

Metodika adaptivního řízení vodních nádrží během hydrologického sucha

PAVEL FOŠUMPAUR, TEREZA KOVÁČOVÁ

Klíčová slova: adaptivní řízení – vodní nádrž – hydrologické sucho – klimatická změna – dispečerský graf – zabezpečení odběru

ABSTRAKT

Článek představuje metodiku adaptivního řízení vodních nádrží určenou pro zajištění spolehlivého zásobování vodou v podmínkách hydrologického sucha a změny klimatu. Navržený přístup kombinuje hydrologické modelování, scénáře klimatické změny a optimalizaci dispečerských grafů s regulačními stupni. Systém řízení umožňuje flexibilní omezení vodárenských odběrů a úpravu minimálních zůstatkových průtoků v závislosti na aktuálním stavu nádrže. Pilotní ověření metodiky proběhlo na vybraných českých nádržích (Švihov, Klíčava, Žlutice, Obecnice, Pílská, Láz, Vrchlice) pro současné klimatické podmínky a výhledy do roku 2050 a 2100, přičemž hydrologické vstupy byly modelovány pomocí modelů GR4J a CemaNeige, kalibrovaných na historických datech a korigovaných pro budoucí klimatické scénáře. Výsledky ukazují, že adaptivní řízení významně zvyšuje zabezpečení vodárenských odběrů a minimalizuje riziko hlubokých poruch dodávek vody, přičemž snižuje kolísání hladiny v nádržích s příznivými dopady na kvalitu vody. Oproti klasickému řízení na konstantní odběry umožňuje tento přístup včasnou a postupnou regulaci odběrů, čímž se rozkládají dopady sucha v čase a zvyšuje se robustnost provozu nádrží. Navržený rámec představuje univerzálně aplikovatelné nestrukturální opatření, plně kompatibilní se stávající legislativou, podporující dlouhodobě udržitelné hospodaření s vodními zdroji a poskytující praktický nástroj pro úpravu manipulačních řádů vodních nádrží.

ÚVOD

Hydrologické sucho představuje v podmínkách střední Evropy jednu z nejvýznamnějších výzev současného vodního hospodářství. Hydrologické sucho je charakterizováno dlouhodobým poklesem průtoků, snížením zásob podzemních vod a omezenou obnovou akumulovaných zdrojů. Jeho dopady jsou zvláště citelné u vodárenských nádrží, jejichž provoz je založen na předpokladu relativně stabilního hydrologického režimu a dlouhodobé statistické stacionarity vstupních řad. Tento předpoklad je však v posledních desetiletích systematicky narušován probíhající klimatickou změnou.

Projekce regionálních klimatických modelů indikují pro území České republiky (ČR) postupný nárůst teploty vzduchu, změny sezonního rozdělení srážek a zvýšení evapotranspirace. Tyto změny se promítají do poklesu průměrných letních průtoků, častějšího výskytu víceletých suchých epizod a vyšší variability odtoku. Extrémní období let 2014–2020 ukázalo, že i v tradičně vodohospodářsky stabilních oblastech může dojít k výraznému poklesu hladin vodárenských nádrží a k ohrožení zabezpečení odběrů. Z hlediska legislativního rámce je problematika adaptace na sucho akcentována např. implementací Rámcové směrnice o vodách, která zdůrazňuje princip udržitelného nakládání s vodními zdroji a potřebu integrovaného řízení povodí. Současně národní strategie adaptace na změnu klimatu kladou důraz na posilování odolnosti vodohospodářské infrastruktury vůči extrémním hydrologickým jevům. V tomto kontextu nabývá na významu nejen výstavba nových vodních děl, ale především optimalizace provozu stávajících nádrží. Tradiční manipulační řády vodárenských nádrží jsou obvykle založeny na pevných odběrech a předem definovaných dispečerských křivkách, jejichž parametry vycházejí z historických dat. Takový přístup je relativně robustní v podmínkách

stacionárního klimatu, avšak při systematickém poklesu přítoků může vést k nárůstu nedostatkových objemů, k porušení požadované zabezpečení odběrů a k výraznému kolísání hladiny. Výrazné poklesy hladiny mají sekundární dopady nejen na vodárenské využití, ale i na morfologii břehové zóny, tepelný a kyslíkový režim nádrže a procesy eutrofizace. Kolísání hladiny tak může negativně ovlivnit jakost surové vody a zvýšit nároky na její úpravu.

Motivací předkládaného výzkumu je potřeba nalézt metodický rámec, jenž umožní pružnou reakci na měnící se hydrologické podmínky bez nutnosti nákladných stavebních zásahů. Adaptivní řízení vodních nádrží představuje perspektivní nestrukturální opatření spočívající v odstupňované regulaci odběrů a případné úpravě minimálních zůstatkových průtoků v závislosti na aktuálním stavu zásobního prostoru a očekávaném vývoji přítoků. Kromě zvýšení zabezpečení odběrů má tento přístup také potenciál stabilizovat kolísání hladiny v nádrži. Postupné a včasné omezení odběrů může zabránit hlubokým poklesům hladiny v závěru suchých období, čímž se omezuje rozvoj nežádoucích fyzikálně-chemických a biologických procesů ovlivňujících jakost vody. Cílem tohoto výzkumu je navrhnout a ověřit metodiku adaptivního řízení vodárenských nádrží během hydrologického sucha, založenou na kombinaci hydrologického modelování, scénářů klimatické změny a optimalizace manipulačních pravidel. Dílčími cíli jsou: (1) kvantifikace dopadů výhledových klimatických scénářů na zabezpečení odběrů, (2) návrh systému regulačních stupňů a dispečerských křivek umožňujících postupné omezování odběrů a (3) porovnání účinnosti klasického a adaptivního provozního režimu z hlediska zabezpečení i stability hladiny. Výsledkem by měl být metodický nástroj aplikovatelný na různé typy vodárenských nádrží, který podpoří dlouhodobě udržitelné hospodaření s vodními zdroji v podmínkách zesilujícího hydrologického sucha a současně přispěje ke stabilizaci vnitřního prostředí nádrží z hlediska jakosti vody.

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Adaptivní řízení vodních nádrží je v odborné literatuře reflektováno jako reakce na rostoucí hydrologickou nejistotu vyvolanou změnou klimatu, proměnlivými průtoky a narůstající frekvencí víceletých suchých období. Tradiční přístupy k řízení nádrží, které zachovávají konstantní manipulační pravidla odvozená z historických hydrologických řad, poskytují dobrou vodohospodářskou stabilitu v podmínkách relativně stacionárního klimatu. Nicméně již od osmdesátých až devadesátých let se objevovaly první metodické práce, jež ve vodohospodářském kontextu začaly uvažovat flexibilitu provozu a pravidla pro omezení odběrů v obdobích sucha za účelem rovnoměrného rozložení vodních deficitů v čase. Tyto koncepce byly odvozeny z ekonomických teorií a následně aplikovány na ověřování strategií provozu nádrží v klimaticky proměnlivých situacích [1]. Pravidla řízení často optimalizují ztrátovou funkci, která reprezentuje celkové finanční ztráty odběratelů z nedodávky vody. Již v roce 1982 prokázal Hashimoto a kol. [2], že při nelineární ztrátové funkci je včasné omezování odběrů výhodné, protože jednorázová hluboká nedodávka vody způsobuje větší škody než několik menších nedostatků rozložených v čase, jež dohromady představují stejný nedostatek [3]. Modely adaptivního řízení nádrží a vodohospodářských soustav byly v ČR poprvé studovány na Fakultě stavební ČVUT v Praze zásluhou Nacházela a Patery [4, 5].

Studie autorů Ahmadi, Haddad a Loáiciga [6] představuje jeden z prvních komplexních modelů adaptivního řízení pravidel provozu nádrží s ohledem na dopady klimatické změny. Autoři využili klimatické projekce pro střední a pozdní část 21. století a následně optimalizovali dispečerská pravidla tak, aby zvýšili spolehlivost a snížili zranitelnost provozu vodárenské nádrže při dlouhodobých suchých obdobích. Princip adaptace využil pro strategické řízení vodohospodářských soustav také Marton a kol. [7, 8].

V současné době se adaptivní řízení stalo předmětem širší pozornosti, zejména v kontextu kombinace klimatických scénářů, hydrologického modelování a optimalizačních metod. Výzkumy aplikují různé principy, včetně heuristických algoritmů, modelově prediktivního řízení a optimalizačních přístupů zaměřených na spolehlivost plnění zásobní funkce při budoucích hydrologických podmínkách [9]. Studie ukazují, že adaptivní provozní pravidla mohou významně zlepšit spolehlivost dodávek vody během sucha a současně omezit extrémní kolísání zásobních hladin [10].

Dalším významným směrem je výzkum optimalizačních strategií pro řízení víceúčelových nádrží. Např. studie [11] ukazuje, jak lze modifikovat pravidla řízení s využitím regulačních stupňů v reakci na víceleté suché periody, a tím zlepšit operativní účinnost systému. Moderní přístupy se také obracejí k využití modelů strojového učení pro rozhodování o řízení nádrží, které reflektují komplexní interakce hydrologických vstupů a provozních omezení [12].

V ČR je implementace adaptivního řízení nádrží podpořena legislativními a strategickými dokumenty. Základ tvoří vodní zákon č. 254/2001 Sb., který stanoví zásady nakládání s vodami a manipulační řády vodních děl včetně povinností zohledňovat minimalizaci negativních dopadů sucha a nedostatku vody. Dále jsou řešeny na krajské a národní úrovni Plány pro zvládnutí sucha a nedostatku vody, které operativními opatřeními doplňují plány povodí v souladu s požadavky Rámcové směrnice EU o vodách 2000/60/ES.

Tyto normy podporují adaptivní přístupy, jež mohou být realizovány v rámci manipulačních řádů a plánování minimálních zůstatkových průtoků, s důrazem na zásobování pitnou vodou jako prioritní funkci. Tyto možnosti jsou u nás již často testovány nebo provozně uplatňovány správci povodí. Příkladem je systém adaptivního řízení nádrží v Povodí Odry, který vychází ze studie [13].

METODIKA ŘEŠENÍ

Základní podstatou adaptivního řízení nádrží je nahrazení rigidního provozu s konstantními odběry flexibilním systémem řízení, který průběžně reaguje na vývoj hydrologické situace. Klíčovým prvkem tohoto přístupu je optimalizace dispečerských grafů (řídících křivek), jež vymezují regulační stupně zásobního prostoru pro jednotlivé kalendářní měsíce. S poklesem náplně zásobního objemu pod definované úrovně dochází k postupnému omezování odběrů podle předem stanovených priorit jednotlivých uživatelů a současně k řízené úpravě minimálních zůstatkových průtoků pod hrázemi nádrží. Tento flexibilní režim umožňuje včas reagovat na nastupující sucho a rozložit dopady nedostatku vody v čase tak, aby se zabránilo náhlým a hlubokým poruchám v dodávkách.

V rámci výzkumu byl navržen systém dispečerských křivek a regulačních stupňů, které stanovují optimální odběry a minimální zůstatkové průtoky pro jednotlivé měsíce a klimatické podmínky. Pilotní ověření metodiky proběhlo na vybraných vodárenských nádržích v ČR, zejména na nádrži Švihov, Klíčava, Žlutice, Obecnice, Pilská, Láz a Vrchlice.

Klimatické podmínky

Ověření navrženého postupu adaptivního řízení vodárenských nádrží bylo provedeno pro současné klimatické podmínky a pro výhledové podmínky odpovídající časovým horizontům přibližně roku 2050 a 2100. V případě nádrže Švihov byl pro optimalizaci adaptivního řízení využit tzv. Střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v ČR vyvinutý VÚV TGM v roce 2019 [14]. Pro ostatní nádrže vycházejí klimatická data z aktuálních výsledků projektu „Centrum Voda“. V jeho rámci byla vytvořena veřejně dostupná databáze HYMOD [15], která poskytuje detailní výsledky hydrologického modelování a analýzy hydrologické bilance povodí

(vodních útvarů) pro současné a výhledové klimatické podmínky. Databáze je dostupná prostřednictvím webové aplikace (<https://shiny.vuv.cz/HYMOD-KZ/>) a poskytuje ucelený soubor klimatických a hydrologických charakteristik odvozených z více klimatických modelů. Na základě podrobné analýzy klimatických scénářů obsažených v databázi HYMOD byly pro jednotlivá zájmová povodí stanoveny změny základních meteorologických veličin, zejména teploty vzduchu a srážkových úhrnů, a to pro budoucí časové horizonty do konce 21. století. Databáze zahrnuje výsledky celé řady globálních a regionálních klimatických modelů, mimo jiné MEAN (průměr všech modelů), CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, TAIESM1 a regionální klimatický model ALADIN-CLIMATE/CZ, které reprezentují široké spektrum možného vývoje budoucího klimatu.

Pro účely ověření adaptivního řízení vodárenských nádrží bylo z metodických důvodů zvoleno využití jednoho reprezentativního klimatického scénáře. Jako nejvhodnější základ byl vybrán regionální klimatický model ALADIN-CLIMATE/CZ pro scénář SSP5-8.5, který pro území ČR předpokládá postupný nárůst průměrné roční teploty vzduchu přibližně o 1,0 až 1,4 °C do roku 2050 a přibližně o 3,1 až 3,8 °C do roku 2085 (respektive 2100). Uvedené hodnoty přibližně také odpovídají dlouhodobému trendu pozorovaného oteplování od osmdesátých let 20. století. Naproti tomu predikované změny ročních srážkových úhrnů se v rámci většiny modelů pohybují v relativně úzkém rozmezí a ve srovnání se změnami teploty nejsou z hlediska celkové vodní bilance považovány za dominantní faktor.

Volba jednoho klimatického scénáře byla vedena skutečností, že cílem výzkumu nebyla projekce budoucího klimatu ani hodnocení nejistot klimatických modelů, ale především testování robustnosti navrženého systému adaptivního řízení nádrží při systematicky zhoršovaných hydrologických podmínkách. Vybraný scénář umožňuje ověřit vliv oteplení na hydrologickou odezvu povodí, zajistit konzistentní vstupy do vodohospodářských simulací a jednoznačně interpretovat chování provozních a regulačních pravidel nádrží. Použití svazku více globálních klimatických modelů by naopak vedlo k výraznému rozšíření nejistot a ztížilo by vyhodnocení účinnosti konkrétních opatření v oblasti řízení zásobní funkce nádrží.

Takto definovaný klimatický scénář byl následně využit k úpravě vstupních hydrologických řad a k simulacím provozu vybraných vodárenských nádrží pro současné i výhledové klimatické podmínky. Výsledky těchto simulací poskytly konzistentní základ pro posouzení účinnosti adaptivního řízení jako nestrukturálního opatření pro zmírnění dopadů klimatické změny na zabezpečení vodních zdrojů.

Hydrologický model

Pro simulaci hydrologických podmínek v povodích vybraných vodárenských nádrží byl použit hydrologický model umožňující zachytit základní procesy odtoku a akumulace vody v povodí včetně vlivu sněhové pokrývky. Hlavním nástrojem byla aplikace hydrologického modelu GR4J [16], doplněného modulem CemaNeige [17], který umožňuje simulovat sněhové zásoby a jejich postupné tání. Model GR4J je konceptuální model hydrologického cyklu, jenž transformuje denní srážky a potenciální evapotranspiraci na odtok z povodí pomocí čtyř základních parametrů. Tyto parametry zachycují retenci vody v povodí, rychlou i pomalou složku odtoku, a tím umožňují realistickou simulaci denních průtoků v profilu hráze nádrže. Modul CemaNeige je využit pro zachycení sněhové akumulace a tání, které významně ovlivňuje jarní průtoky. Povodí byla rozdělena do pěti výškových zón podle nadmořské výšky, aby bylo možné zohlednit rozdílné podmínky tání a sněhové akumulace ve vyšších a nižších polohách. Pro každý den se vypočítával přebytek srážek a odtávání sněhu v jednotlivých

zónách, přičemž výsledný odtok do nádrže je součtem příspěvků z jednotlivých výškových pásem.

Kalibrace modelu byla provedena s využitím přirozených průtokových řad, odvozených v měsíčním kroku z měřených průtoků v profilu hráze každé nádrže. Tyto řady byly očištěny o vlivy řízeného odběru, vypouštění a provozní manipulace s vodou, s využitím detailních provozních záznamů převážně za období 1981 až 2024. Denní hodnoty srážek a teploty vzduchu byly použity jako vstupní meteorologické údaje, přičemž výpočet odtoku probíhal rovněž v denním kroku. Pro potřeby kalibrace byly denní odtoky agregovány do měsíčního kroku, aby se minimalizovala denní variabilita a umožnilo porovnání s agregovanými měsíčními průtokovými řadami. Kvalita kalibrace byla hodnocena pomocí kombinace standardních kritérií Kling-Gupta Efficiency (KGE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) a PBIAS, která vyjadřují shodu simulovaných a pozorovaných hodnot průtoků, variabilitu průběhu a systematické odchylky. Hodnoty těchto kritérií pro jednotlivé nádrže jsou uvedeny v *tab. 1* a potvrzují dobrou shodu mezi simulovanými a referenčními průtoky.

Tab. 1. Kritéria úspěšnosti kalibrace hydrologického modelu pro povodí zájmových nádrží
Tab. 1. Efficiency criteria for hydrological model calibration for the catchments of the selected reservoirs

Nádrž	Klíčava	Žlutice	Obecnice, Pílská, Láz	Vrchlice
Období	01. 11. 1980 – 31. 10. 2024	01. 11. 1980 – 31. 10. 2020	01. 11. 1981 – 31. 10. 2024	01. 11. 1985 – 31. 10. 2024
Hodnotící kritéria				
NSE [%]	65,9	80,2	60,0	70,9
KGE [%]	82,9	89,5	80,1	85,2
PBIAS [%]	-0,1	1,6	-0,4	0,6

Pro kalibraci bylo využito kritérium KGE, jež potvrdilo velmi dobrou kvalitu modelu s hodnotami od 80,1 % do 89,5 %. Hodnoty NSE se pohybují v rozmezí od 60,0 % do 80,2 %. Kritérium PBIAS se pro všechna povodí pohybuje v intervalu velmi dobrého hodnocení. Tyto hodnoty, konkrétně od -0,4 % do 1,6 %, naznačují, že model nevykazuje významnou tendenci k nadhodnocování ani podhodnocování celkového objemu průtoků. Lze tedy konstatovat, že optimalizované parametry jsou spolehlivé a vhodné pro následné využití.

Po kalibraci byly simulované řady pro časové horizonty 2050 a 2100 korigovány o systematické chyby pomocí multiplikativní metody, která upravuje odtokové řady proporcionálně tak, aby reflektovaly historické rozdíly mezi modelovanými a pozorovanými průtoky. Tento postup zajišťuje, že simulované řady zachovávají realistickou dynamiku průtoků a současně umožňují testování adaptivního řízení nádrží při scénářích postupně zhoršovaných hydrologických podmínek vyplývajících z klimatického modelu. Výsledné hydrologické řady tvoří konzistentní vstup pro simulace provozu vybraných nádrží s aplikací adaptivního řízení a umožňují komplexní hodnocení účinnosti navržených regulačních pravidel jak pro současné klimatické podmínky, tak pro výhledové podmínky odpovídající rokům 2050 a 2100. Tento přístup zajišťuje, že testování adaptivního řízení probíhá na realistických, klimaticky a provozně podložených scénářích, přičemž zachovává srozumitelnou interpretaci výsledků a umožňuje jednoznačně kvantifikovat přínos jednotlivých regulačních opatření.

Metodika adaptivního řízení

Prvním a zásadním krokem v rámci adaptivního řízení je sestavení dispečerských grafů. Dispečerský graf představuje klíčovou pomůcku pro řízení odtoku z nádrže, neboť definuje vztah mezi velikostí nadlepšeného odtoku v závislosti na aktuálním stavu naplnění nádrže v průběhu roku. V zásobním prostoru zájmových nádrží byly vymezeny tři dispečerské křivky DG1, DG2 a DG3 a současně tři regulační stupně, které tento prostor vertikálně rozdělují dle obr. 1 na:

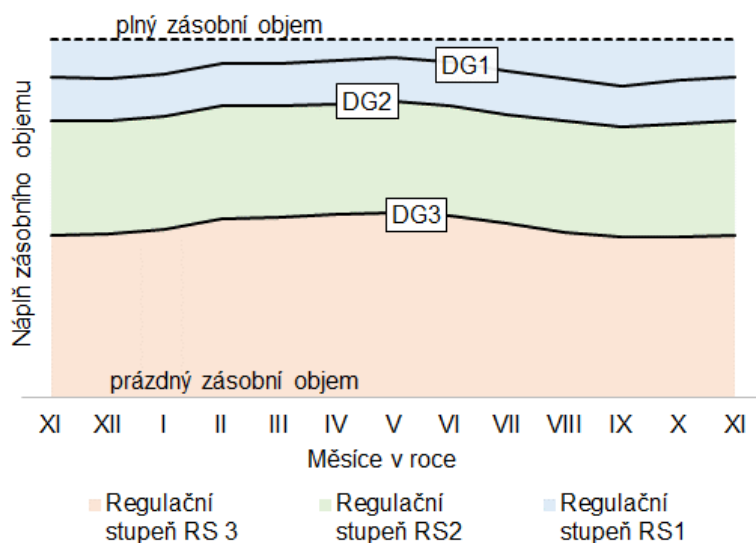
- regulační stupeň RS1 – je shora omezen plným zásobním objemem a zesponu řídicí úrovní DG2,
- regulační stupeň RS2 – je shora omezen řídicí úrovní DG2 a zesponu řídicí úrovní DG3,
- regulační stupeň RS3 – je shora omezen řídicí úrovní DG3 a zesponu kótou stálého nadržení.

Dispečerské křivky byly stanoveny tak, aby platily požadované zabezpečení pro vodárenský odběr (Op) a minimální zůstatkový průtok (MZP) pod hrázi vodního díla za předpokladu různých časových horizontů klimatické změny dle tab. 2.

Tab. 2. Podmínky pro stanovení dispečerských křivek

Tab. 2. Conditions for defining operational curves

Dispečerský graf	Klima	Vodárenský odběr (Op)	Minimální zůstatkový průtok (MZP)	Požadovaná zabezpečení dle trvání
DG1	současné klima	Op1 – dle povolení k nakládání	MZP1 – dle povolení k nakládání	98,5 % nebo 99,5 % dle významu nádrže
DG2	klima 2050	Op2	MZP2	
DG3	klima 2100	Op3 – skutečný odběr za posledních 5 let	MZP3	



Obr. 1. Schéma dispečerských křivek a regulačních stupňů pro omezování vodárenského odběru a minimálního zůstatkového průtoku

Fig. 1. Diagram of operational curves and regulation levels for reducing water supply withdrawals and minimum residual flow

Z obr. 1 a popisu vyplývá, že dispečerská křivka DG1 v tomto uspořádání neplní funkci aktivního řídicího prvku pro přechod mezi jednotlivými regulačními stupni. Prakticky při hladině v nádrži nad DG1 lze přistoupit k řízenému předvypuštění zásobního prostoru na úroveň DG1 bez ohrožení zabezpečení zásobní funkce, např. z důvodu zvýšení ochrany před povodněmi nebo optimalizace hydroenergetického využití.

Pro výpočet dispečerských křivek byla sestavena funkce, která pracuje na principu iterativního hledání minimálních hladin v nádrži. Jeho cílem je najít nejnižší bezpečnou hladinu v nádrži pro každý měsíc v roce tak, aby byla stále dodržena požadovaná zabezpečení. Algoritmus pro každý klimatický scénář generuje samostatnou dispečerskou křivku na základě zadaných cílových hodnot odběru Op a minimálního zůstatkového průtoku MZP.

Podstata adaptivního řízení v tomto algoritmu spočívá v dynamické reakci na aktuální stav naplnění nádrže. Zatímco klasické řízení počítá s fixním odběrem, tento model aktivně mění své cíle podle situace. Na základě porovnání aktuálního objemu vody v zásobním prostoru s křivkami dispečerského grafu dochází pro vodárenský odběr Op k okamžitému přepínání mezi třemi režimy:

- plný provoz – pokud je vody dostatek, tedy pokud je aktuální objem v pásmu prvního regulačního stupně, odebírá se maximum Op1 a MZP1 dle platného povolení k nakládání,
- omezený provoz – při poklesu hladiny do pásma druhého regulačního stupně se automaticky sníží nároky odběru na Op2 a MZP2,
- minimální provoz – při poklesu hladiny do pásma třetího regulačního stupně se automaticky sníží nároky odběru na Op3 a MZP3, čímž je zajištěno, že se nádrž zcela nevyčerpá a je schopna zajistit alespoň minimální dodávku po delší dobu.

Pro každou z řešených nádrží byly limitní hodnoty Op1 až Op3 stanoveny v rozmezí od povoleného odběru dle platného povolení k nakládání s vodami až po úroveň skutečně realizovaných odběrů. Tento přístup umožnil testovat adaptivní reakci systému v reálném rozptylu provozních potřeb konkrétního vodního díla. Obdobným způsobem bylo přistupováno k hodnotám MZP, kde byla snaha zachovat první i druhou úroveň na jeho plné výši. K redukci na nižší hodnotu docházelo teprve při poklesu do pásma třetího regulačního stupně, aby byla v krizových situacích maximálně podpořena ochrana zbývajících zásob vody v nádrži.

Vyhodnocení účinnosti adaptivního řízení

Navržený metodický postup je podrobněji demonstrován pro řízení nádrže Klíčava. Vodní nádrž Klíčava se nachází v povodí Vltavy na potoce Klíčava, který je levostranným přítokem Berounky. Hráz vodního díla je situována v km 3,1 v katastru obce Zbečno ve Středočeském kraji. Rozdělení prostorů nádrže Klíčava je uvedeno v tab. 3.

Tab. 3. Rozdělení prostorů v nádrži Klíčava

Tab. 3. Division of storage zones in the Klíčava reservoir

Prostor	Od [m n. m.]	Do [m n. m.]	Objem [mil. m ³]
Stálé nadržení	259,60	267,60	0,119

Zásobní	267,60	293,70	7,860
Ochranný ovladatelný	293,70	294,60	0,537
Ochranný neovladatelný	294,60	296,91	1,598
Celkový	259,60	296,91	10,150

Vodní nádrž Klíčava zajišťuje svou funkcí následující účely, které jsou seřazeny podle důležitosti:

1. Hlavním účelem je akumulace vody pro úpravnu vody Klíčava, kterou provozují Středočeské vodárny, a. s. Průměrný povolený odběr vody činí $110 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální $140 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Vodárenský odběr je realizován etážovým vodárenským zařízením, jehož průtok je regulován místním uzávěrem v objektu úpravny vody.
2. Zajištění MZP v profilu pod hrází, jehož hodnota odpovídá $Q_{364d} = 12 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Podle dlouhodobých pozorování dochází v povodí Klíčavy často k úplnému vyschnutí přítoků, které může trvat několik dnů až týdnů, výjimečně i měsíců.
3. Zlepšení hygienických podmínek a kvality vody v toku pod hrází prostřednictvím manipulačních zásahů.
4. Snížení povodňových průtoků pomocí retenčního prostoru. Neškodný průtok pod vodním dílem je stanoven na $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

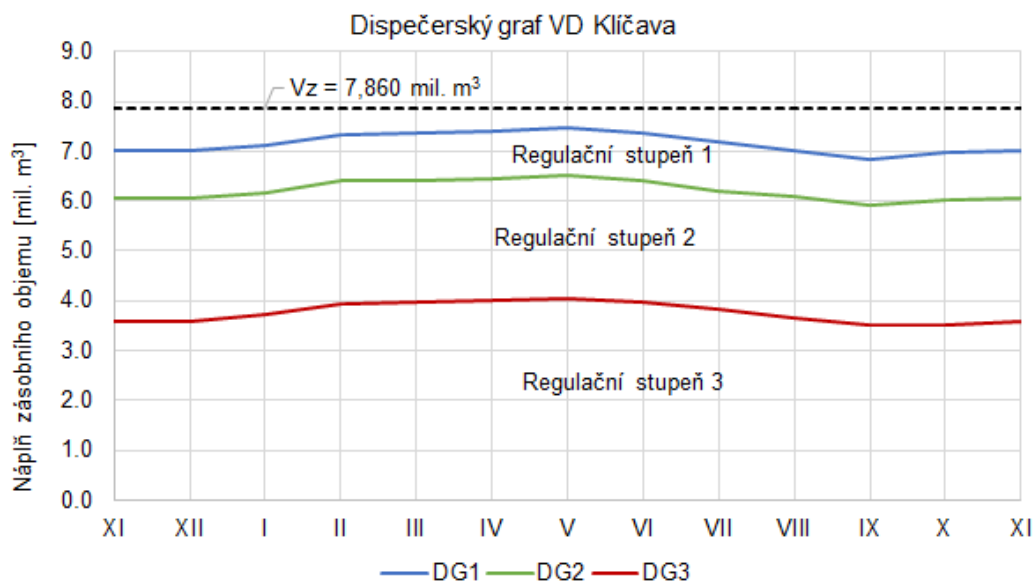
Nádrž zásobuje pitnou vodou méně než 50 000 obyvatel a zajišťuje MZP pod hrází. Z pohledu normy ČSN 75 2405 [18] je nádrž Klíčava dle významu zařazena do kategorie B a je nutné zajistit požadovanou zabezpečenost dle trvání alespoň $\geq 98,5 \%$.

Pro nádrž Klíčava byla stanovena pravidla jednotlivých regulačních stupňů (*tab. 4*) tak, že první stupeň zajišťuje odběr dle povolení k nakládání s vodami, zatímco třetí stupeň omezuje odběr pro úpravnu vody na skutečnou průměrnou hodnotu za posledních pět let provozu. Druhý stupeň je zvolen jako přechodný. V prvním a druhém stupni je zachován MZP v plné výši a ve třetím regulačním stupni je MZP redukován na poloviční hodnotu. Výslednou podobu dispečerských grafů a regulačních stupňů znázorňuje *obr. 2*.

Tab. 4. Regulační stupně s omezeními vodárenského odběru (Op) a minimálního zůstatkového průtoku (MZP)

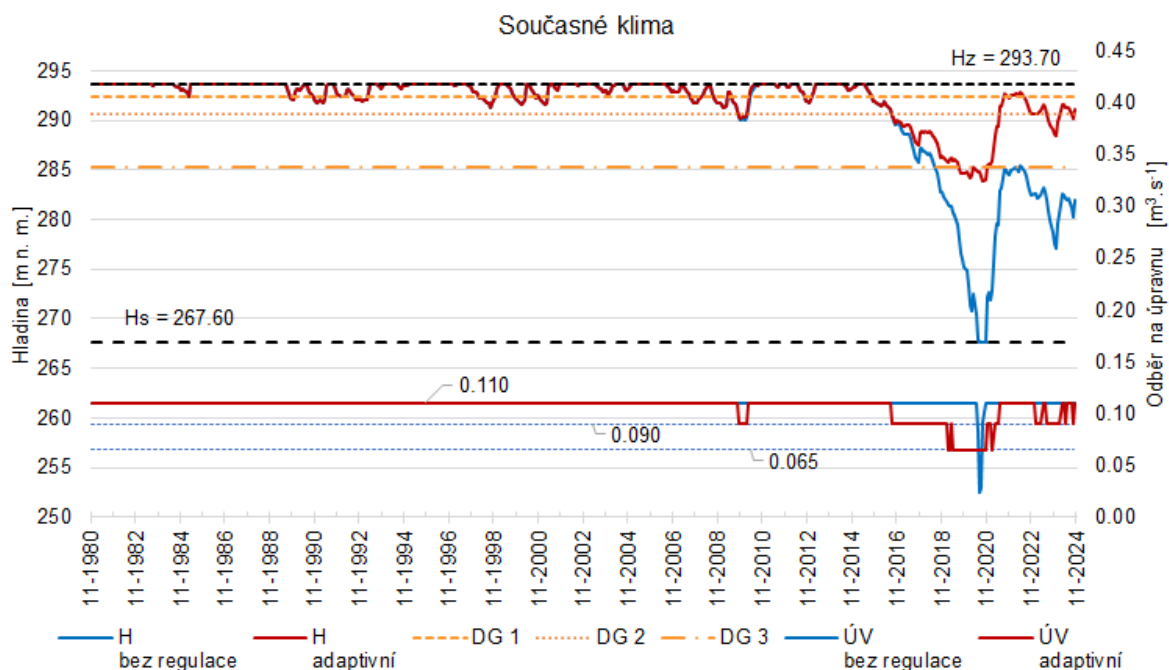
Tab. 4. Regulation levels with restrictions on water supply withdrawals (Op) and minimum residual flow (MZP)

Regulační stupeň	Op [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$]	MZP [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$]
RS 1	110	12
RS 2	90	12
RS 3	65	6



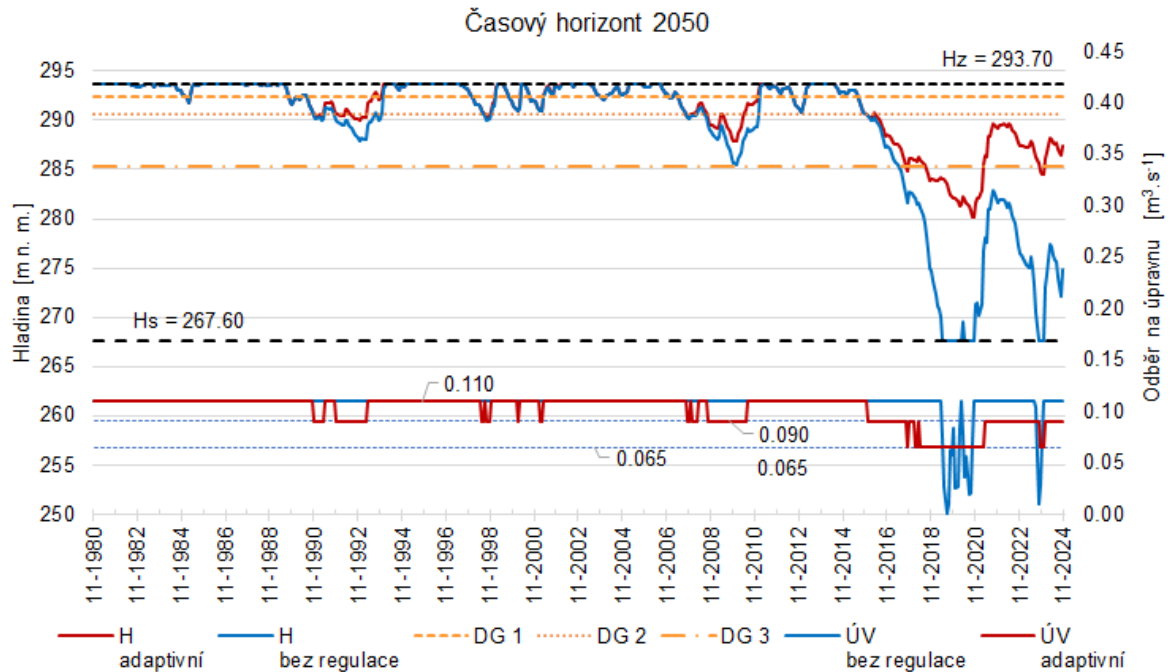
Obr. 2. Dispečerský graf a regulační stupně pro nádrž Klíčava
 Fig. 2. Operational curves (DG) and regulation levels for the Klíčava reservoir

Pro názornost byly zařazeny grafy průběhu hladiny vody v nádrži a vodárenských odběrů pro řízení nádrže na konstantní odběr a MZP bez omezování dle povolení k nakládání a při adaptivním řízení. Grafy jsou znázorněny v *obr. 3* pro současné klimatické podmínky, v *obr. 4* pro klimatické podmínky časového horizontu 2050 a v *obr. 5* pro klima časového horizontu 2100. Z průběhů hladin a vodárenských odběrů je patrné, že adaptivní řízení přispělo k výraznému zmírnění kolísání hladiny, přičemž reálný odběr pro úpravnu vody $65 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ zůstává zajištěn až k roku 2010. Oproti tomu v režimu klasického řízení lze pozorovat, že v několika případech dodávka vody klesla hluboko pod úroveň současných požadavků, a to zejména pro vzdálené časové horizonty klimatické změny.



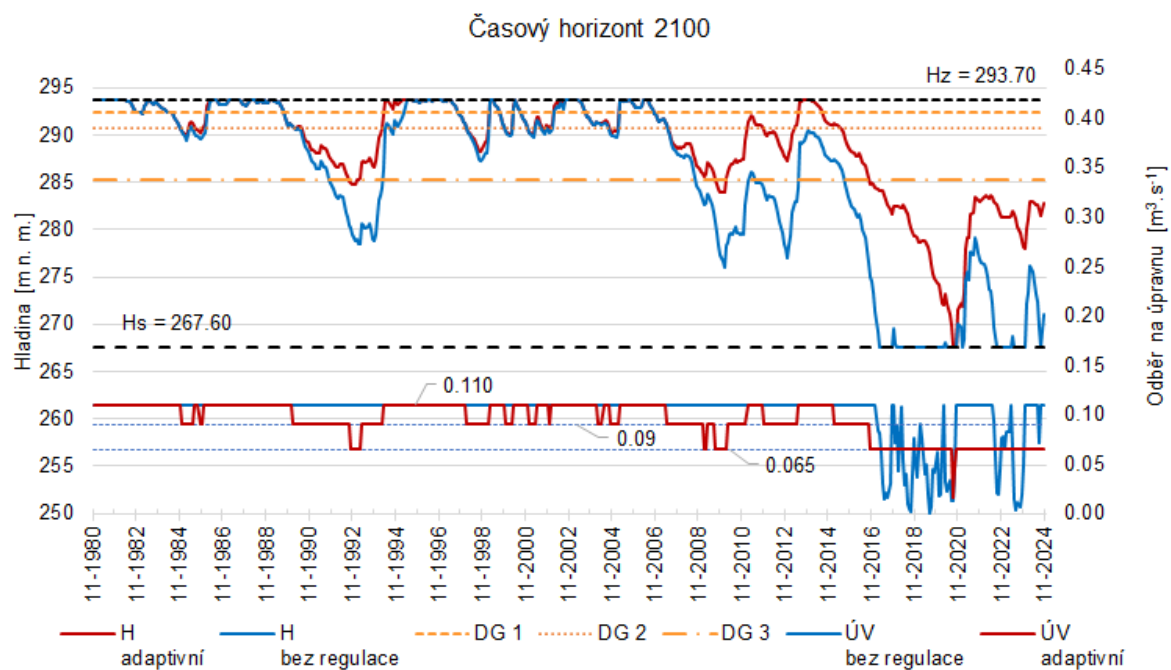
Obr. 3. Porovnání průběhu hladin a odběru na úpravnu vody při řízení na konstantní odběr a adaptivním řízení nádrže Klíčava – současné klima

Fig. 3. Comparison of water levels and supply to the treatment plant under constant withdrawal and adaptive reservoir management – current climate, Klíčava reservoir



Obr. 4. Porovnání průběhu hladin a odběru na úpravnu vody při řízení na konstantní odběr a adaptivním řízení nádrže Klíčava – klima 2050

Fig. 4. Comparison of water levels and supply to the treatment plant under constant withdrawal and adaptive reservoir management – climate 2050, Klíčava reservoir



Obr. 5. Porovnání průběhu hladin a odběru na úpravnu vody při řízení na konstantní odběr a adaptivním řízení nádrže Klíčava – klima 2100

Fig. 5. Comparison of water levels and supply to the treatment plant under constant withdrawal and adaptive reservoir management – climate 2100, Klíčava reservoir

Rozdíly mezi řízením na konstantní odběr dle povolení k nakládání a adaptivním řízením kvantifikuje také *tab. 5*. Tabulka obsahuje hodnoty zabezpečení dle trvání pt pro nádrž Klíčava a pro další analyzované nádrže: Obecnice, Láz, Pilská, Vrchlice a Švihov. Zvýrazněné jsou buňky, kde je zajištěna požadovaná zabezpečení odběru. V případě nádrže Švihov bylo adaptivní řízení připraveno s využitím dvou regulačních stupňů na podkladě tzv. středního klimatického scénáře pro vodní hospodářství v ČR [14]. Návrh řízení byl zpracován v rámci studie [19] a odvozená pravidla pro adaptivní omezování odběru byla implementována do manipulačního řádu nádrže. Pro optimalizaci dispečerských náplní byly využity také generované syntetické řady délky 1 000 let odvozené pro podmínky současného klimatu a klimatu časového horizontu 2041–2060 dle [14]. Pro časový horizont roku 2100 nebyla pravidla adaptivního řízení do řešení uvažována, protože se předpokládá jejich budoucí aktualizace.

Tab. 5. Porovnání zabezpečení vodárenských odběrů při řízení na konstantní odběr a MZP dle povolení k nakládání a při adaptivním řízení pro studované nádrže

Tab. 5. Comparison of water supply reliability under constant withdrawal and minimum residual flow according to the water permit versus adaptive management for the studied reservoirs

Zabezpečení pt [%] vodárenského odběru		Současné klima		Klima 2050		Klima 2100	
Nádrž	Řízení	Povolený odběr	Skutečný odběr	Povolený odběr	Skutečný odběr	Povolený odběr	Skutečný odběr
Klíčava	Klasické	99.1	99.5	96.1	97.4	88.9	91.7
	Adaptivní	85.3	99.9	68.8	99.9	48.8	99.5
Obecnice	Klasické	99.1	99.7	97.7	99.5	93.9	98.3
	Adaptivní	93.7	99.9	89.2	99.9	79.5	99.7
Láz	Klasické	99.9	99.9	99.9	99.9	99.5	99.5
	Adaptivní	99.9	99.9	99.5	99.9	98.3	99.9
Pilská	Klasické	99.9	99.9	99.7	99.9	96.6	97.2
	Adaptivní	99.9	99.9	98.5	99.9	87.1	99.5
Vrchlice	Klasické	92.2	94.5	88.1	90.9	81.5	86.6
	Adaptivní	65.9	99.9	60.1	99.9	48.2	99.6
Švihov	Klasické	99.3	99.6	97.1	97.8		
	Adaptivní	97.0	100.0	90.6	99.5		

Výsledky shrnuté v *tab. 5* dokumentují účinnost navrženého adaptivního řízení, které bylo otestováno na souboru vybraných vodárenských nádrží. Ve všech případech je možné díky včasnému omezování odběrů zajistit požadovanou spolehlivost vodárenského odběru pro všechny posuzované horizonty klimatické změny. Simulace dále ukazují, že přínos adaptivního řízení se s rostoucím horizontem klimatické změny zvyšuje. Zatímco při současných hydrologických podmínkách jsou rozdíly mezi klasickým a adaptivním řízením relativně malé, v podmínkách scénářů pro rok 2050 a zejména 2100 se adaptivní přístup stává klíčovým nástrojem pro zachování přijatelné úrovně zabezpečení vodárenských odběrů. Tento trend potvrzuje, že význam nestrukturálních opatření bude v budoucnu pravděpodobně narůstat. Je však třeba zdůraznit, že výsledky simulací jsou zatíženy určitými nejistotami vyplývajícími z

použitých klimatických a hydrologických modelů. V této studii byl z metodických důvodů použit jeden reprezentativní klimatický scénář, který umožňuje konzistentní interpretaci chování navrženého systému řízení. V budoucnu by však bylo vhodné uvažovat širší soubor klimatických scénářů a provést analýzu robustnosti navržených pravidel vůči nejistotám budoucího vývoje klimatu.

ZÁVĚR

Z dosažených výsledků vyplývá, že adaptivní řízení představuje klíčový a nezbytný nástroj pro budoucí provozování vodárenských nádrží v podmínkách klimatické změny. Umožňuje nalézt provozně přijatelný kompromis mezi požadavky odběratelů a reálnými možnostmi vodních zdrojů, zvyšuje provozní bezpečnost vodních děl a přispívá k dlouhodobé udržitelnosti vodního hospodářství. Současně má adaptivní řízení příznivý dopad na jakost vody v nádržích, neboť omezením hlubokých a dlouhodobých poklesů hladiny přispívá ke stabilnějším teplotním a kvalitativním poměrům v nádrži. Tím se snižuje riziko rozvoje eutrofizačních procesů a zhoršování kvality surové vody, které lze v podmínkách oteplujícího se klimatu očekávat častěji. Navržený přístup lze současně chápat jako účinné nestrukturální adaptační opatření, které je plně slučitelné se stávajícími legislativními rámci a poskytuje praktický základ pro úpravy manipulačních řádů vodních nádrží v ČR. Zároveň je však třeba připravovat nové vodní nádrže a rozšiřovat kapacity akumulace zejména v deficitních oblastech, aby bylo možné dlouhodobě zajistit dostatek vody pro budoucí odběry a zvýšenou variabilitu hydrologických podmínek v důsledku klimatické změny.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury ČR v rámci financování výzkumného projektu č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda)“, řešeného v letech 2020–2026.

Literatura

- [1] NEELAKANTAN, T. R., SASIREKA, K. Review of Hedging Rules Applied to Reservoir Operation. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015, 7(5), s. 1 571–1 580. ISSN 0975-4024.
- [2] HASHIMOTO, T., STEDINGER, J. R., LOUCKS, D. P. Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resources Research*. 1982, 18(1), s. 14–20. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>
- [3] MOY, W. S., COHON, J. L., REVELLE, C. S. A Programming Model for Analysis of Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir. *Water Resources Research*. 1986, 22(4), s. 489–498. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR022i004p00489>
- [4] NACHÁZEL, K., PATERA, A. Citlivost adaptivního řízení sezonních nádrží v reálném čase na typ ztrátové funkce a dobu předstihu předpovědi. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 1988, 36(6), s. 608–638.
- [5] NACHÁZEL, K., PATERA, A. Možnosti využití principu adaptivity pro řízení nádrží v reálném čase. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 1988, 36(3), s. 237–285.
- [6] AHMADI, M., HADDAD, O. B., LOÁICIGA, H. A. Adaptive Reservoir Operation Rules under Climatic Change. *Water Resources Management*. 2015, 29(4), s. 1 247–1 266. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0871-0>

- [7] MARTON, D., KNOPPOVÁ, K. Developing Hydrological and Reservoir Models under Deep Uncertainty of Climate Change: Robustness of Water Supply Reservoir. *Water Supply*. 2019, 19(8), s. 2 222–2 230. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/ws.2019.102>
- [8] MARTON, D., MENŠÍK, P., STARÝ, M. Using Predictive Model for Strategic Control of Multi-Reservoir System Storage Capacity. *Procedia Engineering*. 2015, 119, s. 994–1 002. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.991>
- [9] FU, G., NI, G., ZHANG, C. (eds.). Adaptive Catchment Management and Reservoir Operation [on-line]. *Water*. 2018, 10(10). Dostupné z: https://www.mdpi.com/journal/water/special_issues/Adaptive_Catchment_Reservoir_Operation
- [10] ESPANMANESH, V., GUILPART, E., BOURGAULT, M.-A., TILMANT, A. Adapting Reservoir Operation to Climate Change in Regions with Long-Term Hydrologic Persistence [on-line]. *Climate Risk Management*. 2024, 45, 100623. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100623>
- [11] KIM, G. J., SEO, S. B., KIM, Y. O. Adaptive Reservoir Management by Reforming the Zone-Based Hedging Rules Against Multi-Year Droughts. *Water Resources Management*. 2022, 36(10), s. 1–16. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03214-0>
- [12] TABAS, S. S., SAMADI, V. Fill-and-Spill: Deep Reinforcement Learning Policy Gradient Methods for Reservoir Operation Decision and Control [on-line]. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2024, 150(7), 04024022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6089>
- [13] FOŠUMPAUR, P. *Vodohospodářské řešení vodohospodářské soustavy povodí Odry v podmínkách klimatické změny. Závěrečná zpráva*. Praha, 2020.
- [14] VIZINA, A., HANEL, M. et al. *Střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v České republice. Zprávy pro státní podniky povodí*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2019.
- [15] VIZINA, A., GEORGIEOVÁ, 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. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2024.09.003>
- [16] PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation. *Journal of Hydrology*. 2003, 279(1–4), s. 275–289. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- [17] VALÉRY, A., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C. “As Simple as Possible but Not Simpler”: What is Useful in a Temperature-Based Snow-Accounting Routine? Part 2 – Sensitivity Analysis of the Cemaneige Snow Accounting Routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology*. 2014, 517, s. 1 176–1 187. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.058>
- [18] ČSN 75 2405. *Vodohospodářská řešení vodních nádrží*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [19] FOŠUMPAUR, P. *Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže Švihov na Želivce*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2020.

Autoři

doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

fosumpaur@fsv.cvut.cz

ORCID: 0000-0001-6702-5235

Ing. Tereza Kováčová
kovacter@student.cvut.cz

Fakulta stavební ČVUT v Praze (Česká republika)

Príspevek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.005

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

METHODOLOGY FOR ADAPTIVE MANAGEMENT OF WATER RESERVOIRS DURING HYDROLOGICAL DROUGHT

FOŠUMPAUR, P.; KOVÁČOVÁ, T.

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

Keywords: adaptive management – water reservoir – hydrological drought – climate change – operational curve – supply reliability

The article presents a methodology for adaptive water reservoir management designed to ensure reliable water supply in conditions of hydrological drought and climate change. The proposed approach combines hydrological modelling, climate change scenarios, and optimization of operational curves with regulation levels. The management system allows for flexible restrictions on water withdrawals and adjustment of minimum residual flows depending on the current state of the reservoir. A pilot verification of the methodology was carried out on selected Czech reservoirs (Švihov, Klíčava, Žlutice, Obecnice, Pilská, Láz, Vrchlice) for current climate conditions and outlooks for 2050 and 2100, with hydrological inputs modelled using GR4J and CemaNeige models, calibrated on historical data and corrected for future climate scenarios. The results show that adaptive management significantly increases the reliability of water supply, and minimizes the risk of severe water supply disruptions, while reducing water level fluctuations in reservoirs with beneficial effects on water quality. Compared to conventional control based on constant withdrawals, this approach allows for timely and gradual regulation of withdrawals, thereby spreading the effects of drought over time and increasing the robustness of reservoir operation. The proposed framework represents a universally applicable non-structural measure, fully compatible with existing legislation, supporting long-term sustainable water resource management and providing a practical tool for adjusting water reservoir management rules.