deviations of mean annual air temperature from the mean annual temperature over the reference period of 1981–2010 (represented by a yellow polygon). A significant temperature increase can be observed, especially in recent years. This temperature increase is statistically significant with a high degree of significance. The green colour represents periods of 3 most significant droughts in this period. Increasing temperature has an impact on the amount of potential evapotranspiration and if water is available in the soil profile, then naturally also on the actual evaporation.

By analogy, the following figures present precipitation totals and runoff heights. *Fig. 2* shows the differences of precipitation totals from the reference period. We can see that the periods when precipitation totals were lower (1969–1974, 1989–1994, 2014–2017) repeat themselves and that the deficit was even higher than in the past five years. However, an evaluation of annual

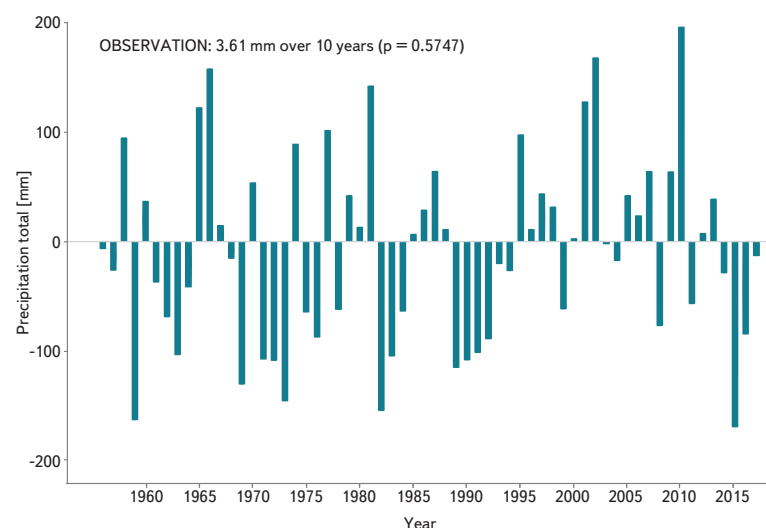


Fig. 2. Mean annual differences in precipitation totals (from normal) for the period of 1955–2017 (a statistically insignificant trend of 3.61 mm over 10 years)

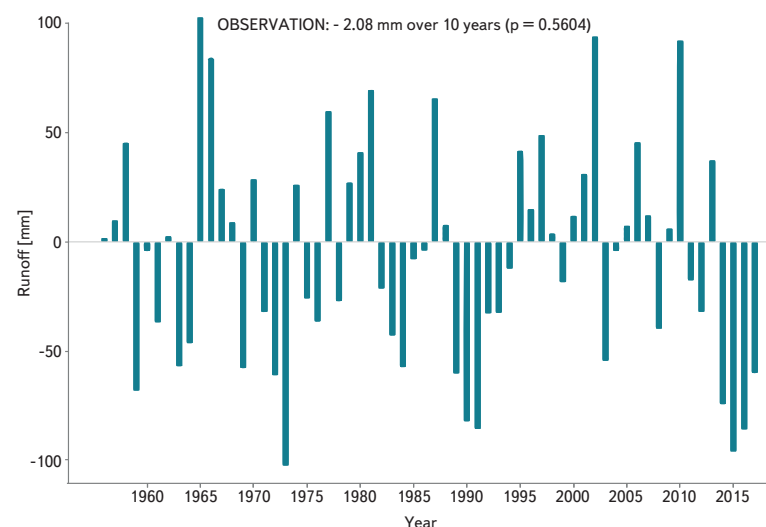


Fig. 3. Mean annual runoff differences (from normal) for the period of 1955–2017 (a statistically insignificant trend of -2.08 mm over 10 years)

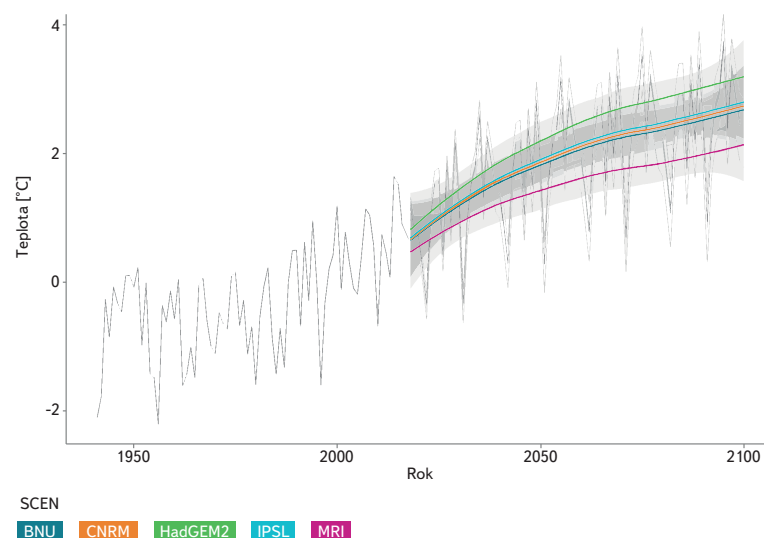
Scénáře změny klimatu ve vodním hospodářství

Pro tvorbu scénářů změny klimatu v kontextu odhadu změn hydrologické bilance se v České republice standardně využívá tzv. přírůstková metoda, zejména pro studie v měsíčním kroku. Tato metoda spočívá v transformaci pozorovaných dat tak, aby změny transformovaných veličin odpovídaly změnám odvozeným ze simulací klimatických modelů. V měsíčním kroku se běžně uvažují změny průměrných měsíčních úhrnů srážek a průměrné měsíční teploty. V denním kroku je nutné uvažovat i změny variability veličin. Pro tvorbu scénářů změny klimatu byla proto využita pokročilá přírůstková metoda ADC (Advanced Delta Change). Podstatou přírůstkové metody je transformace pozorovaných dat způsobem, jenž zaručí, že změny mezi transformovanou a původní řadou jsou stejné jako změny odvozené z regionálního klimatického modelu. U srážek a teploty (zejména v denním kroku) je žádoucí, aby uvažované transformace zohledňovaly změny jak v průměru, tak ve variabilitě. To zjednodušeně znamená, že extrémy se mohou měnit jinak než průměr. Při odvození změn srážek z klimatického modelu ADC metoda uvažuje i systematické chyby simulace. Jelikož teplota je transformována lineárně, nemá systematická chyba na výslednou transformaci teploty vliv [4].

Zvolenou metodou byly transformovány vybrané [5] Globální cirkulační modely (GCM) pro dílčí povodí, jedná se o:

- NorESM1-M +
- MPI-ESM-LR + HadGEM2-ES +
- GISS-E2-H + MRI-ESM1 +
- CanESM2 + GFDL-CM3

První model (NorESM1-M) představuje střed ansámblu všech GCM. Modely MPI-ESM-LR + HadGEM2-ES + vystupují jako řídicí GCM pro několik Euro-CORDEX RCM simulací. To ostatně platí i pro vybraný střední model, který rovněž řídí jeden z Euro-CORDEX RCMs. Modely GISS-E2-H + MRI-ESM1 zajistí splnění podmínky na pokrytí mezimodelové variability a modely CanESM2 + GFDL-CM3 umožní splnit poslední uvedenou podmínku výběru. Tyto modely byly dále testovány pro vodní hospodářství. Testovány byly také vybrané modely RCM. Pro samotné hodnocení byl vybrán model HadGEM2-ES, který byl pro střední scénář dopadů klimatické změny doporučen ve studii [6]. Vývoj teploty dle RCP8.5¹ je uveden na obr. 4.



Obr. 4. Změny teploty vzduchu dle jednotlivých GCM a RCP8.5.

precipitation totals does not yield a trend that would be statistically significant. This fact may also be derived from Fig. 3, which presents runoff heights. From the long-term perspective, no statistically significant trend can be established in mean annual runoff (that capture mean values for the whole territory of the Czech Republic). Nevertheless, a significant decline in runoff in the summer and spring months and an increase in January may be observed (which is in particular due to an increase in temperature – liquid precipitation and snow melting). For illustration, a change of runoff by 1 mm means a reduction by 78.87 million m³. This value corresponds nearly to the water volume in the Rozkoš water reservoir.

Climate Change Scenarios in Water Management

The increment method is used as a standard for calculating climate change scenarios in the context of predicting changes of hydrological balance in the Czech Republic, especially for studies with monthly time steps. This method is based on a transformation of observed data so that changes of transformed variables would correspond to changes derived from climate model simulations. The monthly time step usually considers changes of mean monthly precipitation totals and mean monthly temperature. The daily time step needs to consider also variability changes of variables. Therefore, the ADC (Advanced Delta Change) increment method has been used for calculating climate change scenarios. The increment method is based on a transformation of observed data in a way that ensures that changes between the transformed and original series are the same as changes derived from a regional climate model. Especially in the daily time step, it is desirable that considered transformations regarding precipitation and temperature take into account changes both in the mean and in the variability. To put it simply, this means that extremes may change differently from the mean. When precipitation changes are derived from the climate model, the ADC method takes into consideration also systematic simulation errors. Since temperature is transformed linearly, a systematic error does not have an impact on the resulting temperature transformation [4].

The chosen method has been used to transform selected [5] Global Circulation Models (GCMs) for sub-catchment areas, namely:

- NorESM1-M +
- MPI-ESM-LR + HadGEM2-ES +
- GISS-E2-H + MRI-ESM1 +
- CanESM2 + GFDL-CM3.

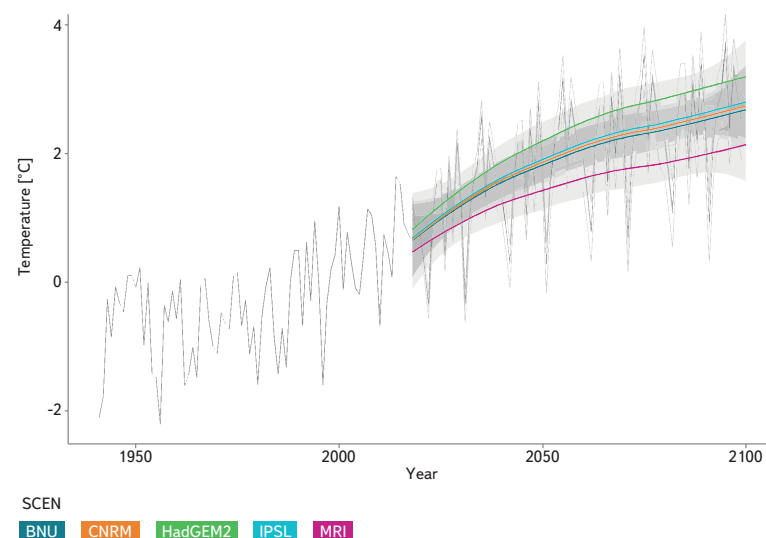


Fig. 4. Air temperature changes according to individual GCMs and RCP8.5

Pro hodnocení vodohospodářské bilance byly vybrány scénáře:

1. **0** – označující současné podmínky
2. **2** – současné klima + 2 °C
3. **HadGEM2** – klima založené na výstupech GCM HadGEM2-ES RCP4.5

Modelování hydrologické bilance

K modelování hydrologické bilance byl použit model Bilan, který je vyvíjen více než 15 let v oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v. v. i. Model počítá v denním či měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí, a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Odtok je modelován jako součet tří složek: dvě složky přímého odtoku (zahrnující i hypodermický odtok) a základní odtok [7, 8, 9]. Pro modelování hydrologické bilance byla použita měsíční verze modelu.

Hydrologické modelování změn klimatu

Postup modelování dopadu změny klimatu na hydrologický režim (viz obr. 5) lze stručně shrnout následovně:

1. Zvolený hydrologický model je pro vybrané povodí nakalibrován pomocí pozorovaných dat. Hydrologický model by měl být fyzikálně založen, aby bylo zaručeno, že i pro nepozorované podmínky bude poskytovat fyzikálně přijatelné výsledky.
2. Vstupní veličiny z globálního, popřípadě vnořeného regionálního klimatického modelu jsou převedeny na scénářové řady pro jednotlivá povodí, a to:
 - a. statistickým downscalingem
 - b. „postprocessingem“ výstupu klimatického modelu, tj. využitím přírůstkové metody či korekce systematických chyb

Často je nutné pomocí prostorové interpolace vztáhnout data z výpočetních buněk klimatického modelu k těžišti daného povodí. Pro korektní využití všech metod (a–b) je nezbytné mít k dispozici pozorovaná data.
3. Pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad je provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období.
4. Modelované průtoky pro současnost a výhledová období jsou korigovány v jednotlivých měsících pomocí kvantilové metody [10].

The first model (NorESM1-M) represents a median of the ensemble of all GCMs. The MPI-ESM-LR + HadGEM2-ES models act as controlling GCMs for several Euro-CORDEX RCM simulations. This is after all true also for the selected median model, which also controls one of the Euro-CORDEX RCMs. The GISS-E2-H + MRI-ESM1 models ensure meeting of the condition to cover inter-model variability and the CanESM2 + GFDL-CM3 models enable the last stated condition for the selection to be met. These models have been further tested for water management. Selected RCM models have also been tested. The HadGEM2-ES model has been chosen for the actual testing, which has thus been recommended in studies [6], recommending a median scenario of climate change impacts in water management. Fig. 4 presents temperature development pursuant to RCP8.5¹.

The following scenarios have been selected to evaluate the water management balance:

1. **0** – current conditions
2. **2** – current climate + 2 °C
3. **HadGEM2** – climate based on the outputs of GCM HadGEM2-ES RCP4.5

Modelling of Hydrological Balance

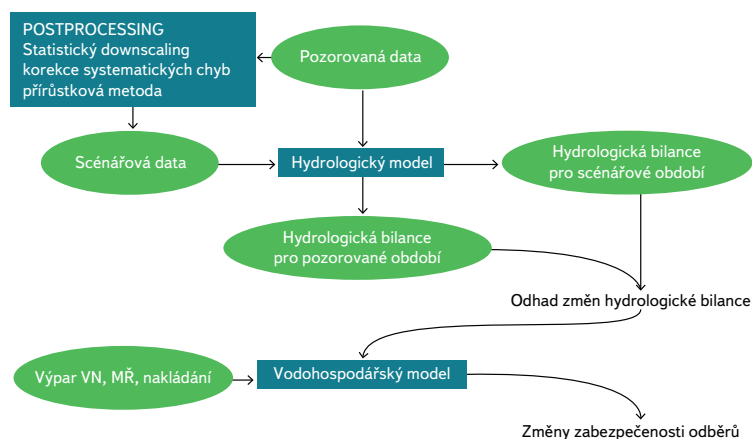
The Bilan model, which is being developed for over 15 years at the Hydrology Department of the T. G. Masaryk Water Research Institute, has been used for modelling hydrological balance. The model calculates in daily or monthly time steps chronological hydrological balance of a catchment area or of a territory. It expresses fundamental balance relations on the surface of the catchment area, in the aeration zone that also includes the vegetation cover of the catchment area, and in the groundwater zone. Air temperature is used as an energy balance indicator that has a significant impact on hydrological balance. The calculation models potential evapotranspiration, actual evaporation, infiltration into the aeration zone, seepage through this zone, snow water equivalent, water storage in the soil and groundwater storage. Runoff is modelled as a sum of three components: two components of direct runoff (that includes also hypodermic runoff) and base flow [7, 8, 9]. The monthly version of the model has been used for modelling hydrological balance.

Hydrological Modelling of Climate Changes

The procedure for modelling the climate change impact on the hydrological regime (see Fig. 5) may be concisely summarised as follows:

1. The chosen hydrological model is calibrated for selected catchment areas using observed data. The hydrological model should have a physical basis to make sure that it yields physically acceptable results also for unobserved conditions.
2. Input variables from a global or embedded regional climate model are transformed to scenario series for the individual catchment areas, namely by:
 - a. statistical downscaling
 - b. post-processing of the climate model output, i.e. by using the increment method or correction of systematic errors

It is often necessary to relate the data from calculation cells of the climate model to the centre of a given catchment area by spatial interpolation. It is essential to have observed data at one's disposal in order to use all methods (a–b) correctly.



Obr. 5. Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu

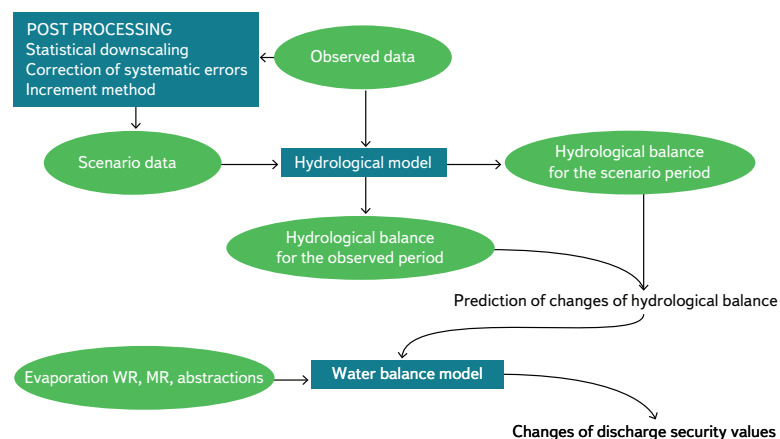


Fig. 5. Scheme of hydrological modelling of climate change impacts

Vodohospodářská bilance

Na výše uvedené vyhodnocení dopadu klimatické změny na hydrologické charakteristiky navázalo posouzení zabezpečení odběrů vody pomocí metod vodohospodářské bilance a simulačního modelování zásobní funkce vodohospodářských soustav. Aplikovanou metodu podrobně popisuje [11], použité programové vybavení [12]. Simulační model simuluje chování soustavy v chronologické řadě diskretních časových kroků (zde zvolen měsíční krok) na základě znalosti časových řad přirozených průtoků (neovlivněných regulací a odběrů/vypouštění vody), požadavků na užívání vody (zde odběrů vody) a zachování minimálních průtoků, technických parametrů prvků soustavy (zde objemů zásobního prostoru nádrží a kapacit převodů vody) a do modelu zavedených pravidel regulace odtoku (manipulačních pravidel). Výstupem simulace jsou časové řady simulovaných aktivit: průtoků a výparu z hladin vodních nádrží, odběrů vody, odtoků z vodních nádrží, objemů vody a hladin v zásobním prostoru nádrží. Tyto časové řady jsou následně statisticky vyhodnoceny. Jako základní charakteristika vyjadřující zajištění odběrů vody je vyhodnocena zabezpečení podle trvání p_t definovaná [13] (zjednodušeně vyjadřuje procentní podíl délky období, po kterou jsou požadavky na odběry vody a minimální průtoky plně zajištěny, z celkové délky celého posuzovaného období).

Řešení bylo zpracováno variantně pro výše uvedené scénáře popisující současné podmínky a dopad klimatické změny. Časové řady přirozených průtoků a výparu v profilech vodních nádrží a míst odběrů vody byly výsledkem výše uvedeného modelování hydrologické bilance. Celková délka těchto řad byla 718 měsíců (tj. necelých 60 let). Požadavky na odběry vody byly posuzovány alternativně jako v současnosti realizované odběry vody a jako povolené roční hodnoty odběrů. Jako současné odběry byly uvažovány maximální roční odběry vody evidované pro potřebu sestavení vodní bilance [1] za období let 2014–2019, a to jako během roku rovnoměrně rozdělené. Z údajů této evidence byly převzaty i povolené hodnoty odběrů, požadavky na minimální průtoky pod vodními nádržemi a objemy zásobního prostoru vodních nádrží. Do řešení byl započítán i vliv případných dalších skutečných odběrů a vypouštění vody v povodí vodních nádrží a další relevantní požadavky na zajištění odběrů pro průmysl (např. vodní nádrže Slezská Harta, Kružberk, Morávka a Šance) či zemědělství (např. vodní nádrže Vír I, Vranov a Znojmo). Zajištění požadavků na vodárenské odběry bylo vždy (tj. v každém časovém kroku simulace) uvažováno jako přednostní oproti jiným požadavkům na vodní zdroje, včetně požadavků na minimální průtoky pod vodními nádržemi. Vzhledem k tomu, že se jednalo o modelování možné budoucí situace, nebyla uvažována současná pravidla pro dispečerská řízení vodních nádrží (jsou nastavena na stávající hydrologické podmínky a změna těchto podmínek by si vynutila jejich revizi a optimalizaci).

3. Simulation of hydrological balance for the scenario period is done using a calibrated hydrological model and scenario series.

4. Modelled discharge for the present and future periods are adjusted in the individual months using the quantile method [10].

Water Balance

The above evaluation of the climate change impact on hydrological characteristics has been followed by an assessment of the security of water demand with the help of the water balance method and simulation modelling of the storage function of water resources and supply systems. The applied method is described in detail [11] as well as the software used [12]. The simulation model simulates behaviour of the system in a chronological series of discrete time steps (the monthly time step has been selected in this case) based on the knowledge of time series of natural discharges (unaffected by regulation and water abstraction/release), requirements for water use (water demand in this case) and maintenance of minimum discharges, technical parameters of the respective elements of the system (volume of the storage space of water reservoirs and water transfer capacity) and a model containing introduced rules of runoff regulation (handling rules). Time series of simulated activities are an output of the simulation: discharge and evaporation from the surface of water reservoirs, water demand, runoff from water reservoirs, water volume and water levels in the storage space of reservoirs. These time series are subsequently statistically evaluated. Security according to the duration of p_t defined in [13] has been evaluated as fundamental characteristics that expresses the security of water demand (to put it simply, it expresses a percentage share of the duration of a period during which water demand and minimum discharge requirements are secured out of the whole duration of the total assessed period.)

Alternatives have been prepared for the above scenarios that describe current conditions and the climate change impact. The aforementioned modelling of hydrological balance has yielded time series of natural discharges and evaporation in the profiles of water reservoirs and water abstraction sites. The overall length of these series has been 718 months (i.e. less than 60 years). Water demand requirements have been assessed alternatively as water demand currently in place and as permitted annual demand values. Maximum annual water demand recorded for compiling the water balance between 2014 and 2019 has been considered as current demand, evenly distributed throughout the year [1]. Permitted demand values, minimum discharge requirements downstream from water reservoirs and storage space volume of water reservoirs have been taken from data contained in the above records. Impact of potential other

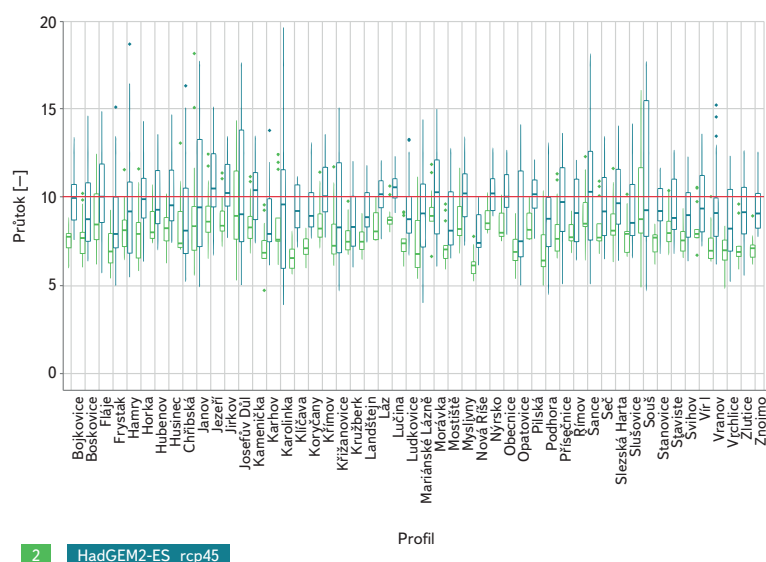
VÝSLEDKY

Výsledkem výše popsaného postupu řešení byla kvantifikace možných dopadů klimatické změny na hydrologické charakteristiky (průtoky a výpar z vodní hladiny a evapotranspirace krajiny) a následné vyhodnocení zabezpečení vodárenských odběrů zajišťovaných vodními nádržemi v těchto podmínkách. Na *obr. 6* jsou uvedeny změny přirozených odtoků (scénář/současnost) pro scénáře 2 a HadGEM formou grafu typu boxplot².

Výsledky vyhodnocení zabezpečení vodárenských odběrů jsou – prostřednictvím hodnoty zabezpečení podle trvání p_t – uvedeny v *tab. 1* a ilustrovány na *obr. 7*. Pro snadnější orientaci jsou odběry podle dosažené zabezpečení rozděleny do čtyř skupin a označeny pomocí barevné škály, a to následujícím způsobem: (a) modře jsou označeny odběry vody s bezporuchovou (tj. $p_t = 99,9$) zabezpečeností současných i povolených odběrů ve všech hodnocených scénářích; (b) zeleně jsou označeny středně rizikové odběry s bezporuchovou zabezpečeností pouze současných odběrů ve všech hodnocených scénářích; (c) žlutě jsou označeny odběry s bezporuchovou zabezpečeností současných odběrů pouze v příznivějším scénáři dopadu klimatické změny HadGEM2 a (d) červeně jsou jako vysoce rizikové označeny odběry, kde bezporuchová zabezpečení není dosažena ani v jednom ze scénářů dopadu klimatické změny.

Jako vysoce rizikové vzhledem k zajištění odběrů vody v podmínkách klimatické změny byly vyhodnoceny vodní nádrže Stanovice, Žlutice, Pílská, Obecnice, Opatovice, Bojkovice, Mariánské Lázně – Podhora, Klíčava a Nová Říše. Jako středně rizikové byly vyhodnoceny vodní nádrže Vranov – Znojmo, Vrchlice, Slušovice, Koryčany a Ludkovice. Naopak bezproblémové zajištění současných i povolených odběrů vody bylo vyhodnoceno u vodních nádrží Římov, Nýrsko, Horka, Lučina, Slezská Harta – Kružberk, Seč – Křižanovice, Jirkov, Myslivny, Josefův Důl, Souš, Mostiště, Hubenov a Landštejn.

Obr. 8 ilustruje efekt využití akumulace vody v zásobním prostoru vodních nádrží na zajištění současných požadavků na vodárenské odběry a minimální průtoky ve vodních tocích pod nádržemi. Vyjádřen je podíl objemu těchto požadavků, který může být zajištěn pouze přítokem v profilu vodní nádrže, a podíl, který může být zajištěn pouze s pomocí akumulace vody v zásobním prostoru. Vyhodnocení je zpracováno z celé délky časové řady simulace pro vodní nádrže s objemem zásobního prostoru větším než 10 mil. m³. Vzhledem k simulaci zásobní funkce v měsíčním kroku (kdy jsou uvažovány průměrné měsíční průtoky), je zde zanedbán vliv rozkolísanosti průtoků v průběhu jednotlivých měsíců.



Obr. 6. Snížení odtoku z povodí vodárenských nádrží

actual demand and water release in the catchment area of water reservoirs as well as further relevant requirements for the security of water demand for the industry (e.g. water reservoirs Slezská Harta, Kružberk, Morávka and Šance) or agriculture (e.g. water reservoirs Vír I, Vranov and Znojmo). The security of requirements for drinking water demand has always (i.e. in each time step of the simulation) been considered as a priority compared to other requirements for water resources, including requirements for minimum discharges downstream from the water reservoirs. Due to the fact that a potential future situation has been modelled, current operating rules for water reservoirs have not been considered (they have been set with the existing hydrological conditions in mind and a change of these conditions would necessitate their review and optimisation).

RESULTS

The aforementioned procedure has resulted in a quantification of potential climate change impacts on hydrological characteristics (discharges and evaporation from the water surface and evapotranspiration of the landscape) and subsequent evaluation of the security drinking water demand provided for by water reservoirs in these conditions. *Fig. 6* presents changes of natural runoffs (scenario/the present) for scenario 2 and for the HadGEM scenario in the form of a boxplot².

Results of the evaluation of the security of drinking water demand are presented in *Tab. 1* and are illustrated in *Fig. 7* by the security value according to the duration of p_t . In order to make the presentation more straightforward, water demand has been divided according to achieved security into four groups and has been colour-marked in the following way: (a) the blue colour marks water demand with trouble-free (i.e. $p_t = 99,9$) security of current and permitted demand in all evaluated scenarios; (b) the green colour marks demand with a medium risk with trouble-free security only of current demand in all evaluated scenarios; (c) the yellow colour marks demand with trouble-free security of current demand only in the more favourable HadGEM2 scenario of the climate change impact and (d) the red colour marks demand with a high risk, i.e. where trouble-free security is not ensured in any of the scenarios of the climate change impact.

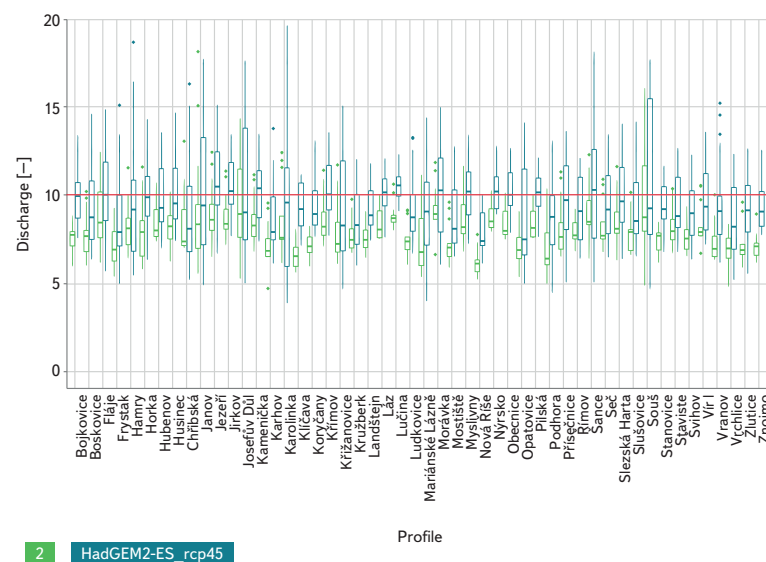


Fig. 6. Reduction in runoff from the catchment area of water reservoirs

Tab. 1. Zabezpečení požadavků na vodárenské odběry vody v podmínkách klimatické změny

| Vodní nádrž | Objem zásob. prostoru [mil.m ³] | Úpravná vody | Skutečný roční odběr [tis.m ³] | Povolený roční odběr [tis.m ³] | Varianta hydrologických podmínek a požadavků na odběry | | | |
|---------------|---|--------------------|--|--|--|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| | | | | | „0“ současné odběry | HadGEM2 současné odběry | „2“ současné odběry | HadGEM2 povolené odběry |
| | | | | | Zabezpečení podle trvání p _t [%] | | | |
| Bojkovice | 0,770 | Bojkovice | 546 | 1200 | 93,1 | 91,8 | 83,3 | 80,7 |
| Fláje | 19,500 | Meziboří | 12119 | 14000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,7 |
| | | Litvínov-Šumná | 2524 | 5800 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,7 |
| Hamry | 1,206 | Hamry | 452 | 1600 | 99,9 | 99,8 | 99,8 | 98,1 |
| Horka | 16,539 | Horka | 3185 | 5110 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Hubenov | 2,395 | Hosov | 3984 | 4446 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Chřibská | 0,839 | Chřibská | 481 | 1250 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,2 |
| Jirkov | 1,917 | Jirkov | 1082 | 2700 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Josefův Důl | 19,133 | Bedřichov | 5427 | 9000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Kamenička | 0,594 | III. Mlýn | 984 | 2000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 96,8 |
| Křímov | 1,260 | III. Mlýn | 2205 | 3000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 96,8 |
| Karhov | 0,288 | Studená-Horní Pole | 237 | 400 | 99,9 | 99,1 | 95,9 | 96,1 |
| Zhejral | 0,157 | | | | | | | |
| Karolinka | 5,813 | Karolinka | 4200 | 7884 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,3 |
| Klíčava | 7,860 | Klíčava | 2333 | 3469 | 98,9 | 98,1 | 95,4 | 95,2 |
| Koryčany | 2,130 | Koryčany | 942 | 1450 | 99,9 | 99,9 | 98,5 | 97,4 |
| Kružberk | 24,580 | Podhradí | 34537 | 85147 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Slezská Harta | 182,010 | Leskovec | 869 | 3154 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Křižanovice | 1,620 | Monaco | 3679 | 6500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Seč | 14,017 | Seč | 202 | 350 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Landštejn | 2,590 | Landštejn | 753 | 1200 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Láz | 0,820 | Kozičín | 741 | 1113 | 99,9 | 99,9 | 99,8 | 98,9 |
| Lučina | 3,457 | Milíkov | 1035 | 1500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| | | Svobodka | 1347 | 2500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Ludkovice | 0,498 | Ludkovice | 479 | 772 | 99,9 | 99,9 | 99,8 | 99,5 |

| Vodní nádrž | Objem zásob. prostoru [mil.m ³] | Úpravna vody | Skutečný roční odběr [tis.m ³] | Povolený roční odběr [tis.m ³] | Varianta hydrologických podmínek a požadavků na odběry | | | |
|-----------------|--|-------------------------|---|---|---|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | | | | | „0“ současné odběry | HadGEM2 současné odběry | „2“ současné odběry | HadGEM2 povolené odběry |
| | | | | | Zabezpečení podle trvání p _t [%] | | | |
| Mariánské Lázně | 0,211 | Mariánské Lázně | 725 | 1200 | 99,9 | 98,5 | 97,8 | 96,0 |
| Podhora | 2,041 | | | | | | | |
| Morávka* | 4,960 | Vyšní Lhoty | 6139 | 14500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 95,4 |
| Šance* | 39,960 | Nová Ves u Frýdlantu | 25415 | 69379 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 95,4 |
| Mostiště | 9,339 | Mostiště | 3183 | 6300 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Myslivny | 0,036 | Myslivny | 284 | 694 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Nová Říše | 2,237 | Nová Říše | 1038 | 2523 | 96,3 | 88,9 | 79,4 | 55,8 |
| Nýrsko | 15,966 | Klatovy | 3253 | 4500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| | | Plzeň | 14125 | 16500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,9 |
| Obecnice | 0,547 | Hvězdička | 972 | 1662 | 99,9 | 99,6 | 98,9 | 96,0 |
| Opatovice | 7,784 | Lhota | 2010 | 3784 | 99,3 | 98,5 | 96,7 | 89,0 |
| Pílská | 1,306 | Kozičín | 1085 | 1142 | 99,6 | 99,3 | 98,4 | 99,1 |
| Přísečnice | 46,670 | Hradiště | 15699 | 30300 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 78,6 |
| Římov | 30,016 | Plav | 17175 | 34600 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Slušovice | 7,245 | Klečůvka | 5080 | 7128 | 99,9 | 99,9 | 99,1 | 97,8 |
| Souš | 4,621 | Souš | 5156 | 7000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Stanovice | 20,164 | Březová | 7059 | 12614 | 99,9 | 99,6 | 96,0 | 84,0 |
| Švihov | 246,068 | Želivka | 93291 | 165600 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 94,9 |
| Vír I | 44,056 | Vír | 1244 | 3150 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,3 |
| | | Švařec | 7688 | 56765 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,3 |
| Vranov | 79,668 | Štítary | 3019 | 4200 | 99,9 | 99,9 | 99,1 | 99,9 |
| Vrchlice | 7,890 | Trojice | 3677 | 7884 | 99,9 | 99,8 | 92,2 | 85,7 |
| Znojmo | 2,450 | Znojmo | 2668 | 4730 | 99,9 | 99,9 | 98,1 | 99,6 |
| Žlutice | 10,281 | Žlutice | 2650 | 4730 | 99,9 | 98,8 | 98,0 | 97,4 |

* Při uvažování vzájemné zastupitelnosti vodních nádrží Morávka a Šance

Tab. 1. Security of drinking water demand in climate change conditions

| Water reservoir | Volume of the storage capacity [million m ³] | Water treatment plant | Actual annual demand [thousand m ³] | Permitted annual demand [thousand m ³] | Alternative of hydrological conditions and water abstraction requirements | | | |
|-----------------|--|-----------------------|---|--|---|------------------------|--------------------|--------------------------|
| | | | | | "0" Current demand | HadGEM2 Current demand | "2" Current demand | HadGEM2 Permitted demand |
| | | | | | Security according to the duration of p _t (%) | | | |
| Bojkovice | 0,770 | Bojkovice | 546 | 1200 | 93,1 | 91,8 | 83,3 | 80,7 |
| Fláje | 19,500 | Meziboří | 12119 | 14000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,7 |
| | | Litvínov-Šumná | 2524 | 5800 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,7 |
| Hamry | 1,206 | Hamry | 452 | 1600 | 99,9 | 99,8 | 99,8 | 98,1 |
| Horka | 16,539 | Horka | 3185 | 5110 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Hubenov | 2,395 | Hosov | 3984 | 4446 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Chřibská | 0,839 | Chřibská | 481 | 1250 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,2 |
| Jirkov | 1,917 | Jirkov | 1082 | 2700 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Josefův Důl | 19,133 | Bedřichov | 5427 | 9000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Kamenička | 0,594 | III. Mlýn | 984 | 2000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 96,8 |
| Křímov | 1,260 | III. Mlýn | 2205 | 3000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 96,8 |
| Karhov | 0,288 | Studená-Horní Pole | 237 | 400 | 99,9 | 99,1 | 95,9 | 96,1 |
| Zhejral | 0,157 | | | | | | | |
| Karolinka | 5,813 | Karolinka | 4200 | 7884 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,3 |
| Klíčava | 7,860 | Klíčava | 2333 | 3469 | 98,9 | 98,1 | 95,4 | 95,2 |
| Koryčany | 2,130 | Koryčany | 942 | 1450 | 99,9 | 99,9 | 98,5 | 97,4 |
| Kružberk | 24,580 | Podhradí | 34537 | 85147 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Slezská Harta | 182,010 | Leskovec | 869 | 3154 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Křižanovice | 1,620 | Monaco | 3679 | 6500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Seč | 14,017 | Seč | 202 | 350 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Landštejn | 2,590 | Landštejn | 753 | 1200 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Láz | 0,820 | Kozičín | 741 | 1113 | 99,9 | 99,9 | 99,8 | 98,9 |
| Lučina | 3,457 | Milíkov | 1035 | 1500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| | | Svobodka | 1347 | 2500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Ludkovice | 0,498 | Ludkovice | 479 | 772 | 99,9 | 99,9 | 99,8 | 99,5 |

| Water reservoir | Volume of the storage capacity [million m ³] | Water treatment plant | Actual annual demand [thousand m ³] | Permitted annual demand [thousand m ³] | Alternative of hydrological conditions and water abstraction requirements | | | |
|-----------------|--|-----------------------|---|--|---|------------------------|--------------------|--------------------------|
| | | | | | “0” Current demand | HadGEM2 Current demand | “2” Current demand | HadGEM2 Permitted demand |
| | | | | | Security according to the duration of p _t (%) | | | |
| Mariánské Lázně | 0,211 | Mariánské Lázně | 725 | 1200 | 99,9 | 98,5 | 97,8 | 96,0 |
| Podhora | 2,041 | | | | | | | |
| Morávka* | 4,960 | Vyšní Lhoty | 6139 | 14500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 95,4 |
| Šance* | 39,960 | Nová Ves u Frýdlantu | 25415 | 69379 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 95,4 |
| Mostiště | 9,339 | Mostiště | 3183 | 6300 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Myslivny | 0,036 | Myslivny | 284 | 694 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Nová Říše | 2,237 | Nová Říše | 1038 | 2523 | 96,3 | 88,9 | 79,4 | 55,8 |
| Nýrsko | 15,966 | Klatovy | 3253 | 4500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| | | Plzeň | 14125 | 16500 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 98,9 |
| Obecnice | 0,547 | Hvězdička | 972 | 1662 | 99,9 | 99,6 | 98,9 | 96,0 |
| Opatovice | 7,784 | Lhota | 2010 | 3784 | 99,3 | 98,5 | 96,7 | 89,0 |
| Pílská | 1,306 | Kozíčín | 1085 | 1142 | 99,6 | 99,3 | 98,4 | 99,1 |
| Přísečnice | 46,670 | Hradiště | 15699 | 30300 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 78,6 |
| Římov | 30,016 | Plav | 17175 | 34600 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Slušovice | 7,245 | Klečůvka | 5080 | 7128 | 99,9 | 99,9 | 99,1 | 97,8 |
| Souš | 4,621 | Souš | 5156 | 7000 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Stanovice | 20,164 | Březová | 7059 | 12614 | 99,9 | 99,6 | 96,0 | 84,0 |
| Švihov | 246,068 | Želivka | 93291 | 165600 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 94,9 |
| Vír I | 44,056 | Vír | 1244 | 3150 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,3 |
| | | Švařec | 7688 | 56765 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,3 |
| Vranov | 79,668 | Štítary | 3019 | 4200 | 99,9 | 99,9 | 99,1 | 99,9 |
| Vrchlice | 7,890 | Trojice | 3677 | 7884 | 99,9 | 99,8 | 92,2 | 85,7 |
| Znojmo | 2,450 | Znojmo | 2668 | 4730 | 99,9 | 99,9 | 98,1 | 99,6 |
| Žlutice | 10,281 | Žlutice | 2650 | 4730 | 99,9 | 98,8 | 98,0 | 97,4 |

* Considering the mutual replaceability of Morávka and Šance water reservoirs

Vodní nádrže s vodárenskými odběry

Současný roční odběr

- Do 1 000 [tis. m³]
- 1 000–10 000 [tis. m³]
- Větší než 10 000 [tis. m³]

Vodní nádrže s vodárenskými odběry

Zabezpečení odběrů

- Bez rizika zabezpečení současných i povolených odběrů
- Bez rizika zabezpečení současných odběrů
- Střední riziko zabezpečení současných odběrů
- Vysoké riziko zabezpečení současných odběrů

Povodí vodních nádrží

Snížení mediánu odtoku ve scénáři HadGEM2 oproti současnosti (scénář "0")

- Bez snížení průtoku
- Pod 10 %
- 10–20 %
- 20–30 %
- Více než 30 %

- Státní hranice
- Vodní tok
- Dílčí povodí
- Kraj
- Sídla



Obr. 7. Riziko nedostatečného zajištění požadavků na vodárenské odběry v podmínkách klimatické změny

Water reservoirs with drinking water demand

Current annual demand

- Up to 1,000 [thousand m³]
- 1,000–10,000 [thousand m³]
- More than 10,000 [thousand m³]

Water reservoirs with drinking water demand

Security of demand

- Without a risk of security current and permitted demand
- Without a risk of security current demand
- Medium risk of security current demand
- High risk of security current demand

Catchment area of water reservoirs

Reduction in the median runoff in the HadGEM2 scenario in comparison to the present (scenario "0")

- Without a reduction in discharge
- Under 10 %
- 10–20 %
- 20–30 %
- More than 30 %

- State border
- Watercourse
- Sub-catchment area
- Region
- Settlements

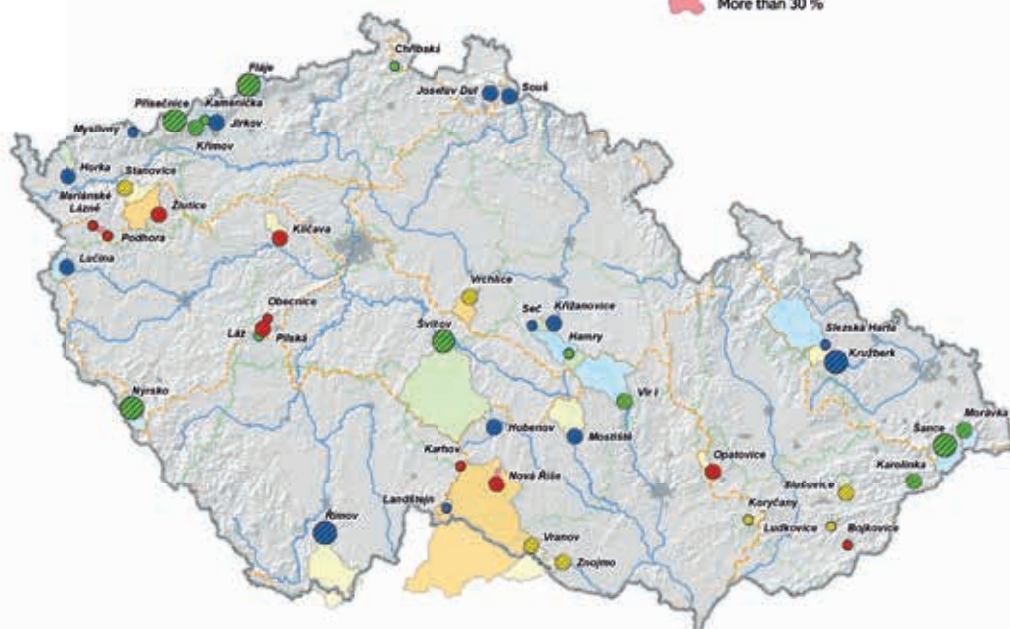
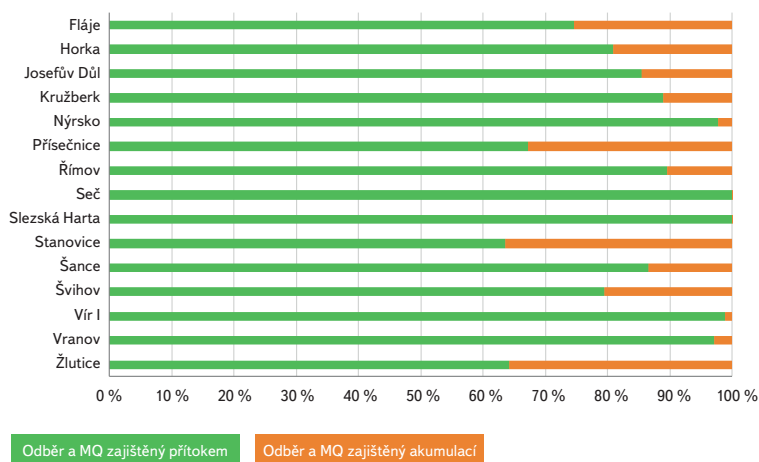


Fig. 7. Risk of insufficient security of requirements for drinking water demand in climate change conditions



Obr. 8. Využití akumulace vody ve vodních nádržích pro zajištění současných odběrů vody a minimálních průtoků (scénář HadGEM2)

DISKUZE

Výsledky posouzení možných dopadů klimatické změny na dostupnost vodních zdrojů jsou přirozeně zatíženy jistou mírou nejistoty. Nejistota predikce dopadů klimatické změny na průtoky je reflektována volbou více možných scénářů pro hydrologické modelování, počátečními a okrajovými podmínkami klimatických modelů a jejich strukturou. Dalšími nejistotami jsou výběr korekce systematických chyb klimatických modelů a struktura hydrologického modelu (modelování různými hydrologickými modely). Ze studií porovnávajících podíl jednotlivých zdrojů nejistot na celkovou nejistotu v hydrologickém modelování vyplývá, že nejistota pramenící z modelování budoucího klimatu (struktura modelu) značně převyšuje nejistotu svázanou s volbou emisního scénáře nebo nejistotu vyplývající z hydrologického modelování. Celková nejistota promítnutá do výsledku hydrologického modelování je značná.

Určitou nejistotu rovněž představují budoucí změny v požadavcích na odběry vody nebo zajištění minimálních průtoků (např. i s ohledem na případné dopady klimatické změny na jakost vody). Řada posuzovaných vodních nádrží a odběrů vody je součástí vodárenských soustav. Případné deficity tak mohou být u některých vodních nádrží pokryty jinými disponibilními vodními zdroji v soustavě, ale i naopak v období sucha může vzniknout požadavek na zvýšení odběrů z vodních nádrží k pokrytí deficitů ostatních, zranitelnějších zdrojů soustavy (odběrů přímo z vodních toků nebo odběrů podzemní vody). Řešení bylo zpracováno variantně pro současné skutečné odběry a odběry povolené. Do výsledků se tak ve značné míře promítá i nízký podíl využití povolených hodnot (viz tab. 1). Vyhodnocená nízká zabezpečenosť povolených hodnot odběrů u některých vodních nádrží může být v budoucnu limitující pro případné napojení dalších spotřebišť na tyto zdroje.

ZÁVĚR

Cílem výše popsaného řešení bylo identifikovat potenciální problémy způsobené dopady klimatické změny k časové úrovni roku 2050 při zásobování pitnou vodou zajišťovaném vodními nádržemi. Při řešení byly aplikovány metody hydrologické a vodohospodářské bilance, včetně simulačního modelování zásobní funkce vodohospodářských soustav. Pomocí použitých modelů byl kvantifikován možný dopad klimatické změny na hydrologické charakteristiky (zejména průtoky) a následně vyhodnocena zabezpečenosť vodárenských odběrů zajišťovaných vodními nádržemi. Hodnocené lokality (vodní nádrže a místa odběrů vody) lze podle výsledné zabezpečenosť orientačně rozdělit do



Fig. 8. Use of water accumulation in the storage space of water reservoirs for the security of current water demand and minimum discharges in the HadGEM2 scenario

The following water reservoirs have been evaluated as having a high risk with regard to the security of water demand in climate change conditions: Stanovice, Žlutice, Pilská, Obecnice, Opatovice, Bojkovice, Mariánské Lázně – Podhora, Klíčava and Nová Říše. Medium risk has been evaluated in water reservoirs Vranov – Znojmo, Vrchlice, Slušovice, Koryčany and Ludkovice. Problem-free security of current and permitted water demand has been evaluated in water reservoirs Římov, Nýrsko, Horka, Lučina, Slezská Harta – Kružberk, Seč – Křižanovice, Jirkov, Myslívny, Josefův Důl, Souš, Mostiště, Hubenov and Landštejn.

Fig. 8 illustrates the impact of using water accumulation in the storage space of water reservoirs on the security of current requirements for drinking water demand and minimum discharges in water courses downstream from water reservoirs. A share of the volume of these requirements has been expressed that may be ensured only by an inflow into a water reservoir as well as a share that may be secured only with the help of water accumulation in the storage space. The whole length of the time series of the simulation has been evaluated for water reservoirs with a storage space volume over 10 mil. m³. With regard to simulation of the storage function in the monthly time step (when mean monthly discharges are considered), the impact of discharge variability in the course of individual months has been disregarded.

DISCUSSION

The results of assessing potential climate change impacts on the availability of water resources are naturally burdened with some degree of uncertainty. Uncertainty of prediction of climate change impacts on discharges has been reflected by choosing multiple possible scenarios for hydrological modelling, initial and marginal climate model conditions and their structure. Other uncertainties include selecting the correction of systematic errors of climate models and structure of the hydrological model (modelling by means of various hydrological models). Studies comparing the share of individual sources of uncertainty on the overall uncertainty in hydrological modelling shows that uncertainty that stems from future climate modelling (model structure) significantly exceeds uncertainty related to selecting an emission scenario or uncertainty that follows from hydrological modelling. The overall uncertainty reflected in the result of hydrological modelling is considerable.

Future changes of water demand requirements or the security of minimum discharges represent some uncertainty too (for instance also with regard to potential climate change impacts on water quality). Numerous assessed water

několika skupin. Z celkem 45 hodnocených vodních nádrží jich bylo 15 vyhodnoceno jako bezproblémové jak pro všechny scénáře klimatické změny, tak pro skutečné i povolené odběry (z větších vodních nádrží mj. Římov, Kružberk – Slezská Harta, Horka). U dalších 13 vodních nádrží byla vyhodnocena bezproblémová zabezpečení u obou scénářů klimatické změny pouze pro současné hodnoty odběrů (mj. Švihov, Nýrsko, Vír I, Přísečnice, Fláje a Šance). Naopak střední riziko nedostatečného zabezpečení odběrů vody bylo identifikováno u 7 vodních nádrží (mj. Vranov – Znojmo a Stanovice) a vysoké riziko u 10 vodních nádrží (mj. Žlutice). Predikce zabezpečení odběrů v podmínkách klimatické změny je přirozeně zatížena nejistotami řešení jak s ohledem na nezbytné zjednodušení komplexní problematiky při jejím modelování, tak s ohledem na další vývoj na straně požadavků na odběry vody (včetně jejich fungování v rámci větších vodárenských soustav) i zajištění minimálních průtoků.

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu VI20192022159 „Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou“ programu BV III/1-VS, který financuje Ministerstvo vnitra ČR.

Poznámky

1. Reprezentativní směry vývoje koncentrací (RCP). Jsou označeny podle přibližného celkového radiačního působení v roce 2100 v porovnání s rokem 1750.
2. V deskriptivní (popisné) statistice je boxplot neboli krabicový graf či krabicový diagram jeden ze způsobů grafické vizualizace numerických dat pomocí jejich kvartilů. Střední „krabicová“ část diagramu je shora ohraničena 3. kvartilem, zespodu 1. kvartilem a mezi nimi se nachází linie vymezující medián. Body „outliers“ zobrazují odlehlé hodnoty (mimo rozpětí 5–95 %).

reservoirs and water demands are part of water supply systems. Potential deficits in certain water reservoirs may therefore be met by other available water resources in the system; however, on the contrary a requirement may arise to increase water demand from water reservoirs to meet a deficit of other more vulnerable resources in the system (abstraction directly from watercourses or groundwater abstraction). Alternatives have been elaborated for current actual demands and permitted demands. The low share of using permitted values (see Tab. 1) is reflected in the results to a considerable extent. The evaluated low security of permitted water abstraction values in some water reservoirs may be limiting in the future for potential connection of other customers to these resources.

CONCLUSION

The aim of the above analysis has been to identify potential problems caused by climate change impacts in the timeframe of the year 2050 with respect to drinking water supply provided for by water reservoirs. Hydrological and water management balance procedures have been applied, including modelling of the storage function of water management systems. A potential climate change impact on hydrological characteristics (especially discharges) has been quantified by the applied models, and the security of drinking water demand provided for by water reservoirs has been subsequently evaluated. According to the security that has resulted from the above, the evaluated sites (water reservoirs and water abstraction sites) may be roughly divided into several groups. Out of a total of 45 evaluated water reservoirs, 15 have been evaluated as problem-free for all climate change scenarios as well as for actual demand and permitted water abstraction (among others Římov, Kružberk – Slezská Harta, Horka from the larger water reservoirs); in 13 other water reservoirs a problem-free security has been evaluated in both climate change scenarios only for current demand levels (among others Švihov, Nýrsko, Vír I, Přísečnice, Fláje and Šance). On the contrary, a medium risk of insufficient security of water demand has been identified in 7 water reservoirs (among others Vranov – Znojmo and Stanovice) and a high risk has been established in 10 water reservoirs (among others Žlutice). Prediction of the security of water demand in climate change conditions is naturally burdened with uncertainties both with regard to the necessary simplification of a complex issue in the modelling as well as with regard to further development concerning requirements for water demand (including its functioning within larger water supply systems) and the security of minimum discharges.

Notes

1. Representative Concentration Pathways (RCPs). They are designated according to the approximate total radiation effect in 2100 in comparison with 1750.
2. In descriptive statistics, a boxplot or a box-and-whisker plot or a box-and-whisker diagram is one of the modes of graphical visualisation of numerical data by their quartiles. The middle “box” part of the diagram is delimited by the 3rd quartile from the top, by the 1st quartile from the bottom, with a line between them that delimits the median value. The “outliers” are points that represent outlying values (outside the 5–95 % range).

Literatura

- [1] Vyhláška č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci
- [2] BERAN, A. a kol., *Metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody*. VÚV TGM, v. v. i., 2019, certifikovaná metodika MZe. ISBN 978-80-87402-70-2.
- [3] Vyhláška č. 137/1999 Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví seznam vodárenských nádrží a zásady pro stanovení a změny ochranných pásem vodních zdrojů
- [4] HANEL, M., VIZINA, A., MARTÍNKOVÁ, M., & FENDEKOVÁ, M., *Changes of drought characteristics in small Czech and Slovakian catchments projected by the CMIP5 GCM ensemble*, 2014
- [5] ŠTĚPÁNEK, P. a kol., *Očekávané klimatické podmínky v České republice*. 2019. Vydáno v rámci projektu: „SustES – Adaptační strategie pro udržitelnost ekosystémových služeb a potravinové bezpečnosti v nepříznivých přírodních podmínkách“ (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000797)“. ISBN. 978-8-87902-28-8.
- [6] VIZINA, A., HANEL, M. a kol. *Střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v České republice, zpráva pro státní podniky povodí*. VÚV TGM, v. v. i. 2019
- [7] TALLAKSEN, L. M., & VAN LANEN, H. A. (Eds.), *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. 2004
- [8] VIZINA, A., HORÁČEK, S., & HANEL, M., Recent developments of the BILAN model. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2015, roč. 57, č. 4–5, s. 7–10
- [9] MELIŠOVÁ, E., VIZINA, A., STAPONITES, L. R., & HANEL, M., The Role of Hydrological Signatures in Calibration of Conceptual Hydrological Model. *Water*, 2020, 12(12), 3401
- [10] GUDMUNDSSON, L., BREMNES, J. B., HAUGEN, J. E., & ENGEN-SKAUGEN, T., Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012, 16(9), 3383–3390
- [11] VYSKOČ, P., ZEMAN, V., *Metodický postup zpracování vodohospodářské bilance současného a výhledového stavu množství povrchových vod*. Praha: VÚV TGM, v. v. i. 2008
- [12] PICEK, J., VYSKOČ, P. a ZEMAN, V. *Simulační model množství povrchových vod: zásobní funkce vodohospodářské soustavy*. Praha: VÚV TGM, v. v. i. 2008
- [13] ČSN 75 2405 Vodohospodářská řešení vodních nádrží

Acknowledgements

The study has been elaborated on the basis of a research conducted within No. VI20192022159 “Water Management and Water Supply Systems and Preventive Measures to Reduce Risks for Drinking Water Supply” under programme No. BV III/1-VS, which is funded by the Ministry of the Interior of the Czech Republic.

Autoři

Ing. Adam Vizina, Ph.D.

✉ adam.vizina@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-4683-9624

Ing. Petr Vyskoč

✉ petr.vyskoc@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5006-5414

Ing. Martina Peláková

✉ martina.pelakova@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-0485-1542

Ing. Jiří Píček

✉ jiri.picek@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-6978-6801

Ing. Adam Beran

✉ adam.beran@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-8800-5599

Ing. Roman Kozín

✉ roman.kozin@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5773-6567

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2021.03.001