

Simulace teplotního režimu vodárenské nádrže v podmínkách uvažovaných klimatických změn

ALEŠ HAVLÍK, ADAM VIZINA, BARBORA KRIJT

Klíčová slova: teplotní profil – teplota vody – klimatická změna – kvalita vody – vodárenská nádrž

ABSTRAKT

Článek se zabývá problematikou možného ovlivnění teplotního režimu vodárenské nádrže v důsledku uvažovaných klimatických změn.

Metodika řešení byla založena na simulování teplotních změn ve vodárenské nádrži pomocí dvourozměrného (2D) softwarového prostředí CE-QUAL-W2, který obsahuje matematický model pro hydrodynamickou simulaci 2D proudění a řešení kvality vody v nádržích. Jeho hydrodynamická část je založena na vodorovném zprůměrování v příčném směru trojrozměrných pohybových rovnic. Simulace modelování teplotního režimu a kvality vody je numericky řešena pomocí turbulentní advekční difuzní rovnice. Celková výměna tepla mezi vodou a atmosférou je kvantifikována na základě průběhu teplot vzduchu, teplot rosného bodu, absolutní vlhkosti, rychlosti větru, oblačnosti a geografické polohy hladiny nádrže.

Posouzení možného ovlivnění teplotního režimu bylo řešeno na příkladu vodárenské nádrže Vrchlice. Kalibrace modelu byla provedena pro rok 2023 s využitím podrobných měření průběhu teploty vody po výšce ve vybraných svislicích zpracovaných správcem toku Povodím Labe, s. p.; následná verifikace byla provedena pro rok 2022. Pro porovnání ovlivněného režimu se stávajícím stavem byl jako referenční zvolen rok 2018. Pozorovaná denní řada teploty vzduchu z roku 2018 byla metodou Advanced Delta Change (ADC) transformována tak, aby odpovídala změnám odvozeným z klimatických modelů pro horizonty 2050 a 2085. Scénářové výpočty prezentované v tomto článku izolují vliv změny teploty vzduchu, ostatní meteorologické a hydrologicko-provozní vstupy jsou ponechány na referenční úrovni roku 2018.

Výsledkem je porovnání průměrných teplot vody v charakteristických svislicích pro vybrané scénáře klimatických změn postupně pro roky 2050 a 2085 s průběhem hodnot pro rok 2018, obdobně pak pro teplotu vody na hladině.

ÚVOD

Problematika možného ovlivnění teplotního režimu vodárenské nádrže byla řešena v rámci projektu TA ČR „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“ na Fakultě stavební ČVUT v letech 2020–2026. Na počátku řešení projektu bylo jako pilotní povodí zvoleno povodí řeky Vrchlice, kde se nachází i stejnojmenná vodárenská nádrž. Možné

ovlivnění teplotního režimu vodárenské nádrže bylo proto zpracováno právě na příkladu této nádrže.

Jezera a nádrže v celosvětovém měřítku reagují na změnu klimatu růstem teploty vody, změnami délky a intenzity teplotní stratifikace, změnami mísicích režimů a v některých případech také zhoršováním kyslíkových poměrů. Modelové projekce teplotní struktury nádrží proto představují důležitý podklad nejen pro posouzení jejich fyzikálního režimu, ale také pro navazující hodnocení kvality vody a biogeochemických procesů.

Cílem studie je kvantifikovat, jak se může změnit teplotní režim VD Vrchlice v blízkosti hráze a na hladině při klimatických podmínkách reprezentujících horizonty 2050 a 2085 a scénáře SSP2-4.5 a SSP5-8.5, a porovnat tyto změny s referenčním rokem 2018. Studie řeší tři otázky: (i) jak se mění průměrná a povrchová teplota vody, (ii) jak se odezva liší mezi klimatickými scénáři a horizonty a (iii) jaká omezení je nutné zohlednit při interpretaci výsledků pro vodohospodářskou praxi. Vrchlice byla zvolena jako pilotní lokalita projektu a současně jako vodárenská nádrž s dostupnými svislicovými měřeními a provozními údaji. Praktickým přínosem je získání podkladu pro posouzení možných budoucích změn teplotních poměrů v prostoru vodárenských odběrů a pro navazující hodnocení provozu nádrže a kvality vody; metodickým přínosem je aplikace laterálně zprůměrovaného 2D modelu na konkrétní českou vodárenskou nádrž s využitím souboru klimatických scénářů.

METODIKA

Teoretický rozbor

Souhrnné porovnání nádržových modelů uvádí, že CE-QUAL-W2 umožňuje společně simulovat úroveň hladiny, proudění, teplotu vody a vybrané ukazatele její kvality, přičemž volba modelu musí odpovídat geometrii nádrže a dominantním fyzikálním procesům [11]. Problematikou změn teplotního režimu nádrží v podmínkách klimatické změny se zabývala např. práce [4]. Publikace Golub et al. [5] výslovně propojuje projekce teploty a teplotní struktury jezer s budoucím modelováním kyslíku, kvality vody, biogeochemie a vodních květů. Integrovanému modelování systému řeka – nádrž a významu propojení hydrodynamiky, jakosti vody a provozu nádrže se věnovali Ferreira a Fernandes [7]. Vyšší teplota a změny hydrologických extrémů mohou současně ovlivňovat mobilizaci živin, zákal, koncentrace rozpuštěných látek a další ukazatele kvality vody [6]. Starší případové studie navrhovaných nádrží rovněž ukazují, že spojení monitoringu, modelování látkového zatížení a modelování odezvy nádrže může být využito pro prognózu budoucího trofického stavu a pro podporu rozhodování [15.]

Pro simulace vývoje teplotního režimu vodárenských nádrží v podmínkách uvažovaných klimatických změn byl zvolen softwarový prostředek CE-QUAL-W2. Ten je tvořen modelem pro hydrodynamickou simulaci 2D proudění a řešení kvality vody v nádržích vyvinutým Department of Civil and Environmental Engineering Portland State University. Model je jako free software nabízen k volnému užívání [1], [2]. Přehledu monitorování a modelování kvality vody v nádržích, včetně možností a omezení softwaru CE-QUAL-W2 se věnovali Talebbeydokhti et al. [11].

V českém prostředí se hydrodynamickému a jakostnímu modelování vodárenských nádrží dlouhodobě věnuje také výzkumný tým Hydrobiologického ústavu Biologického centra AV ČR s účastí J. Hejzlara. Pro vodárenskou nádrž Římov byl model CE-QUAL-W2 použit k dvourozměrnému modelování hydrodynamiky a kvality vody [8]. Navazující práce se zabývala také možnými dopady změny klimatu na kvalitu vody v nádrži [9].

Teplotní režim hlubších vodárenských nádrží má výrazný sezónní charakter: během teplé části roku se může vytvářet stabilní stratifikace s teplejší povrchovou vrstvou a chladnějším hypolimniem, zatímco v období promíchávání se teplotní rozdíly ve vodním sloupci zmenšují. Pro vodárenskou praxi je významná zejména teplota v úrovni odběru, protože společně se stratifikací a kyslíkovými poměry ovlivňuje volbu odběrové etáže a může souviset s jakostí surové vody. Pro ekologické hodnocení je teplotní režim důležitý také vazbou na rychlost biologických a biogeochemických procesů [5, 8, 9].

Příprava klimatických vstupů byla založena na přírůstkové metodě Advanced Delta Change (ADC), která transformuje pozorované řady tak, aby rozdíl mezi referenční a budoucí řadou odpovídal změnám odvozeným z klimatických modelů [13]. V denním kroku je důležité, aby transformace nezachycovala pouze změnu průměru, ale také změnu variability. To je podstatné zejména pro srážky a extrémní hodnoty, jejichž změna nemusí odpovídat prostému posunu průměrné hodnoty. U teploty vzduchu je transformace provedena lineárně, takže systematická chyba klimatického modelu nemá na výslednou teplotní změnu stejný význam jako u srážek [13]. Výstupem jsou denní řady průměrné teploty vzduchu a dalších hydroklimatologických veličin použitelné pro navazující hydrologické a vodohospodářské modelování. Pro teplotu vzduchu použitou v této studii transformace zachovává časovou strukturu referenčního roku a přenáší na ni změnu průměru a variability odvozenou pro daný klimatický model, scénář a časový horizont. Problematikou adaptivního řízení nádrží během hydrologického sucha se zabývali Fošumpaur a Kováčová [3].

Software CE-QUAL-W2

Řídící rovnice jsou laterálně a vrstevně zprůměrovány. Laterální zprůměrování předpokládá, že laterální změny rychlostí, teplot a i dalších ukazatelů jakosti vody jsou zanedbatelné. Je třeba si uvědomit, že tento předpoklad může být nevhodný pro velké vodní útvary vykazující významné laterální změny kvality vody.

Základem řešení jsou řídicí rovnice. Hydrodynamickou část tvoří laterálně zprůměrovaná rovnice hybnosti v podélném směru, hydrostatická rovnice ve svislém směru a rovnice kontinuity. Model CE-QUAL-W2 používá hydrostatickou aproximaci: vzhledem k výrazně většímu podélnému než svislému rozměru nádrže se ve svislé rovnici hybnosti zanedbávají svislá zrychlení a smyková napětí. Svislá složka rychlosti však není nulová; uplatňuje se v advekčním členu podélné rovnice hybnosti a v rovnici kontinuity.

Pro vodorovnou podélnou osu a při zanedbání podélného gradientu atmosférického tlaku mají rovnice hybnosti v podélném směru (1) a hydrostatická rovnice ve svislém směru (2) tvar:

$$\frac{\partial \overline{u_x}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_x} \overline{u_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u_x} \overline{u_z}}{\partial x} = g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \cdot \int_h^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (1)$$

$$g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

kde:

x, z jsou souřadnice v podélném a svislém směru [m]

$\overline{u_x}$ příčně zprůměrované podélné složky rychlosti [$m \cdot s^{-1}$]

$\overline{u_z}$ příčně zprůměrované svislé složky rychlosti [$m \cdot s^{-1}$]

t je čas [s]

g tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

ρ hustota [$kg \cdot m^{-3}$]

p tlak

H úroveň hladiny [m]

τ_{xx}, τ_{xz} jsou turbulentní tečná napětí působící v podélném směru [Pa]

Integrační meze nabíhají hodnoty od úrovně z až po hladinu $z = h$. Podmínkou užití takto sestavených řídicích rovnic je, že příčné složky rychlostí jsou zanedbatelné oproti složkám podélným a svislým. Proto se je doporučuje používat pro úzké a hluboké nádrže, rovněž se doporučuje její převážně přímý směr.

Volba 2D laterálně zprůměrovaného modelu byla pro VD Vrchlice založena na podélném charakteru nádrže. Délka vzdutí dosahuje při maximálních průtocích přibližně 4,8 km, zatímco průměrná šířka dna je v sestaveném modelu přibližně 200 m a maximální šířka dna 476 m; výška hráze nad terénem je téměř 34 m. Z hlediska měřítka nádrže lze proto očekávat, že pro hodnocení podélně-svislé teplotní struktury jsou dominantní gradienty ve směru osy x a ve svislici. Tento předpoklad však neznamená, že laterální nehomogenity jsou zanedbatelné za všech situací. Nejistotu mohou zvyšovat zejména lokální vlivy bočních zátok a přítoků, prostorově proměnlivý účinek větru a podmínky v bezprostředním okolí odběrných objektů. Výsledky proto představují laterálně zprůměrovaný obraz teplotního režimu a nemají být interpretovány jako náhrada plně trojrozměrného popisu lokálních proudových a teplotních struktur [1, 2].

Pro rovnici kontinuity (3) platí:

$$\frac{\partial \overline{u_x}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_z}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Řídicí difuzní rovnice pro modelování teploty a kvality vody je [10]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_x} \phi}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u_z} \phi}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[D_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] = 0 \quad (4)$$

kde:

ϕ je teplota vody [$^{\circ}\text{C}$]

D_x, D_z jsou koeficienty podélné a svislé disperze [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Z hlediska vnějších vlivů je teplotní režim nádrže dominantně ovlivněn výměnou tepla mezi hladinou a atmosférou. Ten je tvořen celou řadou složek, pro celkový tepelný tok platí rovnice (5):

$$q_H = q_1 + q_2 + q_3 - q_4 - q_5 \quad (5)$$

kde:

q_H je celkový tepelný tok mezi hladinou a atmosférou [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

q_1 přijatý tepelný tok od krátkovlnného slunečního záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

q_2 přijatý tepelný tok od dlouhovlnného záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

q_3 tepelný tok konvekcí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

q_4 ztráta tepla dlouhovlnným vyzařováním z hladiny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

q_5 tepelný tok od ztráty tepla výparem [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Zatímco veličiny q_1 a q_2 jsou na teplotě nezávislé, zbývající členy jsou funkcí teploty vody na hladině a teploty vzduchu. K jejich stanovení je k dispozici řada známých a ověřených empirických rovnic.

Simulacemi kvality vody v nádržích modelem CE-QUAL-W2 se zabývaly např. práce [8, 10 a 16].

Data pro řešení

Řešení modelu vychází z podélného rozdělení nádrže na sebe navazující segmenty. Každý je definován délkou ve směru osy nádrže, pro každý jsou pak z digitálního modelu dna odvozeny šířky ve zvolených výškových úrovních. Ke stanovení jednotlivých členů rovnice (5) vyžaduje model zadání geografického umístění nádrže a dále časový průběh teplot vzduchu, teploty rosného bodu, rychlosti a směru větru a oblačnosti během řešené epizody [1, 2].

V prezentovaných scénářových výpočtech byla změna klimatu aplikována pouze na teplotu vzduchu. Teplota rosného bodu, rychlost a směr větru a oblačnost byly ponechány ve scénářových bázích shodné s referenční meteorologickou řadou roku 2018. Tím je záměrně izolován vliv změny teploty vzduchu; současně jde o zjednodušení, protože budoucí změny ostatních meteorologických veličin nejsou v této studii zahrnuty.

Okrajovými podmínkami jsou pak časové průběhy přítoku a odtoku vody, teploty vody na přítoku, počátečními podmínkami pak počáteční úroveň hladiny a teploty vody v nádrži.

Simulacemi kvality vody v nádržích modelem CE-QUAL-W2 se zabývaly např. práce [8, 10, 16], problematikou teplotního režimu v podmínkách uvažovaných klimatických změn [4, 9].

Sestavený model a jeho kalibrace

Základem vytvořeného modelu VD Vrchlice byl Bathymetry file, který definuje geometrický model nádrže. Ten byl tvořen celkem 41 segmenty s proměnlivou délkou ve směru osy nádrže, podélný rozměr segmentů byl řádově 100 m. Proměnlivé šířky jednotlivých vrstev byly po výšce vodního sloupce odvozeny pro každý celý 1 m výškového systému Balt po vyrovnání. Ukázka umístění os výpočetních segmentů je na *obr. 1* vyznačena červenou barvou. Maximální šířky dna se pohybovaly od 55 m v segmentu 1 až po 476 m v segmentu 39, v průměru pro celou nádrž pak 200 m.

Kalibrace 2D modelu byla zpracována pro rok 2023, kdy byly provedeny numerické simulace vývoje teplotního režimu nádrže Vrchlice s využitím meteorologických dat ze stanice ČHMÚ Chotusice, Vavřinec a jejich průměrných hodnot (průměrné denní hodnoty). Stanice Chotusice se nachází 12 km východně od nádrže Vrchlice u vojenského letiště Čáslav, stanice Vavřinec 14 km západně blízko obce Uhlířské Janovice. Časový průběh přítoku vody do nádrže byl dopočítán z časových průběhů odtoku vody a úrovně hladiny v nádrži. Pro neznámou hodnotu teploty vody na přítoku byl odhadnut typický roční průběh s využitím měření teploty vody ve svislici 1 na počátku vzdutí nádrže.

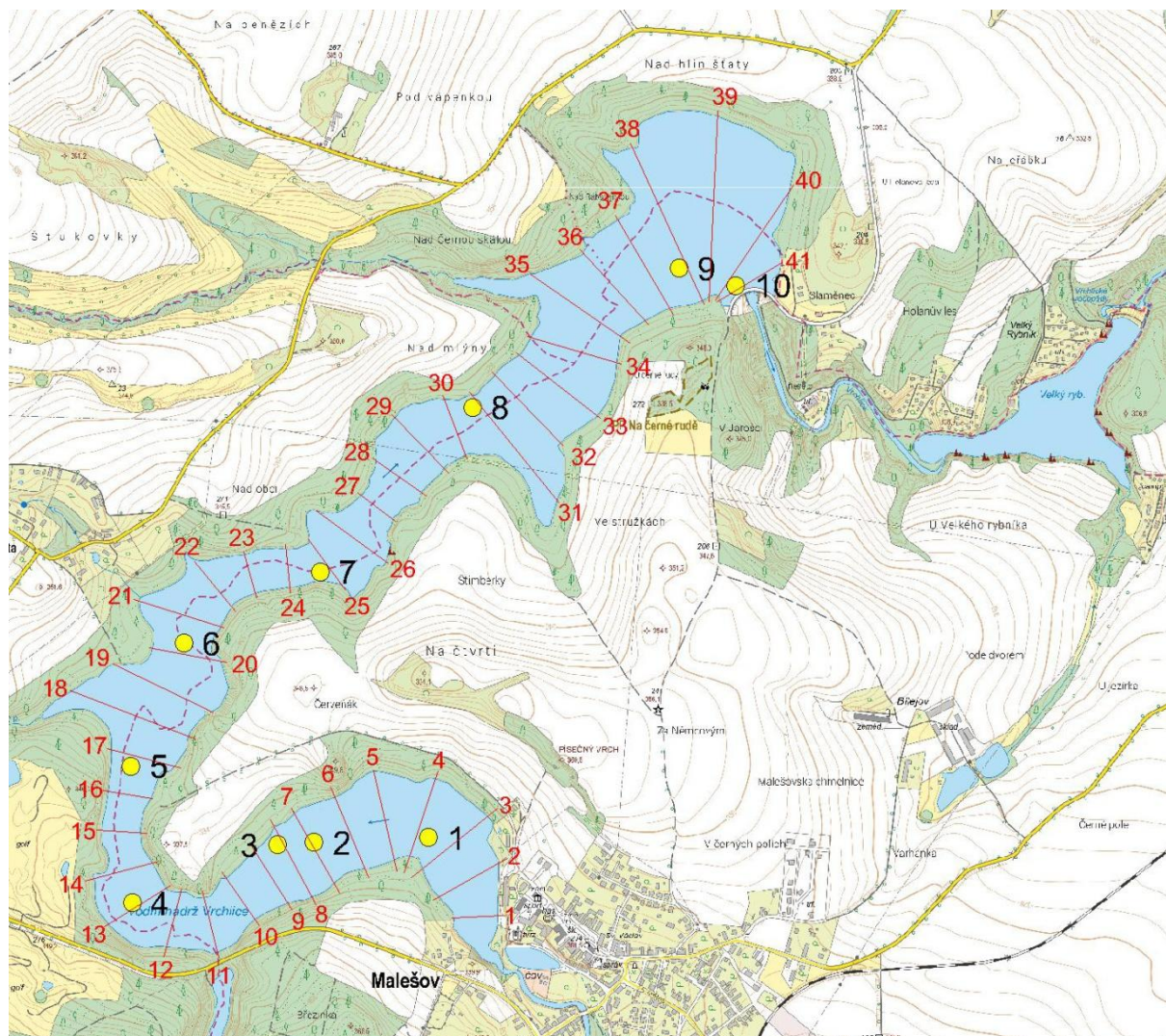
Hydrologický vstup byl v prezentované aplikaci vyjádřen souhrnným přítokem dopočteným z bilanční vazby mezi odtokem a změnou zásoby vody v nádrži. Jednotlivé dílčí přítoky proto nejsou v tomto článku hodnoceny samostatně a jejich případná prostorová teplotní heterogenita představuje jedno z omezení modelového zjednodušení. Odtoková podmínka vycházela z provozních údajů; v hodnocených letech byl podle správce využíván horní ze tří etážových odběrů, což bylo v modelu zohledněno. Vliv alternativní volby odběrové etáže nebyl součástí zde prezentovaných scénářů.

Kalibrační krok byl zpracován pro rok 2023. Porovnávány byly varianty meteorologického vstupu ze stanic Chotusice, Vavřinec a jejich průměru; shoda byla posuzována podle vertikálních teplotních profilů ve svislicích 8 a 9 a podle rozdílu jejich průměrných teplot. Nejlepší shody bylo dosaženo při použití dat ze stanice Chotusice. Na *obr. 2 až 5* jsou jako reprezentativní ukázky uvedena porovnání pro 17. duben 2023, kdy již byla vytvořena letní stratifikace, a pro 28. 8. 2023 při plně vyvinuté letní stratifikaci.

V parametrech, pro které nebyla k dispozici samostatná lokálně specifická kalibrační data, bylo ponecháno základní nastavení vycházející ze vzorových konfigurací CE-QUAL-W2. V rámci této studie nebyla provedena komplexní vícekritériální optimalizace všech modelových parametrů ani samostatná citlivostní analýza stínění účinku větru, reliéfového stínění slunečního záření a parametrizace výparu. Tyto skutečnosti jsou proto dále zohledněny jako zdroj nejistoty výsledků.

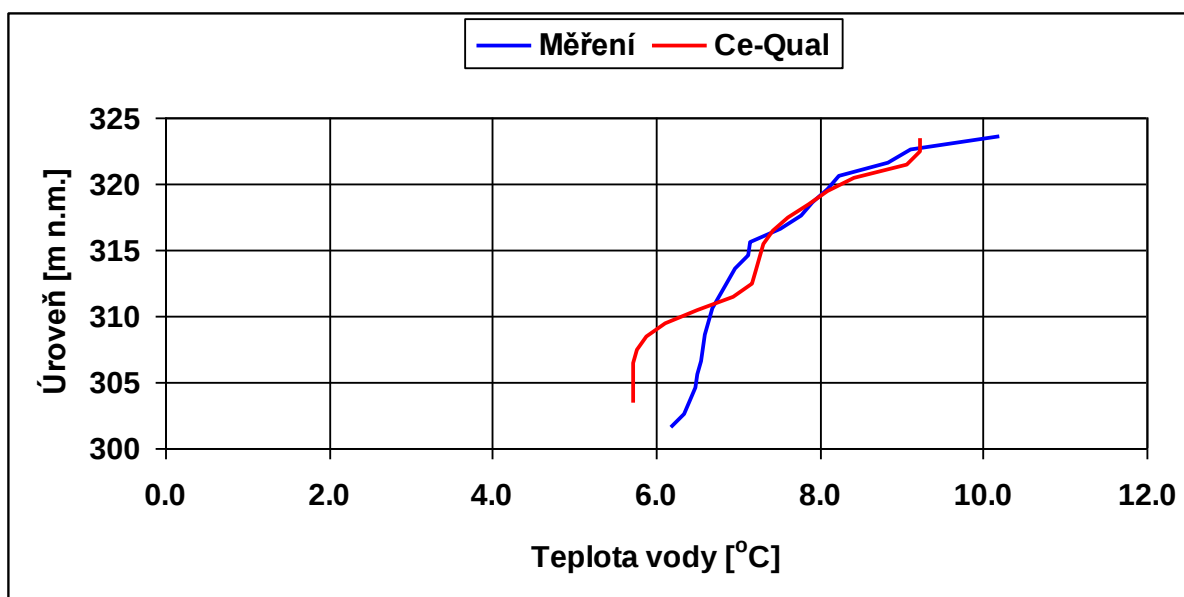
Následná verifikace byla provedena pro rok 2022 se stejným nastavením modelu. Dosažená shoda vertikálních teplotních profilů byla srovnatelná s kalibračním rokem 2023. Standardní kvantitativní metriky typu RMSE nebo MAE však nebyly v rámci dostupného vyhodnocení stanoveny; výsledky kalibrace a verifikace je proto nutné chápat jako kvalitativní až semikvantitativní ověření shody profilů.

Měření z roku 2024 byla řešitelům k dispozici v rámci širšího projektu, nebyla však zahrnuta do zde prezentované kalibrační a verifikační sady. Jejich využití spolu s dalšími termíny měření představuje vhodný krok pro navazující nezávislou validaci a kvantitativní vyhodnocení modelu.



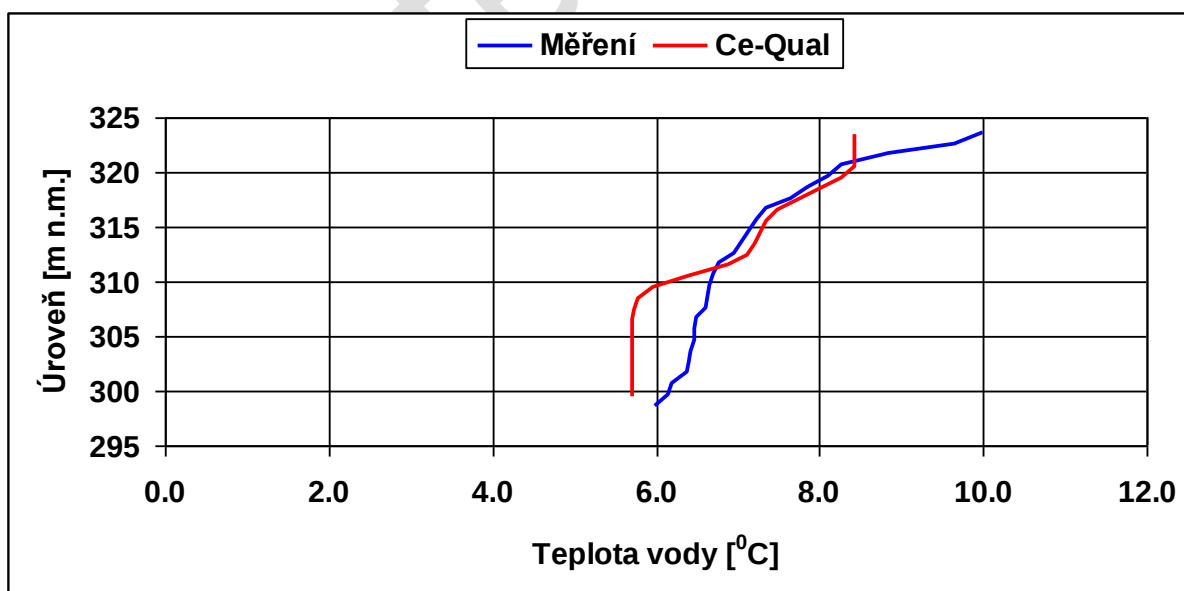
Obr. 1. Poloha vodárenské nádrže Vrchlice na stejnojmenné říčce jižně od Kutné Hory s vyznačením svislic pro měření teploty vody a dalších veličin kvality vody a os výpočetních segmentů

Fig. 1. Location of the Vrchlice Reservoir on the Vrchlice river, south of Kutná Hora, showing the vertical monitoring profiles used for measuring water temperature and positions of calculation segments



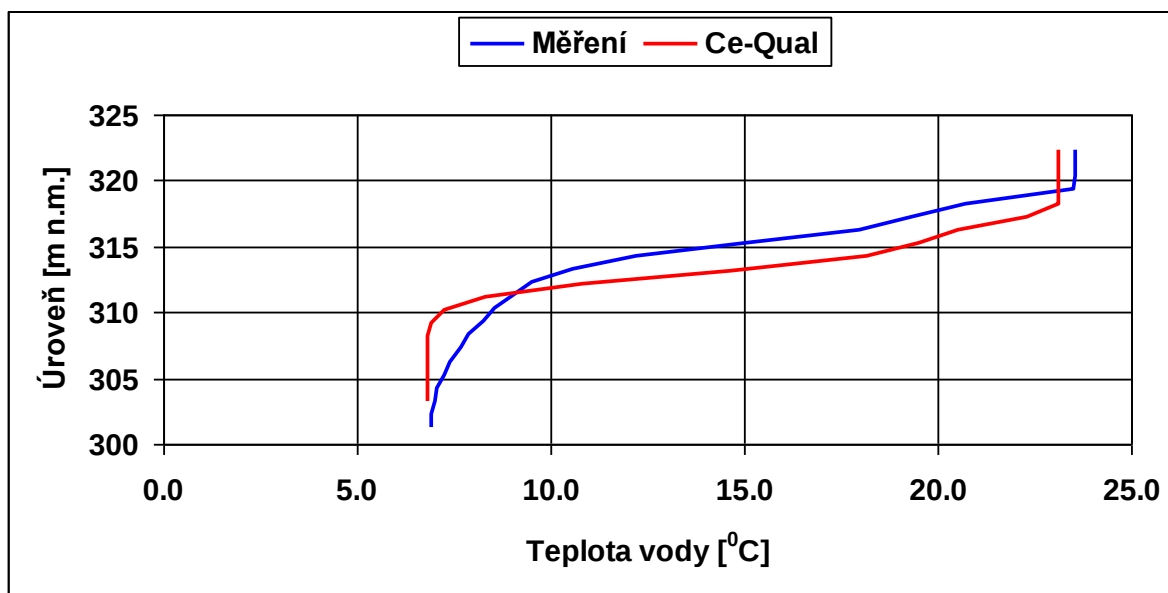
Obr. 2. Porovnání průběhů teplot vody ve svislici 8 pro 17. duben 2023 dle měření Povodí Labe a simulace modelem CE-QUAL-W2

Fig. 2. Comparison of measured and simulated water temperature profiles at Vertical Profile 8 on 17 April 2023, based on measurements provided by Elbe River Basin and simulations performed using the CE-QUAL-W2 model



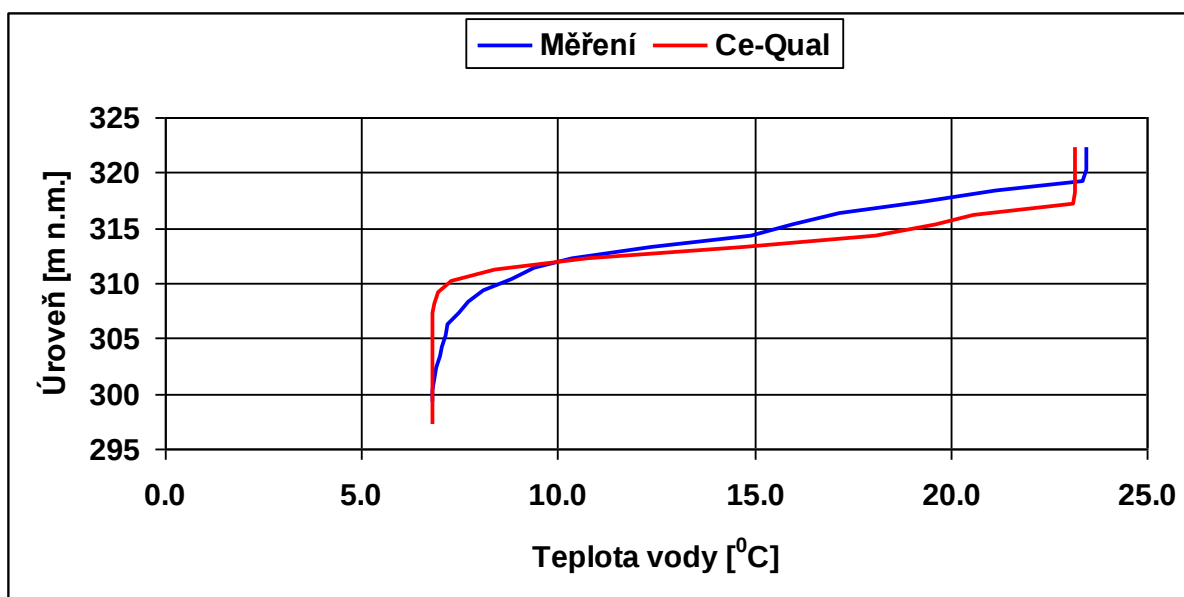
Obr. 3. Porovnání průběhů teplot vody ve svislici 9 pro 17. duben 2023 dle měření Povodí Labe a simulace modelem CE-QUAL-W2

Fig. 3. Comparison of measured and simulated water temperature profiles at Vertical Profile 9 on 17 April 2023, based on measurements provided by Elbe River Basin and simulations performed using the CE-QUAL-W2 model



Obr. 4. Porovnání průběhů teplot vody ve svislici 8 pro 28. srpen 2023 dle měření Povodí Labe a simulace modelem CE-QUAL-W2

Fig. 4. Comparison of measured and simulated water temperature profiles at Vertical Profile 8 on 28 August 2023, based on measurements provided by Elbe River Basin and simulations performed using the CE-QUAL-W2 model



Obr. 5. Porovnání průběhů teplot vody ve svislici 9 pro 28. srpen 2023 dle měření Povodí Labe a simulace modelem CE-QUAL-W2

Fig. 5. Comparison of measured and simulated water temperature profiles at Vertical Profile 9 on 28 August 2023, based on measurements provided by Elbe River Basin and simulations performed using the CE-QUAL-W2 model

Plán numerických experimentů, variant

Cílem numerických experimentů bylo posouzení možného ovlivnění teplotního režimu vodárenské nádrže v důsledku uvažovaných klimatických změn. K tomu účelu byly zvoleny výhledové periody k rokům 2050 (2036–2065) a 2085 (2071–2100). Jako referenční meteorologicko-hydrologická epizoda, s níž byly výsledky porovnávány, byl použit rok 2018. Rok 2018 nebyl zvolen jako reprezentativní průměrný rok současného klimatického období, ale jako záměrně zatěžovací referenční rok. Vyznačoval se souběhem nadprůměrně teplých a suchých podmínek, které mohou představovat analogii častějších budoucích epizod. Jeho použití proto umožňuje posoudit další změny teplotního režimu nádrže při klimatických scénářích vůči již relativně nepříznivému výchozímu stavu. Pro rok 2018 byly současně k dispozici souvislé vstupní řady potřebné pro sestavení a vyhodnocení modelových simulací. Označení roků 2050 a 2085 přitom představují středy třicetiletých období 2036–2065 a 2071–2100; způsob transformace řady roku 2018 metodou Advanced Delta Change je popsán v kapitole Uvažované klimatické změny. Cílem první sady výpočtů byla posouzení možného ovlivnění teplotního režimu pouze v důsledku předpokládaných změn teploty vzduchu. Průtoky vody i odběry byly uvažovány pro roky 2050 i 2085 shodně jako v roce 2018, kdy se hladina vody v nádrži téměř celý rok pohybovala v oblasti blízké hladině zásobního prostoru.

V rámci širšího projektu byla zpracována také druhá sada výpočtů navazující na výstupy z práce Fošumpaura [3], v níž byla uvažována hladina na úrovni dispečerské křivky DG3 při

minimálních odběrech vody. Protože výsledky této varianty nejsou v tomto článku prezentovány ani diskutovány, není tento scénář součástí dále vyhodnocovaného souboru a bude uveden samostatně v závěrečné zprávě projektu TA ČR.

POPIS LOKALITY

Pro modelování ovlivnění teplotního režimu nádrže v podmínkách uvažovaných klimatických změn byla zvolena vodárenská nádrž Vrchlice. Ta se nachází na stejnojmenném toku, její betonová přehradní hráz je umístěna jihozápadně od Kutné Hory. Koruna hráze má úroveň 325,80 m n. m., kóta přelivu pak 323,80 m n. m., což je také úroveň hladiny zásobního prostoru. Výška hráze nad terénem je téměř 34 m. Délka vzdutí nádrže při maximálních průtocích je 4,8 km, zatopená plocha při úrovni zásobního prostoru je 0,935 km² a objem zásobního prostoru činí 7,89 mil. m³. Umístění nádrže je patrné na *obr. 1*. Přehradní profil je vybaven třemi etážovými odběry. V posuzovaných letech bylo dle správce toku výhradně využíváno horní odběrové místo, v sestaveném modelu to bylo zohledněno.

Správcem vodního díla je podnik Povodí Labe, s. p., který v poslední době pravidelně, několikrát ročně, provádí detailní svislicová měření řady parametrů kvality vody, mezi něž patří mimo jiné teplota vody a obsah rozpuštěného kyslíku. Měření jsou standardně prováděna v 10 svislicích, jejich poloha je vykreslena na *obr. 1*. Řešitelům byly v rámci spolupráce poskytnuty správce výsledky svislicových měření provedených v letech 2022, 2023 a 2024. Dále byly k dispozici denní údaje o odtoku z nádrže, úrovni hladiny a teplotě vzduchu měřené v 7 hod. ráno pro roky 2018, 2022, 2023 a 2024.

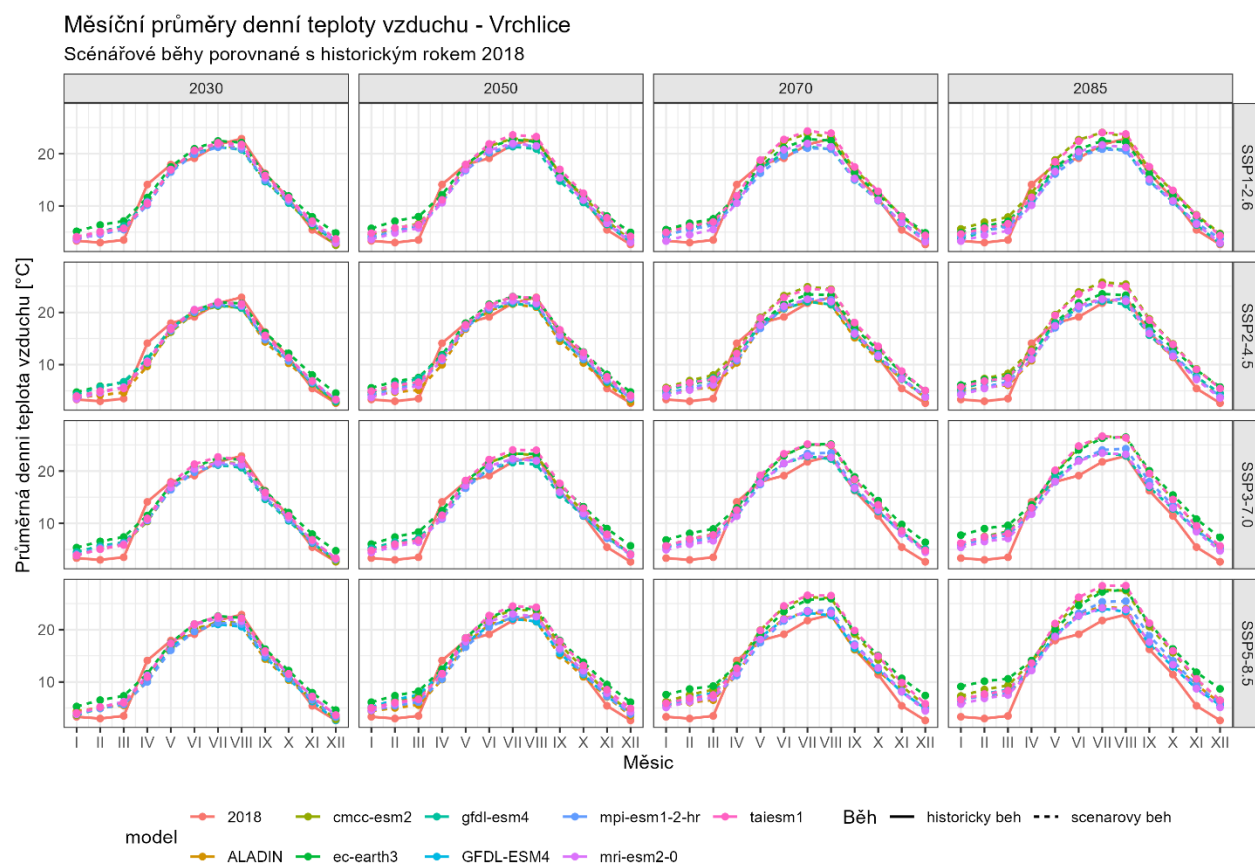
UVAŽOVANÉ KLIMATICKÉ ZMĚNY

Výhledové klimatické podmínky použité pro simulace teplotního režimu nádrže byly odvozeny z metodiky a datových výstupů pracovního balíčku WP 1, dílčího cíle DC 1.2 projektu Centrum Voda, zaměřeného na identifikaci území s deficitními vodními zdroji a na modelování dostupnosti vody v současných a budoucích podmínkách [13, 14]. Do modelu CE-QUAL-W2 nebyly přímo přebírány surové výstupy klimatických modelů, ale upravené meteorologické řady vycházející z pozorovaného referenčního klimatu a ze změn klimatických veličin odvozených pro zvolené budoucí časové horizonty. Základem pro odvození výhledového klimatu byly simulace globálních klimatických modelů z projektu Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) doplněné regionálním modelem ALADIN-CLIMATE/CZ. Použitý soubor zahrnuje šest globálních modelů (CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 a TAIESM1) a regionální model ALADIN-CLIMATE/CZ; jednotlivé modely se liší prostorovým rozlišením a dostupností scénářů Shared Socioeconomic Pathways (SSP) [13]. Pro účely této studie byly využity scénáře SSP2-4.5 a SSP5-8.5, které reprezentují střední trajektorii budoucího vývoje a emisně náročnější trajektorii založenou na vysokém využívání fosilních paliv. Právě tyto dvě varianty umožňují porovnat mírnější a výraznější odezvu teplotního režimu nádrže na změnu klimatu.

Příprava klimatických vstupů byla založena na přírůstkové metodě Advanced Delta Change (ADC), která transformuje pozorované meteorologické řady tak, aby změna mezi referenční a budoucí řadou odpovídala změnám odvozeným z klimatických modelů [13]. Metoda přitom umožňuje zohlednit nejen změnu průměrných hodnot, ale také změny variability. To je významné zejména u srážek a extrémních hodnot, jejichž budoucí změna nemusí odpovídat pouhému posunu průměru. V případě teploty vzduchu je transformace provedena lineárně, čímž se omezuje vliv systematické chyby klimatického modelu na výslednou změnu teploty.

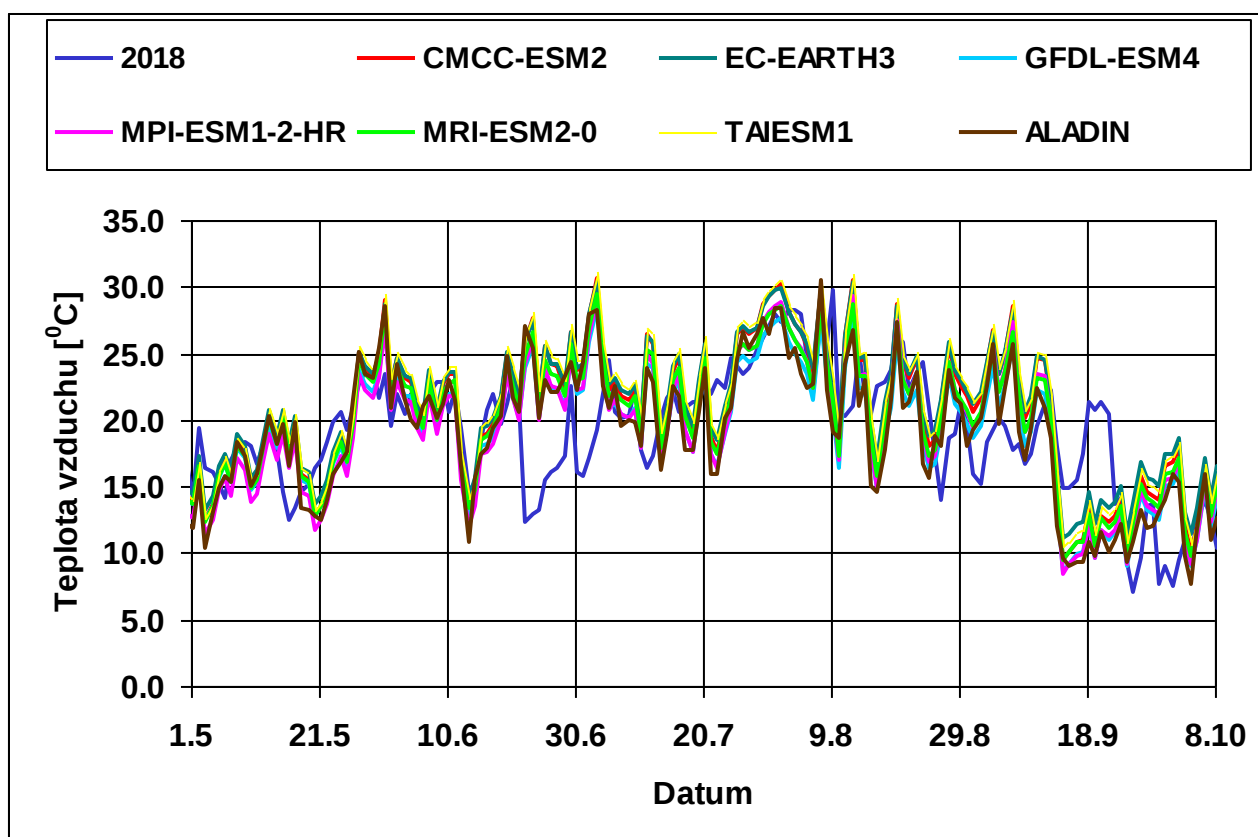
Jako referenční klimatické období bylo použito období 1991–2020, z něhož byl jako konkrétní výchozí rok pro simulace zvolen rok 2018. Budoucí časové horizonty nepředstavují simulace jednotlivých kalendářních roků, ale třicetiletá období 2036–2065 a 2071–2100, která jsou v dalším textu zjednodušeně označována jako horizonty 2050 a 2085. Pro jednotlivé klimatické modely a scénáře byly metodou ADC stanoveny změny mezi referenčním obdobím 1991–2020 a příslušným budoucím obdobím. Tyto změny byly následně aplikovány na pozorovanou meteorologickou řadu roku 2018. Výsledné scénářové řady si tak zachovávají časovou posloupnost a charakteristický průběh výchozího roku, jejich úroveň a variabilita jsou však upraveny tak, aby odpovídaly klimatickým podmínkám předpokládaným pro horizonty 2050 a 2085.

Klimatické řady použité pro simulace nádrže Vrchlice vycházejí z databáze HYMOD-KZ [12], která poskytuje vybrané hydrologické a klimatické proměnné pro různé scénáře SSP, klimatické modely a časové horizonty. Pro scénářové simulace byly využity řady průměrné denní teploty vzduchu pro horizonty 2050 (2036–2065) a 2085 (2071–2100), jež vstupovaly do výpočtu výměny tepla mezi hladinou a atmosférou. Cílem bylo posoudit možné ovlivnění teplotního režimu nádrže v důsledku klimatické změny. Pro analýzu byly zvoleny scénáře SSP2-4.5 a SSP5-8.5 a klimatické modely CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, TaiESM1 a ALADIN-CLIMATE/CZ (průměrné denní teploty vzduchu jsou uvedeny na *obr. 6*). Jako referenční rok byl vybrán rok 2018, s nímž byly následně porovnávány upravené teplotní řady pro budoucí horizonty. Porovnání průměrných denních teplot vzduchu pro rok 2050, scénář SSP5-8.5 a všechny uvedené modely s referenčním rokem 2018 je uvedeno na *obr. 7*.



Obr. 6. Měsíční průměry denní teploty vzduchu pro dostupné klimatické modely, scénáře a časové horizonty; rok 2018 představuje referenční řadu

Fig. 6. Mean daily air temperatures in individual months



Obr. 7. Porovnání průběhů simulovaných průměrných teplot vzduchu v období od května do začátku října 2050 pro scénář SSP5-8.5 a všechny uvedené modely s rokem 2018

Fig. 7. Comparison of simulated mean annual air temperature time series for the year 2050 under the SSP5-8.5 scenario for all considered models against the reference year 2018

Z obr. 7 je patrné, že jednotlivé klimatické modely poskytují pro rok 2050 vzájemně poměrně podobný průběh prognózovaných průměrných denních teplot vzduchu, který se však odlišuje od průběhu z roku 2018, kdy se objevila např. poměrně studená druhá polovina června nebo naopak vysoké teploty kolem 20. září.

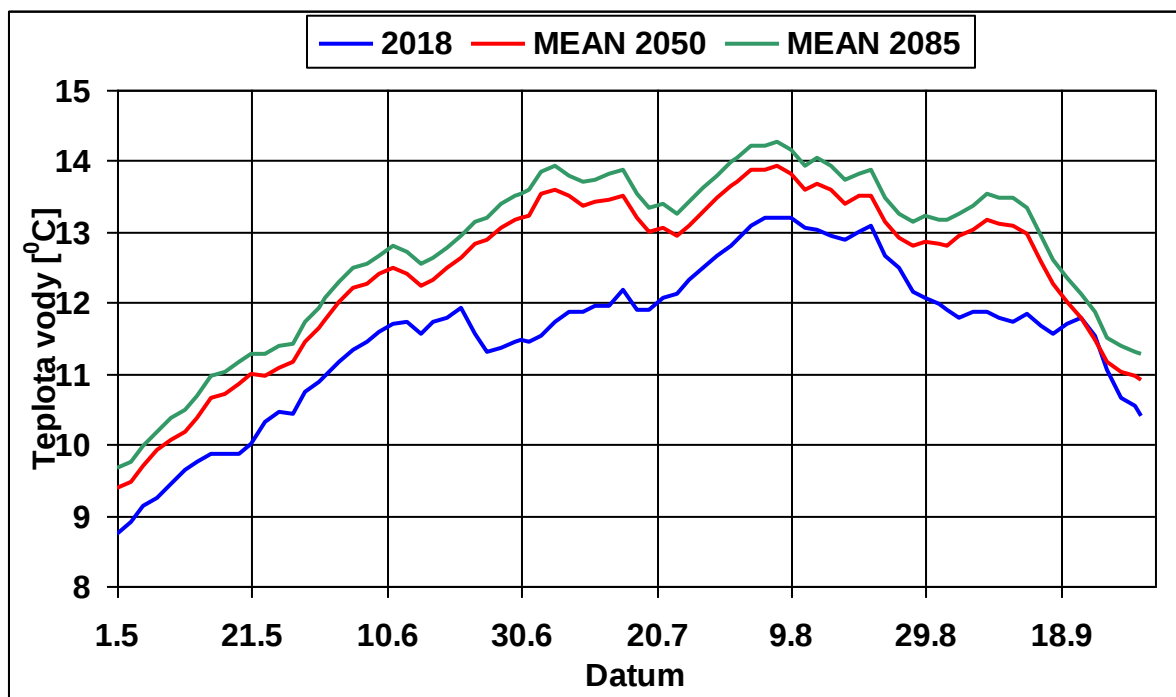
VÝSLEDKY SIMULACÍ MOŽNÉHO OVLIVNĚNÍ TEPLOTNÍHO REŽIMU

Vzhledem k tomu, že projekce průměrné denní teploty vzduchu pro zvolené horizonty a scénáře vykazovaly mezi členy souboru obdobný sezónní průběh, jsou dále pro přehlednost prezentovány průměry výsledků sedmičlenného souboru klimatických modelů. Pro další prezentaci byly zvoleny výsledky dosažené pro segment ležící 200 m nad hrází VD Vrchlice, tedy v blízkosti vodárenských odběrů, které se nacházejí v tělese hráze. Výsledky kalibrace pro tento model ukázaly dostatečnou shodu mezi provedenými měřeními a simulovaným průběhem modelem CE-QUAL-WE2.

Na obr. 8 je vykreslen průběh průměrných teplot vody v profilu 200 nad hrází pro rok 2018 a pro průměry získané zprůměrováním výsledků (teplot vody) na základě simulací pro jednotlivé globální modely pro roky 2050 (MEAN 2050) a 2085 (MEAN 2085) při uvažování scénáře

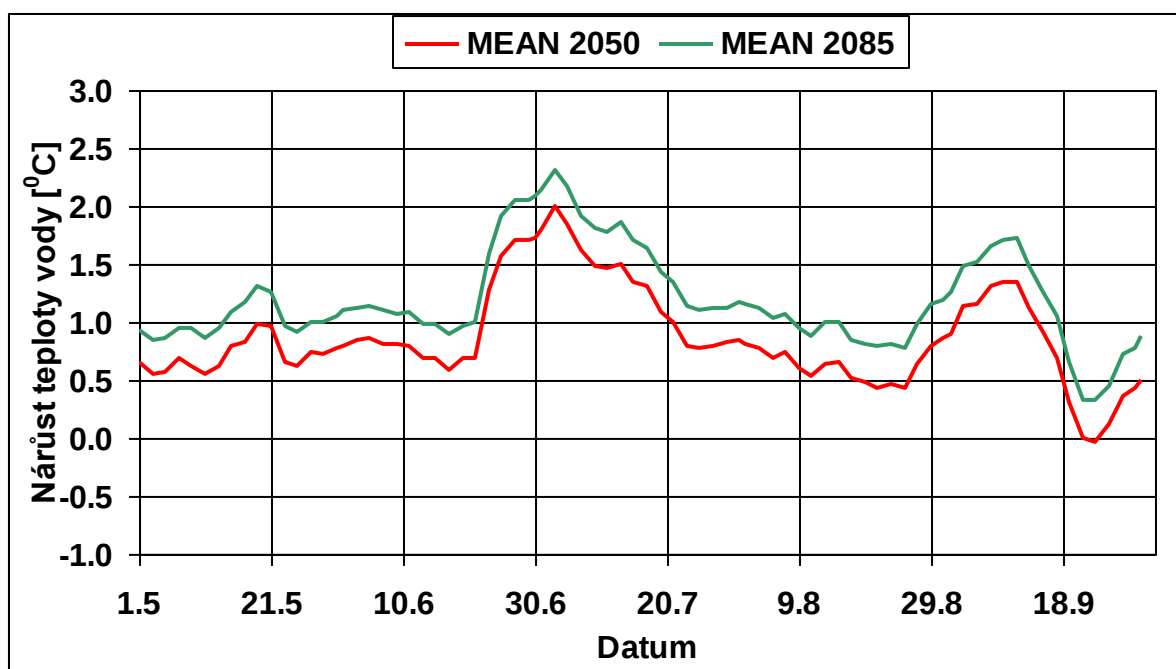
SSP2-4.5. Na dalším obr. 9 jsou zpracovány nárůsty průměrných denních teplot vody v horizontech 2050 a 2085 v tomto profilu oproti roku 2018.

Obdobně byly zpracovány také obr. 10 a obr. 11, tentokrát s využitím výsledků simulací pro scénář SSP5-8.5.



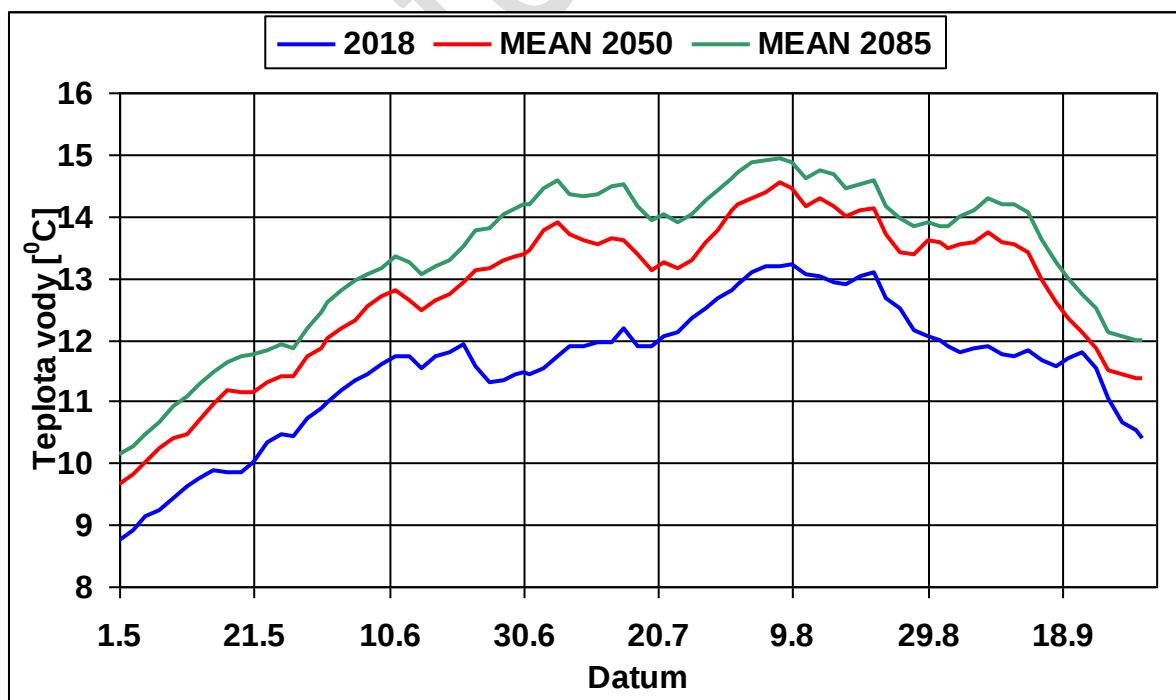
Obr. 8. Porovnání průměrných teplot vody v profilu 200 m nad hrází VD Vrchlice dle průměru výsledků simulací pro jednotlivé klimatické modely v průběhu let 2050 a 2085 pro scénář SSP2-4.5 s rokem 2018

Fig. 8. Comparison of mean water temperatures at Profile 200 m upstream of the Vrchlice Reservoir dam, based on averaged results from individual global climate models for the years 2050 and 2085 under the SSP2-4.5 scenario, relative to the reference year 2018



Obr. 9. Nárůst průměrných teplot vody v profilu 200 m nad hrází VD Vrchlice dle průměru výsledků simulací pro jednotlivé klimatické modely v průběhu let 2050 a 2085 pro scénář SSP2-4.5 oproti roku 2018

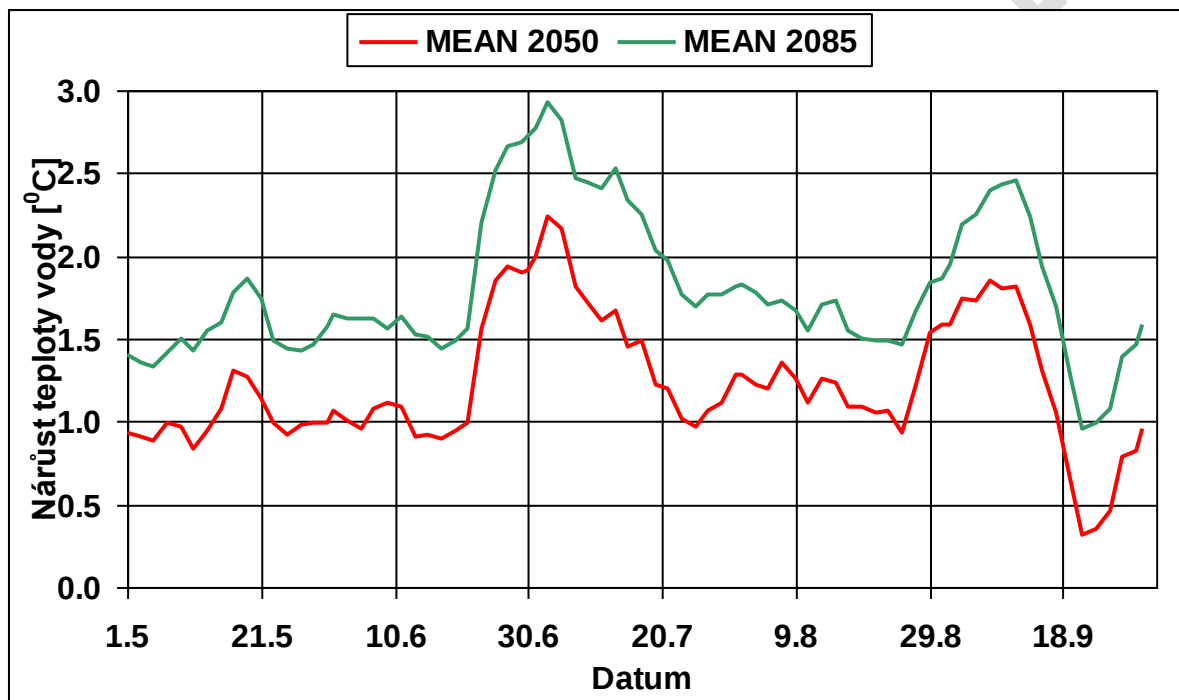
Fig. 9. Increase in mean water temperatures at Profile 200 m upstream of the Vrchlice Reservoir dam, based on averaged results from individual global climate models for the years 2050 and 2085 under the SSP2-4.5 scenario, relative to the reference year 2018



Obr. 10. Porovnání průměrných teplot vody v profilu 200 m nad hrází VD Vrchlice dle

průměru výsledků simulací pro jednotlivé klimatické modely v průběhu let 2050 a 2085 pro scénář SSP5-8.5 s rokem 2018

Fig. 10. Comparison of mean water temperatures at Profile 200 m upstream of the Vrchlice Reservoir dam, based on averaged results from individual global climate models for the years 2050 and 2085 under the SSP5-8.5 scenario, relative to the reference year 2018



Obr. 11. Nárůst průměrných teplot vody v profilu 200 m nad hrází VD Vrchlice dle průměru výsledků simulací pro jednotlivé klimatické modely v průběhu let 2050 a 2085 pro scénář SSP2-4.5 oproti roku 2018

Fig. 11. Increase in mean water temperatures at Profile 200 m upstream of the Vrchlice Reservoir dam, based on averaged results from individual global climate models for the years 2050 and 2085 under the SSP2-4.5 scenario, relative to the reference year 2018

Dalším zajímavým výstupem je porovnání průměrných maximálních teplot vody za období od začátku května do konce září, které se na hladině nádrže v profilu 200 m nad hrází vyskytly dle simulací modelu CE-QUAL-W2 v roce 2018 a v letech 2050 a 2085 pro scénář SSP5-8.5, sedmi klimatických modelů a jejich průměru (MEAN), jak je uvedeno v *tab. 1*.

Tab. 1. Průměry maximálních teplot vody za období od začátku května do konce září na hladině nádrže v profilu 200 m nad hrází dle simulací z modelu CE-QUAL-W2 pro rok 2018 a pro roky 2050 a 2085 dle scénáře SSP5-8.5 a 7 klimatických modelů a jejich průměr

Tab. 1. Average maximum surface water temperatures during the period from the beginning of May to the end of September at the reservoir surface in the profile located 200 m upstream of the dam, as simulated by the CE-QUAL-W2 model for the reference year 2018 and for the years 2050 and 2085 under the SSP5-8.5 scenario using seven climate models and their ensemble mean

Rok 2018	21,6	
Globální model	2050	2085
CMCC-ESM2	23,2	25,2
EC-EARTH3	23,5	25,0
GFDL-ESM4	22,0	22,9
MPI-ESM1-2-HR	22,1	23,6
MRI-ESM2-0	22,6	22,9
TAI-ESM1	23,7	25,8
ALADIN	22,1	23,2
MEAN	22,8	24,1

ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A DISKUZE

Výsledky simulací zpracované 2D matematickým modelem CE-QUAL-W2 za účelem poznání možného ovlivnění teplotních poměrů ve vodárenských nádržích přinesly očekávané skutečnosti.

V případě uvažovaného scénáře SSP2-4.5 lze dle obr. 8 pro modelový rok odpovídající klimatickému horizontu 2050 v oblasti blízko hráze s maximálními hloubkami očekávat nárůst průměrné teploty vody přibližně o 0,5 °C, s maximem až 1,5 °C oproti referenčnímu roku 2018. V případě modelového roku odpovídajícího klimatickému horizontu 2085 stoupne průměrná teplota trvale alespoň o 1 °C, místy pak o více než 2 °C.

Pokud by se jako reálný jevil scénář SSP5-8.5, pak by nastaly daleko razantnější změny. Dle obr. 10 by pro modelový rok odpovídající klimatickému horizontu 2050 nárůst průměrné teploty vody minimálně od 1,0 °C do 2,0 °C, pro modelový rok odpovídající klimatickému horizontu 2085 pak v rozsahu od 1,5 °C do 2,5 °C.

Kromě trvalého nárůstu průměrné teploty vody v nádržích lze také očekávat nezanedbatelný nárůst teploty vody na hladině, jak ukazuje tab. 1. Teploty vody na hladině se mohou v horizontu 2050 oproti roku 2018 zvýšit v průměru o více než 1 °C, v horizontu 2085 až o 2,5 °C.

Zjištěný nárůst teploty vody může mít důsledky také pro kyslíkový režim nádrže. Dlouhodobá analýza jezer mírného pásu, na níž se podílel také J. Hejzlar, prokázala rozšířený pokles koncentrací rozpuštěného kyslíku; v hlubších vrstvách byl tento pokles spojen zejména se zesilováním teplotní stratifikace a se zhoršováním průhlednosti vody. Problematika vzniku kyslíkových deficitů byla v českých podmínkách řešena např. na vodárenské nádrži Římov. U nádrže Vrchlice lze proto očekávat, že oteplování a případné prodloužení období stratifikace zvýší riziko kyslíkového deficitu v hypolimniu, přičemž konkrétní odezva bude záviset také na trofii nádrže, přísunu organické hmoty a hydrologickém režimu.

Z hlediska směru změny jsou výsledky v souladu s publikovanými pracemi, které u nádrží a jezer v oteplujícím se klimatu očekávají růst teploty vody a změny stratifikace [4, 5, 9]. Přímé kvantitativní srovnání s jinými nádržemi je však omezené, protože odezva závisí na geometrii, hydrologickém režimu, provozu odběrů, meteorologickém působení a způsobu konstrukce klimatických scénářů. Hodnoty uvedené pro Vrchlici proto nelze bez dalšího přenášet na jiné vodárenské nádrže.

Rozdíly v nárůstu teploty vody mezi horizonty 2050 a 2085 nelze interpretovat jako jednoduchý lineární převod změny teploty vzduchu na změnu teploty vody. CE-QUAL-W2 počítá celkovou tepelnou bilanci hladiny a podélně-svislou distribuci tepla; výsledná průměrná či maximální teplota je proto ovlivněna také sezónním průběhem referenčního roku, stratifikací, mísením, hloubkou a odtokovými podmínkami. Navíc scénářové řady zachovávají časovou strukturu roku 2018 a mění pouze teplotu vzduchu. Nelineární rozdíly mezi zvolenými souhrnnými ukazateli jsou proto možné, jejich fyzikální interpretace však musí respektovat uvedená omezení.

Nejistota výsledků pochází z několika zdrojů: z rozptylu klimatických modelů, z volby mimořádně teplého a suchého roku 2018 jako zátěžového referenčního roku, z ponechání ostatních meteorologických veličin a hydrologicko-provozních podmínek na úrovni roku 2018, z laterálního zprůměrování 2D modelu, ze souhrnného popisu přítoku a z omezeného kalibračního a verifikačního vyhodnocení bez standardních kvantitativních metrik. Výsledky je proto vhodné chápat jako scénářové odhady citlivosti teplotního režimu na změnu teploty vzduchu, nikoli jako deterministickou předpověď budoucího stavu.

ZÁVĚR

Numerické simulace ukázaly, že při zachování hydrologicko-provozních podmínek referenčního roku 2018 vede zvýšení teploty vzduchu v uvažovaných klimatických scénářích k oteplení vody v prostoru 200 m nad hrází VD Vrchlice i na hladině. Pro SSP2-4.5 byl pro horizont 2050 simulován nárůst průměrné teploty vody přibližně o 0,5 °C s rozdíly až kolem 1,5 °C, zatímco pro horizont 2085 se zvýšení pohybovalo převážně nejméně kolem 1 °C a místy přesahovalo 2 °C. Pro SSP5-8.5 byly změny výraznější: přibližně 1,0 až 2,0 °C pro horizont 2050 a 1,5 až 2,5 °C pro horizont 2085. Průměr maximálních povrchových teplot v období květen až září vzrostl z 21,6 °C v referenčním roce na 22,8 °C pro horizont 2050 a 24,1 °C pro horizont 2085 při ensemble průměru scénáře SSP5-8.5.

Praktický význam studie spočívá v upozornění, že oteplování může měnit teplotní podmínky v prostoru vodárenských odběrů a zvyšovat riziko nepříznivých kyslíkových podmínek ve stratifikovaném období. Výsledky mohou sloužit jako screeningový podklad pro správce nádrže a pro další analýzy provozních variant, zejména ve vazbě na volbu odběrové etáže a hodnocení kvality vody.

Interpretace je omezena tím, že scénáře izolují změnu teploty vzduchu při ostatních meteorologických a hydrologicko-provozních vstupech ponechaných podle roku 2018, model je laterálně zprůměrovaný a kalibrační/verifikační vyhodnocení nebylo kvantifikováno standardními chybovými metrikami. Navazující práce by měla využít širší soubor měření včetně roku 2024, provést kvantitativní validaci a citlivostní analýzu parametrů, zahrnout změny dalších meteorologických a hydrologických veličin a samostatně vyhodnotit varianty manipulace s hladinou a odběrovými etážemi.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury ČR (projekt č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“, 2020–2026). Téma bylo řešeno v dílčím cíli 3.4 „Změna manipulace či navýšení zásobního prostoru stávajících vodních či suchých nádrží“.

Literatura

- [1] CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 4.5, User Manual Part 2: Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, Scott A. Wells, Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, June 2024.
- [2] CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 4.5, Part 3: Input and Output Files User Manual, Scott A. Wells, Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, June 2024.
- [3] FOŠUMPAUR, P., KOVÁČOVÁ, T. Metodika adaptivního řízení vodních nádrží během hydrologického sucha. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2026, 68(3), s. 28–34. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2026/06/metodika-adaptivniho-rizeni-vodnich-nadrzi-behem-hydrologickeho-sucha/>
- [4] CHENG, Y., VOISIN, N., YEARSLEY, J. R., NIJSSEN, B. Reservoirs Modify River Thermal Regime Sensitivity to Climate Change: A Case Study in the Southeastern United States. *Water Resources Research*. 2020, 56(6), e2019WR025784. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2019WR025784>

- [5] GOLUB, M. et al. A Framework for Ensemble Modelling of Climate Change Impacts on Lakes Worldwide: The ISIMIP Lake Sector. *Geoscientific Model Development*. 2022, 15(11), s. 4 597–4 623. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-4597-2022>
- [6] FARZANA, S. Z., PAUDYAL, D. R., CHADALAVADA, S., ALAM, M. J. Prediction of Water Quality in Reservoirs: A Comparative Assessment of Machine Learning and Deep Learning Approaches in the Case of Toowoomba, Queensland, Australia. *Geosciences*. 2023, 13(10), 293. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/geosciences13100293>
- [7] FERREIRA, D. M., FERNANDES, C. V. S. Integrated Water Quality Modeling in a River-Reservoir System to Support Watershed Management. *Journal of Environmental Management*. 2022, 324, 116447. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116447>
- [8] RŮŽIČKA, M., HEJZLAR, J., MIKEŠOVÁ, P., COLE, T. M. 2-D Water Quality Modelling of a Drinking Water Reservoir. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2002, 50(3), s. 258–272.
- [9] RŮŽIČKA, M., HEJZLAR, J., COLE, T. M. Impacts of Climate Change on the Water Quality in a Dimictic Reservoir. In: *ResLim 2002, Extended Abstracts, 4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality*. České Budějovice: Hydrobiological Institute Academy of Sciences of the Czech Republic, Faculty of Biological Sciences University of South Bohemia, 2002, s. 292–295.
- [10] SAADATPOUR, M., AFSHAR, A., EDINGER, J. E. Meta-Model Assisted 2D Hydrodynamic and Thermal Simulation Model (CE-QUAL-W2) in Deriving Optimal Reservoir Operational Strategy in Selective Withdrawal Scheme. *Water Resour Manage*. 2017, 31, s. 2 729–2 744. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1658-x>
- [11] TALEBBEYDOKHTI, N., POURSHAHABI, S., RAKHSHANDEHROO, G., NIKOO, M. R., AMIRI, M. Review of Reservoir Water Quality Monitoring and Modelling. In: *Long-Term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies of Dams*, 2017. Dostupné z: <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-564-5-018>
- [12] VIZINA, A., GEORGIEVOVÁ, I., VYSKOČ, P., MELIŠOVÁ, E., HANEL, M., TRNKA, M., PAVLÍK, P., FISCHER, M. Databáze HYMOD-KZ a deficitní oblasti. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2024, 66(6), s. 4–11. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2024.09.003>
- [13] VIZINA, A., VYSKOČ, P., MELIŠOVÁ, E., GEORGIEVOVÁ, I., TRNKA, M., FISCHER, M., BALEK, J., HANEL, M., MÁCA, P. *Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda). Souhrnná výzkumná zpráva: Dílčí cíl 1.2 - Identifikace území s deficitními vodními zdroji*. Praha, červen 2024.
- [14] VIZINA, A., VYSKOČ, P., MELIŠOVÁ, E., GEORGIEVOVÁ, I., TRNKA, M., FISCHER, M., BALEK, J., HANEL, M., MÁCA, P. *Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda). Popis veřejné databáze: Deficitní oblasti – veřejná databáze – Specializovaná veřejná databáze – typ S*. Praha, červen 2024. Dostupné z: <https://shiny.vuv.cz/HYMOD-KZ/>

[15] WOODBURY, L. H., PADMANABHAN, G. Water Quality Modelling of a Proposed Reservoir. *Journal of Water Management Modeling*. 1993, R175-17. ISSN 2292-6062.

Dostupné z: <https://doi.org/10.14796/JWMM.R175-17>

[16] ZHANG, Z. *Application of W2 V4.5 SYSTDG to the Bonneville Reservoir for Predicting Downstream Total Dissolved Gas Concentration*. Portland: Portland State University, 2021.

Autoři

Doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.¹

Ales.Havlik@cvut.cz

Ing. Adam Vizina, Ph.D.²

adam.vizina@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-4683-9624

Mgr. Barbora Krijt^{2,3}

barbora.krijt@vuv.cz

¹Fakulta stavební ČVUT v Praze (Česká republika)

²Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha (Česká republika)

³Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha (Česká republika)

Príspevek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.07.004

ISSN 0322-8916/© 2026 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

SIMULATION OF THE THERMAL REGIME OF A DRINKING WATER RESERVOIR UNDER PROJECTED CLIMATE CHANGE CONDITIONS

HAVLÍK, A.¹; VIZINA, A.²; KRIJT, B.^{2,3}

¹Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague (Czech Republic)

²T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague (Czech Republic)

³Faculty of Science, Charles University, Prague (Czech Republic)

Keywords: temperature profile – water temperature – climate change – water quality – drinking water reservoir

This paper deals with the potential impact of climate change on the thermal regime of a drinking water reservoir.

The methodology was based on simulating temperature variations in the reservoir using the two-dimensional hydrodynamic and water quality model CE-QUAL-W2. The model includes a mathematical framework for simulating two-dimensional flow and water quality processes in reservoirs. Its hydrodynamic component is based on the laterally averaged three-dimensional equations of motion. Simulations of the thermal regime and water quality are performed by numerically solving the turbulent advection–diffusion equation. The total heat exchange between the water body and the atmosphere is quantified using air temperature, dew point temperature, absolute humidity, wind speed, cloud cover, and the geographical location of the reservoir surface.

The potential impact on the thermal regime was assessed using the Vrchlice Reservoir as a case study. The model was calibrated for the years 2022 and 2023 using detailed measurements of vertical water temperature profiles at selected monitoring sites provided by Elbe River Basin, state enterprise. To compare the simulated future conditions with the current state, the year 2018 was selected as the reference period. The observed daily air temperature series for 2018 was transformed using the Advanced Delta Change (ADC) method to reflect projected changes derived from climate models for the 2050 and 2085 time horizons. An additional scenario examined the effect of a significant reduction in the reservoir water level on the thermal regime.

The results compare the mean water temperatures in characteristic vertical profiles for the selected climate change scenarios for 2050 and 2085 with the corresponding values for the reference year 2018. A similar comparison was carried out for the surface water temperature.