

Potenciál chráněných území pro akumulaci povrchových vod pro zmírnění dopadů klimatické změny na zásobování pitnou vodou

ADAM VIZINA, PETR VYSKOČ, ROMAN KOŽÍN, HANA NOVÁKOVÁ

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

ABSTRAKT

V České republice jsou prostřednictvím *Generelu území chráněných pro akumulaci povrchových vod* vymezeny plochy morfologicky, geologicky a hydrologicky vhodné pro akumulaci povrchových vod pro zmírnění nepříznivých účinků povodní a sucha. V souvislosti se změnou klimatu tyto lokality vytvářejí potenciál pro možná adaptační opatření. Článek popisuje vyhodnocení potenciálu vybraných lokalit určených k zajištění vodárenských odběrů v podmínkách klimatické změny pomocí postupů hydrologické a vodohospodářské bilance.

ÚVOD

Česká republika (ČR) má tradici v plánování vodních zdrojů. *Státní plán Československé republiky* (1954) byl prvním uceleným výčtem možností vodohospodářského využití vodních zdrojů na našem území. Stal se také podkladem pro územní plánování. V roce 1975 následuje vydání *Směrného vodohospodářského plánu (SVP)*, kde byla věnována zvýšená pozornost analýze, dokumentaci stavu a možnosti využití vodních zdrojů. Nově byly zpracovány nárokové potřeby vody a jejich výhled na příštích 30 let. Celkem bylo v rámci SVP vytipováno 581 potenciálních přehradních profilů vhodných pro výstavbu vodních nádrží, z čehož bylo podrobněji zdokumentováno 286 lokalit vhodných pro tuto výstavbu. V roce 1988 následuje *Publikace SVP*, která aktualizovala údaje o lokalitách. Kvůli omezení nároků na zábor zemědělské půdy došlo ke zrušení územního hájení u 253 lokalit, a 97 lokalit bylo dokonce zcela vyřazeno. V roce 1995 byl vypracován další SVP, v němž bylo potřeba zohlednit novou společensko-politickou situaci a zavedení environmentálních přístupů ve vodním hospodářství. Počet územně hájených lokalit se zúžil na pouhých 35. V roce 2007 vzniká *Plán hlavních povodí ČR*, který sloužil jako dlouhodobá koncepce v oblasti plánování vod. Jedním z jeho cílů byla aktualizace stávajícího rozsahu lokalit výhledových nádrží a jejich územní hájení. Aktualizovaný seznam čítal 186 lokalit, nicméně kvůli odporu veřejnosti a zájmům ochrany přírody a krajiny se plán nepodařilo schválit. Proto v roce 2011 dochází k vypracování dokumentu *Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod* (dále *Generel LAPV*). *Generel LAPV* byl zpracován v návaznosti na územně hájené lokality v SVP 1988. U jednotlivých lokalit byly posouzeny majetkoprávní, socioekonomické a environmentální aspekty a *Generel LAPV* ve své finální podobě nakonec obsahuje 65 hájených lokalit. V roce 2020 dochází k další a zatím poslední aktualizaci *Generelu LAPV*. Potřeba jeho aktualizace je obsažena v „Koncepci ochrany před následky sucha pro území České republiky“, kterou vláda schválila v roce 2017 a rovněž vyplynula

z jednání Národní koalice pro boj se suchem v květnu 2019. Koncepce i Národní koalice vznikly jako reakce na dlouhodobé sucho v letech 2014–2019. V rámci aktualizace dochází k rozšíření *Generelu LAPV* o dalších 21 lokalit. *Generel LAPV 2020* [1] tedy eviduje celkem 86 lokalit. Z nich 31 je zařazeno do kategorie A, tj. mezi lokality potenciálně určené pro vodárenské nádrže.

V ČR i ve světě je věnována značná pozornost návrhům adaptačních opatření, která by měla zmírnit dopady změny klimatu. Jedním z takových opatření je dlouhodobě udržitelné hospodaření s vodními zdroji. Je potřeba zmínit, že adaptační opatření mají být komplexní a navzájem se doplňující. Nicméně z dosavadních studií [2–5] vyplývá, že v případě zajištění spolehlivých dodávek vody pro průmysl a obyvatelstvo je jedním z vhodných opatření využití vodních nádrží. Případné nádrže je však potřeba prověřit v kontextu změny klimatu. Zejména zvyšující se teplota vzduchu ovlivňuje výpar z volné hladiny a celkovou evapotranspiraci v krajině, a jak se ukázalo např. v [5], nádrže ve zranitelných lokalitách mohou mít výhledově problém plnit dodávky s požadovanou zabezpečeností. *Generel LAPV 2020* obsahuje pouze základní údaje o možném (potenciálním) objemu nádrží. Vzhledem k probíhající změně klimatu je potřeba prověřit základní vodohospodářskou funkci případných nádrží na LAPV, a sice zda by tyto případné nádrže byly schopny kompenzovat negativní změny v příslušných povodích. Podobnou problematikou se již zabýval [6, 7], nicméně výsledky neobsahují významnou periodu sucha 2014–2019. Proto bylo v rámci projektu „*Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou*“ vybráno 17 možných vodních nádrží z LAPV kategorie A a provedeno jejich posouzení s využitím nových dat do roku 2020 a nových scénářů klimatické změny. Řešení navazuje na dílčí výstupy uvedeného projektu, zejména vyhodnocení zabezpečení odběrů vody ze stávajících vodárenských nádrží [5] a bilance zdrojů a potřeb podzemní vody pro pitné účely [8].

METODIKA A MATERIÁL

Posouzení možných dopadů klimatické změny na zajištění vodárenských odběrů vodními nádržemi vychází z metodiky [9]. 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, modelování hydrologické bilance bylo provedeno rovněž pro období k roku 2035 a 2085.

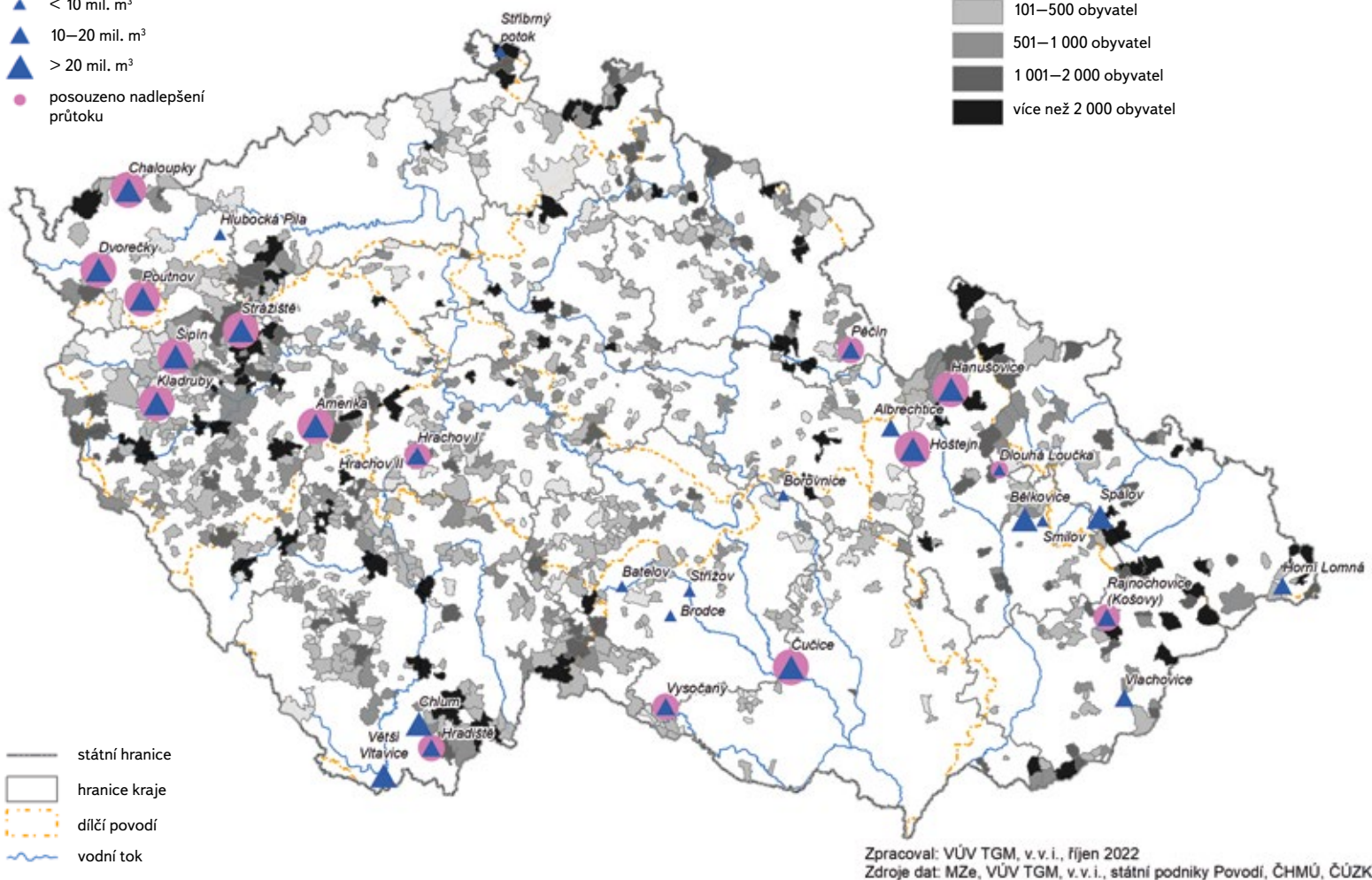
Území chráněná pro akumulaci povrchových vod kategorie A

Celkový ovladatelný prostor V_0

- ▲ < 10 mil. m^3
- ▲ 10–20 mil. m^3
- ▲ > 20 mil. m^3
- posouzeno nadlepšení průtoku

Obce postižené suchem z hlediska zásobování pitnou vodou podle počtu obyvatel

- do 100 obyvatel
- 101–500 obyvatel
- 501–1 000 obyvatel
- 1 001–2 000 obyvatel
- více než 2 000 obyvatel



Obr. 1. Území chráněná pro akumulaci povrchových vod kategorie A a obce postižené suchem z hlediska zásobování pitnou vodou; polygony zobrazují hranice obcí a počet suchem dotčených obyvatel

Fig. 1. Areas protected for surface water storage category A and municipalities affected by drought in terms of drinking water supply; polygons represent municipalities and population affected by drought

Výběr hodnocených lokalit byl s ohledem na řešení problematiky zásobování pitnou vodou omezen na LAPV kategorie A. Z celkem 31 LAPV evidovaných v této kategorii bylo pro řešení vybráno 17 lokalit. Výběr vycházel z umístění těchto lokalit v blízkosti potenciálně problémových oblastí. Výběr ilustrují obr. 1–3. Vybrané a posuzované lokality jsou zde podbarveny fialově. Obr. 1 znázorňuje polohu LAPV kategorie A vzhledem k obcím, ve kterých byly v rámci zpracování Plánů rozvoje vodovodů a kanalizací území ČR [10] identifikovány obce postižené v roce 2015 suchem z hlediska zásobování pitnou vodou (v drtivé většině jde o problémy v zásobování podzemní vodou). Obr. 2 ilustruje umístění LAPV vzhledem k zajištění současných požadavků na vodárenské odběry vodními nádržemi v podmínkách klimatické změny [5]. Pro snadnější orientaci jsou odběry podle dosažené bezpečnosti dle trvání rozděleny do čtyř skupin a označeny pomocí barevné škály, a to následujícím způsobem:

a) modře jsou označeny odběry vody s bezporuchovou (tj. $pt = 99,9$) bezpečností současných i povolených odběrů ve všech hodnocených scénářích,

b) zeleně jsou označeny středně rizikové odběry s bezporuchovou bezpečností pouze současných odběrů ve všech hodnocených scénářích,

c) žlutě jsou označeny odběry s bezporuchovou bezpečností současných odběrů pouze v příznivějším scénáři dopadu klimatické změny HadGEM2,

d) červeně jako vysoce rizikové jsou označeny odběry, kde bezporuchová bezpečnost není dosažena ani v jednom ze scénářů dopadu klimatické změny.

Obr. 3 ilustruje umístění LAPV vzhledem k územím – tzv. pracovním jednotkám útvarů podzemní vody –, jež jsou v současných podmínkách nebo v podmínkách klimatické změny vyhodnocena jako (potenciálně) riziková z hlediska bilance dostupných zdrojů a odběrů podzemní vody [8]. Vybrané LAPV a jejich charakteristiky jsou uvedeny v tab. 1.

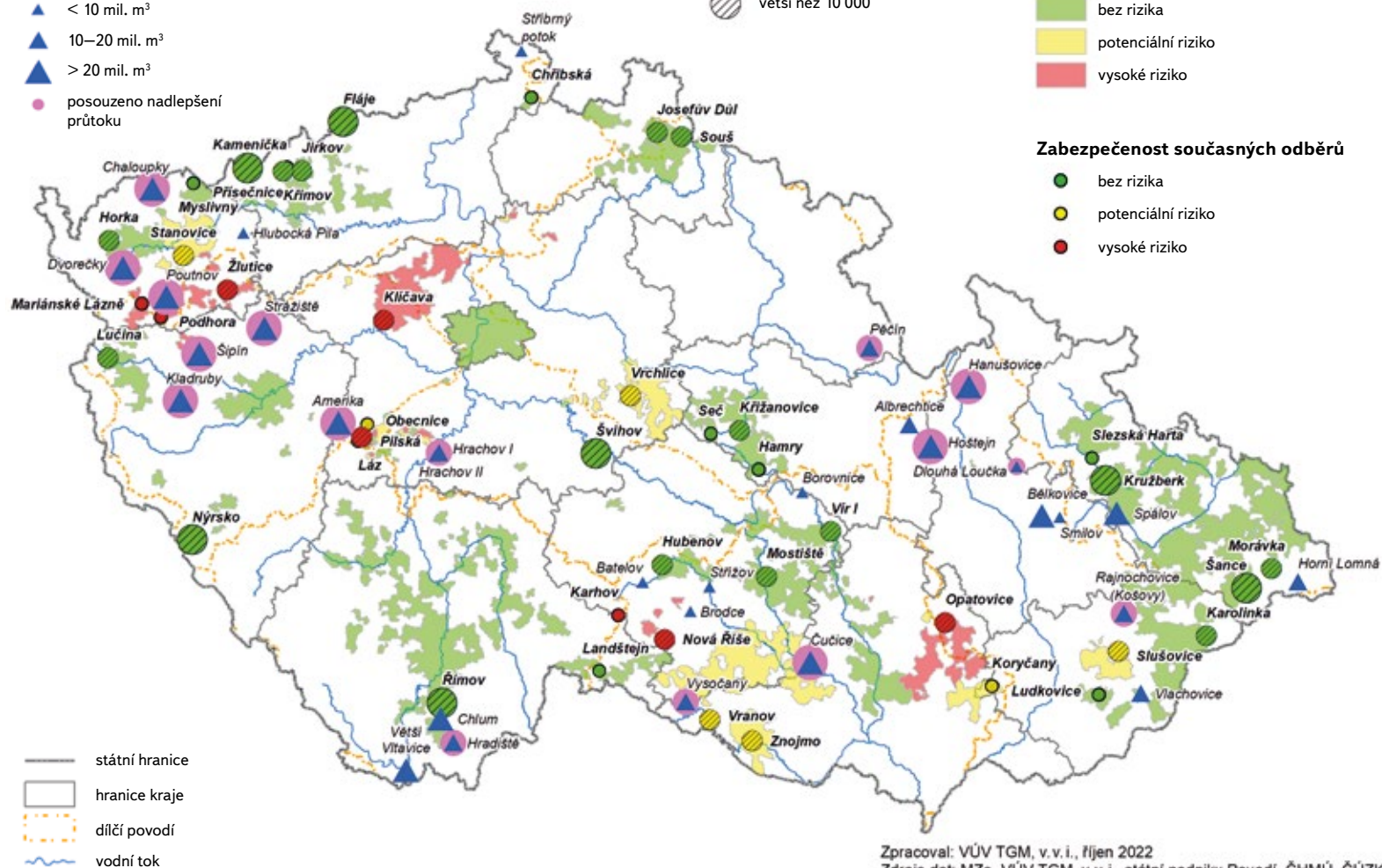
Současné klimatické podmínky

Pro samotné hodnocení současných podmínek byla využita klimatická data za období 1961–2020, a to časové řady teplot vzduchu a srážkových úhrnů. V tomto období lze pozorovat výrazný nárůst teplot, především v posledních letech.

Území chráněná pro akumulaci povrchových vod kategorie A

Celkový ovladatelný prostor Vo

- ▲ < 10 mil. m³
- ▲ 10–20 mil. m³
- ▲ > 20 mil. m³
- posouzeno nadlepšení průtoku



Obr. 2. Území chráněná pro akumulaci povrchových vod kategorie A a zabezpečení vodárenských odběrů vodními nádržemi

Fig. 2. Areas protected for category A surface water storage and reliability of water abstractions by reservoirs

Tento nárůst dosahuje vysoké statistické významnosti. Zvyšující se teplota má vliv na velikost potenciální evapotranspirace, a pokud je k dispozici voda v půdním profilu, tak samozřejmě i na aktuální výpar. Snížená dostupnost srážkových úhrnů byla především v obdobích 1969–1974, 1989–1994 a 2014–2017. Při vyhodnocení ročních srážkových úhrnů nelze vysledovat trend, který by byl statisticky významný. Obdobně je to také u odtoků, kde z dlouhodobého hlediska u průměrných ročních odtoků (průměrných za celé území ČR) nelze najít statisticky významný trend. V posledních letech lze však pozorovat výrazný pokles odtoků v letních a jarních měsících a nárůst v měsíci lednu, což je dáno především kapalnými srážkami a táním sněhu v důsledku zvýšení teplot.

Scénáře změny klimatu ve vodním hospodářství

Pro tvorbu scénářů změny klimatu v kontextu odhadu změn hydrologické bilance se v ČR 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 totožné 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. Zjednodušeně to znamená, že extrémy se mohou měnit jinak než průměr. Při odvození změn srážek z klimatického modelu metoda ADC uvažuje i systematické chyby simulace. Jelikož teplota je transformována lineárně, nemá systematická chyba na výslednou transformaci teploty vliv [11].

Zvolenou metodou byly transformovány vybrané [12] *Globální cirkulační modely* (GCM) pro dílčí povodí, a to:

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

Území chráněná pro akumulaci povrchových vod kategorie A

Celkový ovladatelný prostor Vo

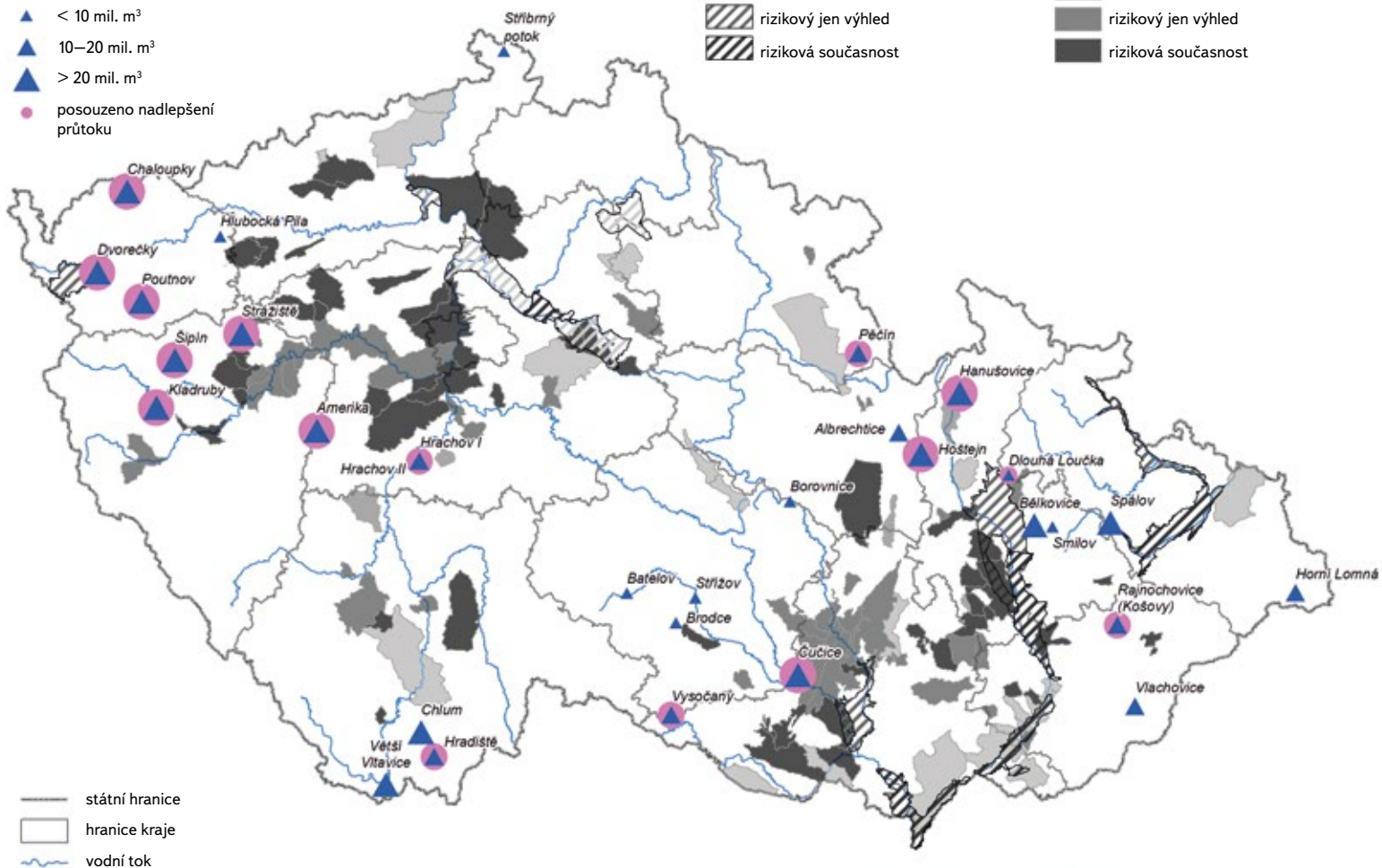
- ▲ < 10 mil. m³
- ▲ 10–20 mil. m³
- ▲ > 20 mil. m³
- posouzeno nadlepšení průtoku

Pracovní jednotky svrchních útvarů

- potenciálně rizikový jen výhled
- potenciálně riziková současnost
- rizikový jen výhled
- riziková současnost

Pracovní jednotky základních útvarů

- potenciálně rizikový jen výhled
- potenciálně riziková současnost
- rizikový jen výhled
- riziková současnost



Zpracoval: VÚV TGM, v. v. i., říjen 2022
Zdroje dat: MZe, VÚV TGM, v. v. i., státní podniky Povodí, ČHMÚ, ČÚZK

Obr. 3. Území chráněná pro akumulaci povrchových vod kategorie A a bilančně rizikové pracovní jednotky útvarů podzemní vody
Fig. 3. Areas protected for the accumulation of surface water category A and balance risk working units of groundwater bodies

První model (NorESM1-M) představuje střed souboru všech GCM. Modely MPI-ESM-LR + HadGEM2-ES vystupují jako řídicí GCM pro několik Euro-CORDEX RCM simulací. To ostatně nakonec 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 klimatické modely byly dále testovány pro možnosti využití ve vodním hospodářství především pomocí modelování hydrologické bilance modelem BILAN, a to i pro historické běhy (simulace na již pozorovaném období). Testovány byly také vybrané modely RCM. Pro samotné hodnocení byl vybrán model HadGEM2-ES, na který odkazují studie [13], doporučující střední scénář dopadů klimatické změny ve vodním hospodářství. Vývoj teploty pro jednotlivé vybrané klimatické modely GCM je uveden na obr. 4, kde silná černá čára popisuje vývoj průměrných ročních teplot pro povodí řešených lokalit na základě pozorování, šedá prostřednictvím jednotlivých simulací GCM (analogicky roční průměr pro všechny lokality) a následné sumari-zace na základě emisních scénářů RCP. Je zřejmé, že nárůst teploty je dán především právě volbou emisního scénáře, který udává okrajové podmínky jednotlivých simulací GCM. Rozdílné je to však u srážkových úhrnů, jež jsou znázorněny

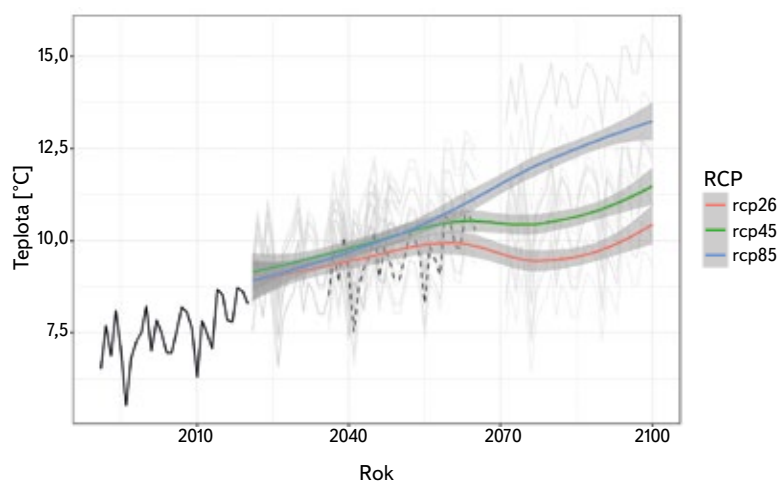
na obr. 5. V rámci simulací jsou významné rozdíly i v rozložení změn v průběhu roku. Většina simulací predikuje nárůst srážkových úhrnů pro ČR, což může být dáno polohou státu. Tento jev a věrohodnost výše uvedených simulací pro ČR jsou velmi diskutovány v rámci odborné obce. Upřesnění by měly poskytnout výstupy z projektů TA ČR „PERUN“ a „Centrum Voda“, kde se tento jev zkoumá.

Pro hodnocení vodohospodářské bilance byly vybrány scénáře:

- **0** – označující současné podmínky,
- **2** – současné klima oteplené + 2 °C, tento scénář reflektuje průměrné oteplení pro ČR cca k roku 2050 a využívá nezměněné srážkové úhrny, tzn. simuluje charakter změn v hydrologickém režimu, pokud by se klima pouze oteplilo,
- **HadGEM2** – klima založené na výstupech globálního klimatického modelu HadGEM2-ES a emisního scénáře RCP4.5.

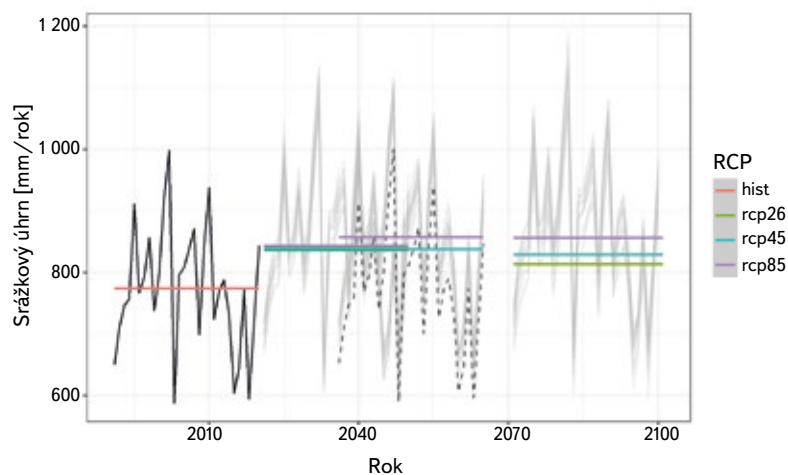
Tab. 1. Vybrané lokality a jejich základní charakteristiky
 Tab. 1. Selected sites and their basic characteristics

LAPV	Vodní tok	Plocha povodí [km ²]	Celkový ovladatelný prostor Vo [mil. m ³]	DBC ANLGN	Vodní tok ANLGN	Plocha ANLGN [km ²]	Období kalibrace	KGE
Amerika	Klabava	69,7	30,9	187500	Klabava	158,45	2002–2011	0,68
Čučice	Oslava	791	53	474000	Oslava	861,03	1961–2011	0,61
Dlouhá Loučka	Huntava	27	5,2	362000	Loučka	80,8	1961–2011	0,71
Dvorečky	Libava	45	30,75	206800	Libava	68,22	1961–1988	0,76
Hanušovice	Morava	217,2	135	345000	Morava	349,9	1961–2011	0,81
Hoštejn	Březná	126,5	166	353000	Březná	130,03	1961–2011	0,74
Hradiště	Černá	125,3	13	112500	Černá	133,24	1971–2011	0,65
Hrachov I	Brzina	132,6	10,5	153800	Brzina	133,24	1984–2011	0,73
Hrachov II	Brzina	115,5	6	153800	Brzina	133,24	1984–2011	0,73
Chaloupky	Rolava	20,1	36,5	209100	Rolava	20,1	1967–2011	0,69
Kladruby	Úhlavka	277,3	27,26	173000	Úhlavka	296,59	1961–2011	0,67
Pěčín	Zdobnice	72,2	17,1	027000	Zdobnice	84,3	1961–2011	0,76
Poutnov	Teplá	91,4	28,1	210900	Teplá	256,12	1961–2011	0,58
Rajnochovice (Košovy)	Juhyně	19,3	11,2	387500	Juhyně	20,24	1978–2011	0,78
Strážiště	Střela	629,8	78,01	190000	Střela	775,02	1961–2011	0,64
Šipín	Úterský potok	173,6	39,7	175000	Úterský potok	297,45	1961–2011	0,66
Vysočany	Želetavka	369,4	17,8	432000	Želetavka	367,69	1961–2011	0,69



Obr. 4. Teploty vzduchu na základě pozorování a dle jednotlivých GCM a emisních scénářů RCP (šedé linie popisují simulace jednotlivých klimatických modelů, barevné linie následně průměr simulací pro zvolený emisní scénář)

Fig. 4. Air temperatures according to observations, individual GCM and emission scenarios RCP (grey lines describe the simulations of individual climate models, coloured lines the mean of simulations for the selected emission scenario)



Obr. 5. Srážkové úhrny na základě pozorování a dle jednotlivých GCM a emisních scénářů RCP (šedé linie popisují simulace jednotlivých klimatických modelů, barevné linie následně průměr simulací pro zvolený emisní scénář)

Fig. 5. Precipitation according to observations, individual GCM and emission scenarios RCP (grey lines describe the simulations of individual climate models, coloured lines the mean of simulations for the selected emission scenario)

Modelování hydrologické bilance

K modelování hydrologické bilance byl použit konceptuální model BILAN, který je vyvíjen více než 15 let v oddělení hydrologie VÚV TGM. 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 [14–16]. Pro modelování hydrologické bilance byla použita měsíční verze modelu, jež je řízena osmi parametry. Model využívá lineárních a nelineárních nádrží, pomocí nichž se srážky transformují na odtok. Hlavní vstupy modelu tvoří srážky a teplota vzduchu (pro kalibraci také měřený odtok), výstupem je modelovaný odtok z povodí a ostatní složky hydrologické bilance.

Aby bylo možno posoudit vliv klimatické změny na budoucí výhledy, je třeba mít pro profily LAPV sestavený a nakalibrovaný hydrologický model, který umožní provádění variantních výpočtů podle scénářů změny klimatu. Jelikož pro povodí LAPV zpravidla neexistuje přímé pozorování průtoků, je třeba využít hydrologické analogie. Model BILAN se nakalibruje na analogon, jenž se s původním povodím překrývá, a výsledné parametry se tzv. přenesou na povodí LAPV. S využitím těchto parametrů a nových srážek a teplot, které jsou interpolovány přesně na povodí LAPV, je pak možno simulovat odtoky přímo pro profil potenciální nádrže. Obdobným postupem dochází k simulaci ovlivněných odtoků dle scénářů změny klimatu. Vstupy jsou v tomto případě tvořeny ovlivněnými srážkami a teplotami podle scénářů klimatické změny a již známými parametry modelu z předchozí kalibrace.

Kalibrace modelu byla prováděna na měsíčních datech získaných interpolací z pravidelného rastru (25 × 25 km) srážek a teplot pro ČR [18]. Období využitá ke kalibraci modelu na analogonu je uvedené v tab. 1, kromě LAPV Amerika dosahovala kalibrační perioda více než 20 let. Při kalibraci modelu byl kladen důraz na věrnější simulaci odtoků v oblasti nižších kvantilů. Míra shody pozorovaného a modelovaného odtoku byla sledována metrikou Kling-Gupta [19], jejíž hodnoty jsou uvedeny v tab. 1. Obecně se dá říci, že čím je hodnota blíže k 1, tím je shoda modelovaného a pozorovaného odtoku větší.

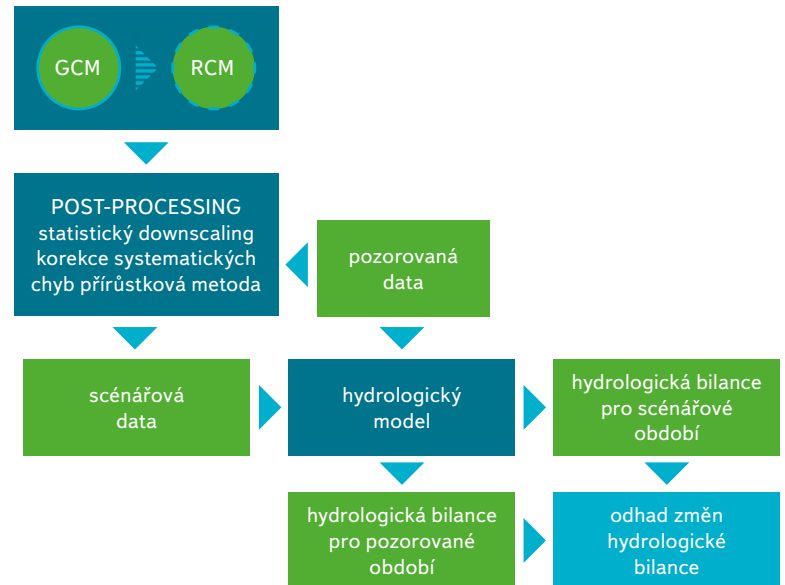
Hydrologické modelování změn klimatu

Postup modelování dopadu změny klimatu na hydrologický režim (obr. 6) 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.i.1.a) statistickým downscalingem,
 - (a.i.1.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 korigována v jednotlivých měsících pomocí kvantilové metody [17].



Obr. 6. Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu

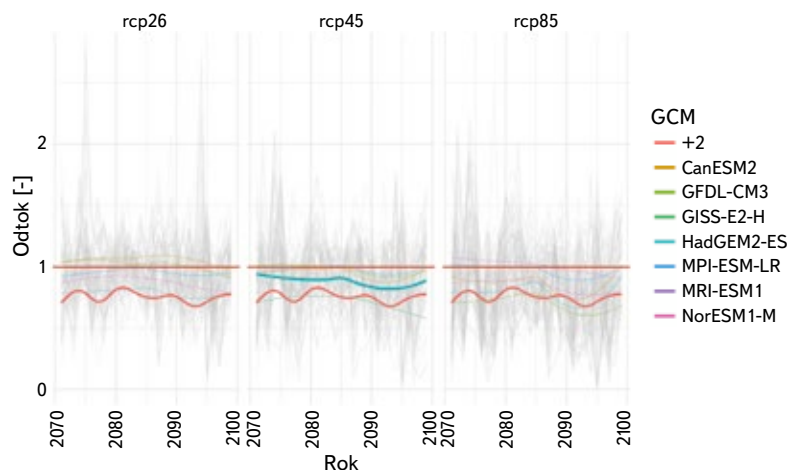
Fig. 6. Scheme of hydrological modeling of climate change impacts

Vodohospodářská bilance

Potenciální objem vody, který mohou vybrané lokality s danou zabezpečeností pro odběr vody či minimální průtok poskytovat, byl vyhodnocen pomocí simulačního modelu zásobní funkce vodohospodářské soustavy [20]. Simulace byla zpracována v měsíčním kroku v celkové délce 39 let (tj. 468 měsíců) pro časové řady neovlivněných průměrných měsíčních průtoků a výparu. Časové řady byly zpracovány výše uvedeným postupem modelování hydrologické bilance. Vyhodnoceny byly varianty reprezentující jak současné hydrologické podmínky (scénář „0“), tak scénáře dopadu klimatické změny: scénář HadGEM2 k referenčnímu roku 2050 a scénář oteplení o 2 °C (scénář „2“). Jako zásobní prostor byl uvažován celkový ovladatelný objem vodní nádrže uvedený v Generelu LAPV [1]. V tomto ohledu je nutné považovat výsledné hodnoty zabezpečených odběrů (resp. nadlepšených průtoků) za teoretické. I přes tuto skutečnost však výsledky dávají představu o možném dopadu scénářů klimatické změny na potenciální kapacitu posuzovaných lokalit. Kromě objemu vody, resp. nadlepšeného průtoku, jež mohou lokality s danou zabezpečeností zajistit, byly vyhodnoceny i další charakteristiky (viz dále).

VÝSLEDKY A DISKUZE

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 zabezpečenosti vodárenských odběrů zajišťovaných vodními nádržemi v těchto podmínkách. Na obr. 7 jsou uvedeny změny přirozených odtoků (scénář/současnost) pro jednotlivé simulace a emisní scénáře, v tomto případě pro období 2071–2100. Šedé linie jsou dílčí simulace pro dané lokality, barevné linie sumarizace pro jednotlivé klimatické



Obr. 7. Snížení odtoku z povodí potenciálních vodárenských nádrží (rcp26, rcp45 a rcp85 označují skupiny emisních scénářů, šedé linie popisují simulace jednotlivých klimatických modelů, silná červená linie scénář s oteplením +2 °C a tyrkysová vybraný scénář HadGEM2)

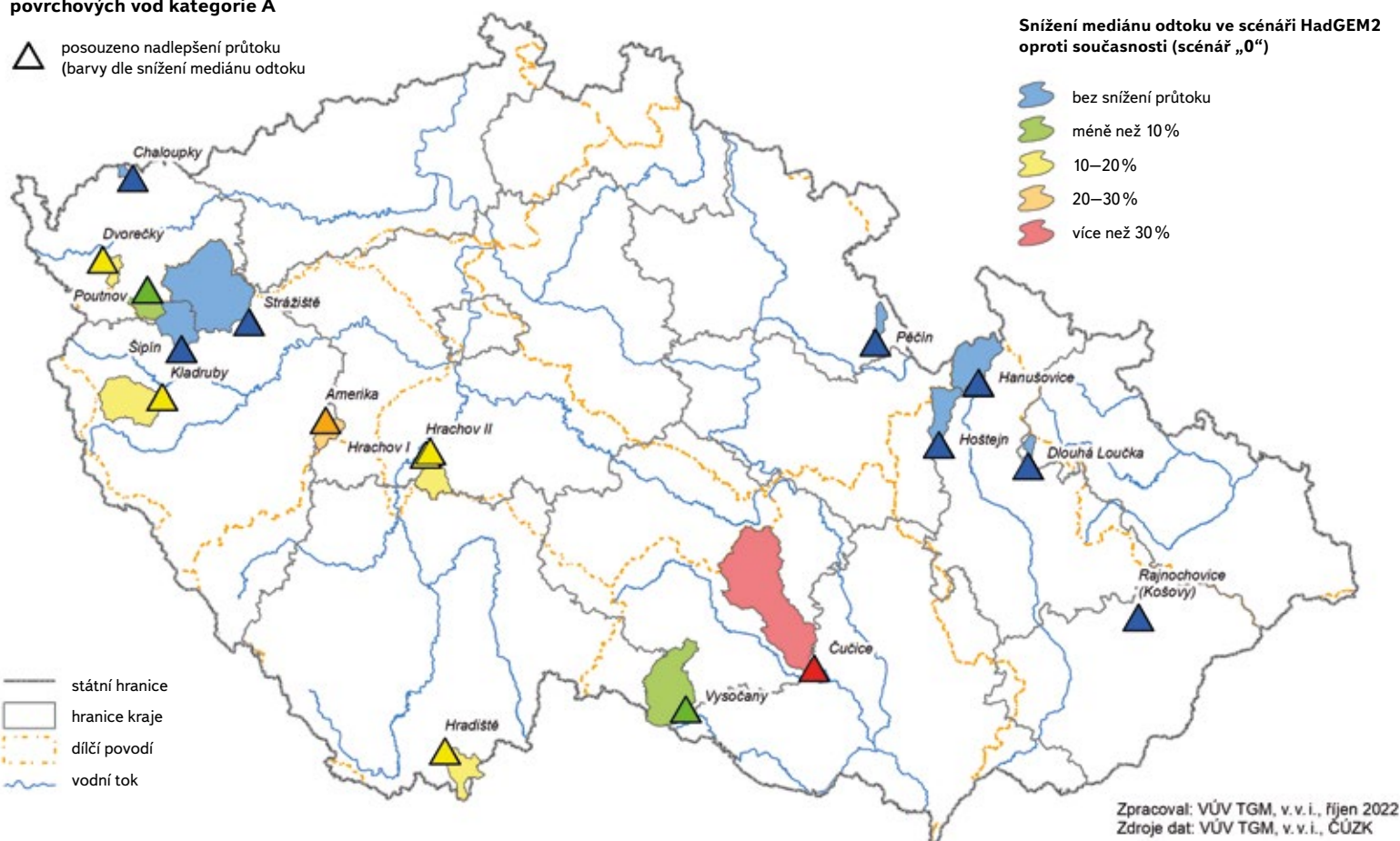
Fig. 7. Reduction of runoff from the catchment area of potential water reservoirs (rcp26, rcp45 and rcp85 indicate groups of emission scenarios, the grey lines describe the individual climate model simulations, the thick red line the +2 °C warming scenario and the thick turquoise line the selected HadGEM2 scenario)

modely, přičemž zvýrazněné linie (simulace) byly dále použity pro vodohospodářské vyhodnocení. Lze pozorovat významnou variabilitu změn, jež jsou dány především vstupními klimatickými daty a nejistotami v simulacích hydrologického modelu. Ten je kalibrován na základě dostupných vstupních dat, přičemž samotnými kalibračními strategiemi se zabývá celá řada studií a výzkumů. Snížení odtoku z povodí posuzovaných lokalit v důsledku klimatické změny ilustruje pro scénář HadGEM2 k referenčnímu roku 2050 rovněž obr. 8.

Pomocí simulace zásobní funkce vodohospodářských soustav byl pro jednotlivé LAPV a scénáře vyhodnocen rovnoměrný nadlepený průtok Q_n při zabezpečení podle trvání $p_t = 99,5\%$ [21]. Výsledky jsou uvedeny v tab. 2. Využití kapacity LAPV (resp. vyhodnoceného nadlepeného průtoky Q_n) pro odběr vody je limitováno potřebou zachování hodnot minimálních zůstatkových průtoků (MZP) pod vodními nádržemi. Orientační hodnota MZP byla vypočtena podle rovnice (1), kde Q_{10} představuje 90% kvantil z průměrných měsíčních průtoků. Rovnice byla odvozena z analýzy vztahu MZP vypočteného z denních průtoků a příslušného kvantilu průtoků měsíčních pro většinu vodoměrných stanic v ČR. Jako doplňující charakteristiky jsou v tab. 2 dále uvedeny hodnoty dlouhodobého průměrného průtoky Q_a (který je zde vypočítán jako aritmetický průměr z řady modelovaných průměrných měsíčních průtoků), koeficient nadlepení a vypočítaný podle rovnice (2), koeficient variace ročních průměrných průtoků C_v a standardizovaný přítok m vypočítaný podle rovnice (3). Podle [22] mají nádrže s $m \geq 1$ nebo $m \geq C_v$ sezonní charakter řízení, v opačném případě víceletý charakter řízení.

Území chráněná pro akumulaci povrchových vod kategorie A

△ posouzeno nadlepení průtoky (barvy dle snížení mediánu odtoku)



Povodí posuzovaných LAPV

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

- bez snížení průtoky
- méně než 10%
- 10–20%
- 20–30%
- více než 30%

Obr. 8. Snížení odtoku z povodí potenciálních vodárenských nádrží pro scénář HadGEM2

Fig. 8. Reduction of runoff from the catchment area of potential water reservoirs in the HadGEM2 scenario

Tab. 2. Potenciál nadlepšení průtoku
Tab. 2. Potential for flow enhancement

Lokalita Vodní tok	Scénář	Q_a [$m^3 \cdot s^{-1}$]	Q_n při $p_t = 99,5$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]	MZP [$m^3 \cdot s^{-1}$]	α	C_v	m
Amerika Klabava	0	0,592	0,479	0,065	0,81	0,41	0,46
	2	0,479	0,375	0,041	0,78	0,46	0,47
	HadGEM2	0,519	0,396	0,045	0,76	0,43	0,55
Čučice Oslava	0	2,872	1,389	0,249	0,48	0,48	1,07
	2	1,984	0,894	0,108	0,45	0,55	1
	HadGEM2	2,362	0,875	0,126	0,37	0,55	1,13
Dlouhá Loučka Huntava	0	0,271	0,211	0,05	0,78	0,23	0,97
	2	0,241	0,183	0,038	0,76	0,24	1,01
	HadGEM2	0,273	0,196	0,04	0,72	0,23	1,21
Dvorečky Libava	0	0,494	0,438	0,062	0,89	0,29	0,4
	2	0,419	0,371	0,043	0,89	0,32	0,36
	HadGEM2	0,45	0,381	0,044	0,85	0,35	0,45
Hanušovice Morava	0	3,729	3,463	1,087	0,93	0,21	0,35
	2	3,393	3,166	0,918	0,93	0,22	0,31
	HadGEM2	3,852	3,425	0,918	0,89	0,22	0,51
Hoštejn Břežná	0	1,569	1,522	0,238	0,97	0,23	0,13
	2	1,425	1,377	0,185	0,97	0,25	0,13
	HadGEM2	1,684	1,579	0,189	0,94	0,25	0,25
Hradiště Černá	0	1,448	0,875	0,423	0,6	0,32	1,23
	2	1,204	0,651	0,291	0,54	0,37	1,23
	HadGEM2	1,223	0,704	0,273	0,58	0,34	1,25
Hrachov I' Hrachov II Brzina	0	0,459	0,352	0,037	0,77	0,47	0,5
	2	0,328	0,247	0,023	0,75	0,58	0,43
	HadGEM2	0,395	0,285	0,025	0,72	0,52	0,54
Chaloupky Rolava	0	0,385	0,352	0,101	0,91	0,22	0,39
	2	0,347	0,32	0,071	0,92	0,23	0,35
	HadGEM2	0,376	0,346	0,071	0,92	0,24	0,33
Kladruby Úhlavka	0	1,345	0,866	0,191	0,64	0,36	1
	2	1,097	0,584	0,126	0,53	0,42	1,1
	HadGEM2	1,302	0,723	0,152	0,56	0,42	1,06
Pěčín Zdobnice	0	0,817	0,693	0,227	0,85	0,23	0,67
	2	0,744	0,647	0,171	0,87	0,25	0,53
	HadGEM2	0,781	0,618	0,137	0,79	0,25	0,84
Poutnov Teplá	0	0,703	0,594	0,104	0,84	0,28	0,55
	2	0,578	0,487	0,068	0,84	0,33	0,48
	HadGEM2	0,634	0,487	0,086	0,77	0,34	0,69
Rajnochovice (Košovy) Juhyně	0	0,239	0,202	0,047	0,84	0,29	0,54
	2	0,211	0,171	0,035	0,81	0,3	0,62
	HadGEM2	0,253	0,198	0,037	0,78	0,29	0,74
Strážičtě Střela	0	2,899	2,188	0,527	0,75	0,33	0,75
	2	2,379	1,697	0,402	0,71	0,38	0,76
	HadGEM2	2,84	2,036	0,472	0,72	0,36	0,79
Šipín Úterský potok	0	0,905	0,784	0,107	0,87	0,34	0,4
	2	0,748	0,622	0,074	0,83	0,38	0,44
	HadGEM2	0,971	0,772	0,106	0,8	0,35	0,59
Vysočany² Želetavka	0	1,212	0,250	0,205	–	0,45	–
	2	0,927	0,200	0,147	–	0,49	–
	HadGEM2	1,168	0,200	0,219	–	0,47	–

¹ Řešeno jako soustava Hrachov I – Hrachov II.

² Řešeno jako soustava Vysočany – Vranov – Znojmo. Hodnota Q_n představuje přidáný potenciál nadlepšení ke stávající soustavě Vranov – Znojmo.

$$MZP = 0,73 * Q_{10} \quad (1)$$

$$a = \frac{Q_n}{Q_o} \quad (2)$$

$$m = \frac{(1-a)}{Cv} \quad (3)$$

Z výsledků je porovnáním hodnot nadlepšení průtoku Q_n u scénářů klimatické změny a současných podmínek (scénář „0“) vyhodnoceno výraznější snížení potenciálu LAPV k zajištění odběrů vody zejména u lokalit Čučice (přes 30 % u obou scénářů), Kladruby, Hradiště, Hrachov I a Hrachov II. Naopak poměrně nízké snížení (do 10 %) potenciálu k zajištění odběrů vody bylo vyhodnoceno u lokalit Hoštejn, Hanušovice, Chaloupky a Pěčín.

Lokalita Vysočany byla vzhledem ke své poloze na přítoku Želetavky do vodní nádrže Vranov posouzena v soustavě vodních nádrží Vysočany – Vranov – Znojmo. Hodnoty Q_n v tab. 2 proto pro tuto lokalitu uvádějí přidání potenciál nadlepšení ke stávající soustavě Vranov – Znojmo. Vzhledem k celkové kapacitě vodní nádrže Vranov (v současných podmínkách nadlepšení při $p_t = 99,5$ % přesahuje $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je přidání efektu lokality Vysočany poměrně nízký. Vodní nádrž Vranov je víceúčelová a současné vodárenské odběry ze soustavy Vranov – Znojmo tvoří menší podíl z celkových požadavků kladených na její zásobní funkci. Jako soustava byly rovněž řešeny vodní nádrže Hrachov I a Hrachov II na Brzině.

V rámci vodohospodářského řešení nádrží byl jako zásobní prostor uvažován celý potenciální objem nádrže uvedený v Generelu LAPV [1]. V tomto ohledu je nutné brát výsledné hodnoty zabezpečených odběrů (resp. nadlepšených průtoků) za teoretické. Nebyl uvažován např. objem stálého nadržení, jehož hodnoty nejsou v současnosti k dispozici. Nadlepšené průtoky tak budou reálné nižší. Avšak i přes tuto skutečnost dávají výsledky dobrou představu o možném dopadu scénářů klimatické změny na potenciální kapacitu posuzovaných lokalit.

ZÁVĚR

Cílem výše popsaného řešení bylo vyhodnotit možné dopady klimatické změny na kapacity území chráněných pro akumulaci povrchových vod (LAPV). S ohledem na značné nejistoty v predikci scénářů klimatické změny bylo zvoleno variantní řešení: posouzen byl scénář klimatické změny HadGEM2 k referenčnímu roku 2050 a (méně příznivý) scénář oteplení současného klimatu o $2 \text{ }^\circ\text{C}$. Vyhodnocení bylo zpracováno pro 17 lokalit uvažovaných k zajištění vodárenských odběrů a nacházejících se z hlediska zásobování pitnou vodou v blízkosti potenciálně problémových oblastí. Při posouzení kapacit LAPV byly aplikovány postupy modelování hydrologické a vodohospodářské bilance. Výsledky řešení jsou uvedeny v tab. 2 výše. Výraznější snížení kapacity k zajištění odběrů vody v důsledku klimatické změny bylo vyhodnoceno zejména u lokalit Čučice, Kladruby, Hradiště, Hrachov I a Hrachov II. Naopak poměrně nízké snížení kapacity bylo zjištěno u lokalit Hoštejn, Hanušovice, Chaloupky a Pěčín. S výjimkou lokalit Čučice a Kladruby nepřesáhlo snížení kapacity oproti současným podmínkám u žádné lokality 30 %. Výsledky v podobě variantních scénářů tedy upozorňují na možné snížení nadlepšeného odtoku a zvýšení koeficientu variace, který je ukazatelem rozkolísanosti hydrologického režimu. Pro rozhodnutí, zda by daná nádrž deficitnímu regionu mohla pomoci, je zapotřebí detailnější studie oblastí, včetně případných převodů vody, výhledových potřeb vody apod.

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu V120192022159 „Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou“ programu BV III/1-VS, který financuje Ministerstvo vnitra ČR.

Literatura

- [1] MZe a MŽP. *Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod a základní zásady využití těchto území*. Praha, srpen 2020.
- [2] HANEL, M., KAŠPÁREK, L., MRKVIČKOVÁ, M. a kol. *Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2011. 108 s.
- [3] HORÁČEK, S. a kol. *Možnosti zmírnění současných důsledků klimatické změny zlepšením akumulační schopnosti v povodí Rakovnického potoka (pilotní projekt)*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., 2012. 150 s.
- [4] BERAN, A., HANEL, M., NESLÁDKOVÁ, M., VIZINA, A., VYSKOČ, P., KOŽÍN, R. *Climate Change Impacts on Water Balance in Western Bohemia and Options for Adaptation*. *Water Supply*. 1 February 2019, 19(1), s. 323–335. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2018.080>
- [5] VIZINA, A., VYSKOČ, P., PELÁKOVÁ, M., BERAN, A., KOŽÍN, R., PICEK, J. *Zabezpečení odběrů vody z vodárenských nádrží v podmínkách klimatické změny*. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2021, 63(3), s. 4–18. ISSN 0322-8916.
- [6] KOŽÍN, R., HANEL, M., KAŠPÁREK, L., PELÁKOVÁ, M., VIZINA, A., TREML, P. *Možnosti zmírnění dopadů změny klimatu využitím území chráněných pro akumulaci povrchových vod*. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2015, 57(4–5), s. 11–16. ISSN 0322-8916.
- [7] HANEL, M., KAŠPÁREK, L., PELÁKOVÁ, M., BERAN, A., VIZINA, A. *Evaluation of Changes in Deficit Volumes: Support for Protection of Localities Suitable for Construction of Reservoirs. Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management*, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly. 2013.
- [8] PRCHALOVÁ, H., VYSKOČ, P., VIZINA, A., NOVÁKOVÁ, H. *Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny*. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(5), s. 22–31. ISSN 0322-8916.
- [9] BERAN, A. a kol. *Metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2019. Certifikovaná metodika MZe. ISBN 978-80-87402-70-2.
- [10] *Plán rozvoje vodovodů a kanalizací území České republiky. Revize funkčnosti propojení a zajištění potenciálních možností nových propojení vodárenských soustav v období sucha. A.1.1. Zprávy jednotlivých krajů (2. etapa). Revize 1*. Zpracoval Sweco Hydroprojekt a. s. pro Ministerstvo zemědělství, 12/2020.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] VIZINA, A., HANEL, M. a kol. *Střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v České republice. Zprávy pro státní podniky povodí*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2019.
- [14] TALLAKSEN, L. M., VAN LANEN, H. A. (eds.). *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. 2004.
- [15] VIZINA, A., HORÁČEK, S., HANEL, M. *Recent Developments of the BILAN Model*. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2015, 57(4–5), s. 7–10.
- [16] 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.
- [17] 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), s. 3383–3390.
- [18] ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., HUTH, R. *Interpolation Techniques Used for Data Quality Control and Calculation of Technical Series: An Example of a Central European Daily Time Series*. *IDŐJÁRÁS – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. 2011, 115(1–2), s. 87–98.
- [19] KLING, H., FUCHS, M., PAULIN, M. *Runoff Conditions in the Upper Danube Basin under an Ensemble of Climate Change Scenarios*. *Journal of Hydrology*. 2012, 244, s. 264–277. Dostupné z: doi: [10.1016/j.jhydrol.2012.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011)
- [20] PICEK, J., VYSKOČ, P., ZEMAN, V. *Simulační model množství povrchových vod: zásobní funkce vodohospodářské soustavy*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2008.
- [21] ČSN 75 2405. 2004. *Vodohospodářská řešení vodních nádrží*.
- [22] VOGEL, R. M., BOLOGNESE, R. A. *Storage-Reliability-Resilience-Yield Relations for Over-Year Water Supply Systems*. *Water Resources Research*. 1995, 31, s. 645–654.

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. Roman Kožín

✉ roman.kozin@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5773-6567

Ing. Hana Nováková, Ph.D.

hana.novakova@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5946-4796

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2022.11.004

POTENTIAL OF PROTECTED AREAS FOR SURFACE WATER STORAGE TO MITIGATE THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON DRINKING WATER SUPPLY

VIZINA, A.; VYSKOČ, P.; KOŽÍN, R.; NOVÁKOVÁ, H.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

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

In the Czech Republic, areas morphologically, geologically and hydrologically suitable for surface water accumulation to mitigate the adverse effects of floods and droughts are defined through the General Plan of Areas Protected for Surface Water Accumulation. In the context of climate change, these sites create potential for possible adaptation measures. The paper assesses the potential of selected sites for water supply under climate change conditions by means of hydrological and water balance modelling.

