

Digitální dvojče povodí: nástroj pro modelování adaptačních opatření na retenci vody v krajině zasažené změnou klimatu

JANA BERNSTEINOVÁ, EVŽEN ZEMAN, MAXIM BERNSTEIN, VÁCLAV RÁRA, MILAN FISCHER, PAVEL TACHECÍ, MIROSLAV TRNKA

Klíčová slova: digitální dvojče povodí – MIKE SHE – klimatická změna – adaptační opatření – vodní bilance – základní odtok

ABSTRAKT

Technologie digitální dvojče povodí (Digital Twin) představuje pokročilý nástroj pro posuzování vlivu komplexních adaptačních opatření na vodní bilanci v kontextu probíhající klimatické změny. Integrovaný, plně distribuovaný, fyzikálně založený modelovací systém MIKE SHE tvoří základ digitálního dvojčete navrženého pro detailní simulace hydrologického cyklu. Na příkladu povodí Dyje a pilotního povodí horní Svratky byla testována, navržena a kvantifikována specifická opatření pro podporu přirozené infiltrace a nadlepšení základního odtoku. Vliv klimatické změny byl hodnocen pomocí ansámblu 26 nezávislých klimatických scénářů vycházejících z globálních klimatických modelů (CMIP6) pro horizont roku 2050 v porovnání s referenčním historickým obdobím 1981–2010. Výsledky simulací bez zavedených opatření predikují pokles středních a nízkých průtoků. Modelové testy prokázaly, že zavedení komplexního souboru opatření nazvaného „hydrologicky optimální zemědělství“ zahrnujícího úpravu hydropedologických vlastností půdy a změnu vegetačního krytu, sice nezvýší celkový objem odtoku, ale má prokazatelný potenciál zpomalit odtok z dotčených lokalit a nadlepit základní odtok. Vybudovaný simulační nástroj je na daném území plně kalibrován a představuje robustní podporu pro rozhodovací procesy v managementu povodí.

ÚVOD

Racionální hospodaření s vodními zdroji čelí v současnosti bezprecedentním výzvám plynoucím z probíhající změny klimatu a z ní pramenících rizik pro vodní bilanci. Pro zachování funkčních ekosystémů je v tomto kontextu nezbytné zaměřit se na komplexní podporu přirozené infiltrace prostřednictvím retence vody v krajině. Strategickým cílem moderních adaptačních opatření je především posílení základního odtoku, zajištění vyšší infiltrace do podzemních vod a transformace povodňových vln. Tyto kroky bezprostředně směřují ke zlepšení celkové zabezpečenosti zdrojů povrchových i podzemních vod. Spolehlivé hodnocení vlivu klimatické změny a návrh účinných adaptačních strategií se neobejde bez pokročilých simulačních nástrojů, zatížených uceleným ansámblem klimatických scénářů, které spolehlivě pokrývají interval prognostické nejistoty.

Pro řešení těchto komplexních interdisciplinárních otázek již tradiční statické modely nedostačují. Inovativní odpovědí je budování technologie označované jako digitální dvojče (Digital Twin), původně vyvinuté pro průmyslové aplikace, která se v posledních letech etabluje v environmentálních vědách [1]. Přestože přesná definice pojmu není jednotná [2], digitální dvojče ve vodním hospodářství a hydrologii představuje slibný nástroj pro integrovaný management povodí, predikci povodní či optimalizaci vodárenských soustav [3, 4, 5]. Definice se povětšinou shodují na tom, že jde o virtuální repliku fyzického prostředí, která propojuje pokročilou analýzu dat s procesním modelováním a zahrnuje asimilaci měřených

dat v reálném čase včetně obousměrné zpětnovazební interakce. Vývoj takto komplexního systému je postupný proces, avšak výpočetní architektura představovaného nástroje digitální dvojče povodí Dyje umožňuje chod v reálném čase pro řešení otázek v operativním provozu, jako je adaptivní řízení odběrů či varovný systém pro epizody sucha.

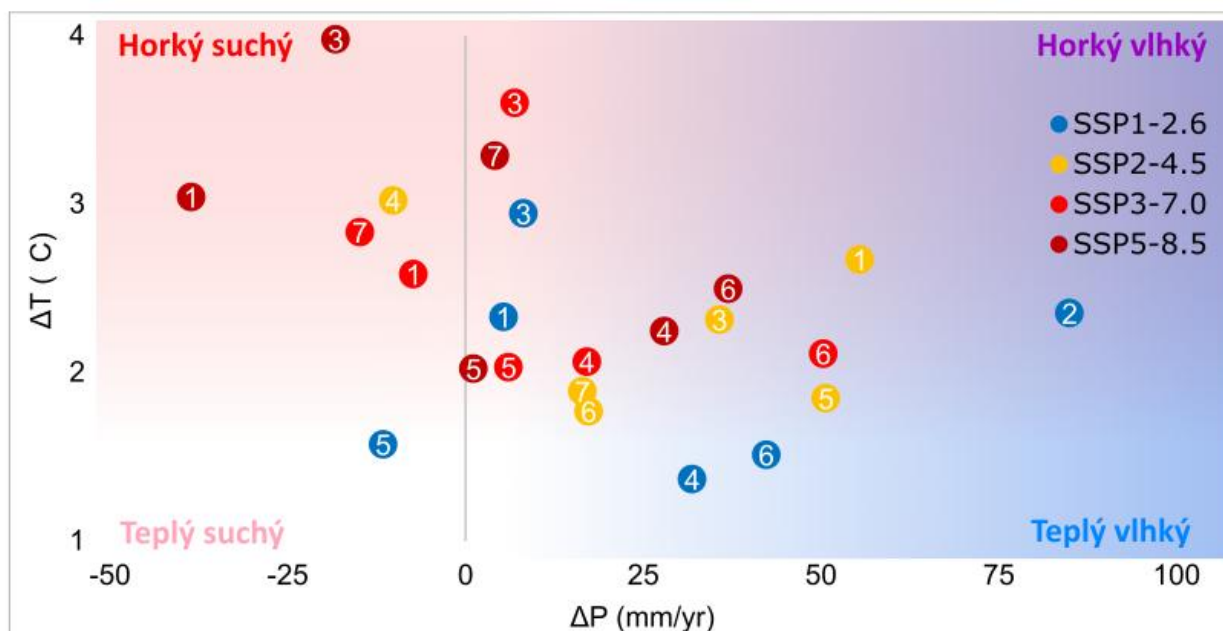
Cílem tohoto článku je představit jádrový prvek digitálního dvojčete povodí Dyje, pokročilý scénářový model, vybudovaný pro kvantitativní a kvalitativní zhodnocení povodí s napjatou vodní bilancí. Hlavní výhodou fyzikálně založeného procesního modelu, který vyžaduje exaktní pochopení hydrologických procesů v krajině, je možnost virtuálně testovat plošné i liniové změny bez rizika negativních vlivů na reálné prostředí. Nástroj je založen na integrovaném hydrologickém modelovacím systému MIKE SHE a aplikován na případové studii povodí Dyje v regionálním měřítku a povodí horní Svratky v měřítku pilotním. Představený metodický postup dokládá připravenost nástroje k detailnímu posuzování vlivu komplexních adaptačních opatření na vodní bilanci, integruje ansámbl klimatických scénářů a vyhodnocuje možnosti zmírnění dopadů klimatické změny na základní odtok pomocí systémové adaptace krajiny.

METODIKA

Scénáře klimatické změny

Pro detailní posouzení vývoje hydrologické bilance na konci 21. století byly využity klimatické projekce z globálních cirkulačních modelů (GCM) generace CMIP6. Zvolený soubor dat pokrývá čtyři scénáře socioekonomického vývoje (Shared Socioeconomic Pathways, SSP): SSP1–2.6 (Udržitelný rozvoj), SSP2–4.5 (Střední cesta vývoje), SSP3–7.0 (Regionální rivalita) a SSP5–8.5 (Společnost založená na fosilních palivech). Z původní sady přibližně 30 modelů byla na základě validace pro území ČR [6] vybrána reprezentativní podmnožina sedmi nejlépe fungujících modelů zachycující nejistotu celého souboru (CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, CNRM-CM6-1-HR a TaiESM1).

Celkový predikční ansámbl tvořilo 26 nezávislých modelových běhů CMIP6 (*obr. 1*), hodnocených vůči referenčnímu stavu (klimatický normál 1981–2010) v horizontu roku 2050 (2034–2064).



Obr. 1. Rozdíly průměrných klimatických charakteristik 26 GCM v prognóze 2050 (2034–2064) od referenčních podmínek (1981–2010) agregovány v povodí řeky Dyje. Scénáře SSP jsou rozlišeny charakteristickými barvami [7]. Jednotlivé GCM využité v této studii jsou očíslovány: (1), CMCC-ESM2, (2) CNRM-CM6-1-HR, (3) EC-EARTH3, (4) GFDL-ESM4, (5) MPI-ESM1-2-HR, (6) MRI-ESM2-0, and (7) TaiESM1

Fig.1 Differences in mean climate characteristics of 26 GCMs in the 2050 projection compared to the reference conditions (1981–2010), aggregated for the Thaya River basin. The SSP scenarios are distinguished by characteristic colors [7]. The individual GCMs used in this study are numbered as follows: (1) CMCC-ESM2, (2) CNRM-CM6-1-HR, (3) EC-EARTH3, (4) GFDL-ESM4, (5) MPI-ESM1-2-HR, (6) MRI-ESM2-0, and (7) TaiESM1

Ansámbl modelů vykazuje vysokou míru variability a absenci konzistentního prostorového vzorce vývoje srážek (a to i v rámci jednotlivých SSP scénářů). Ačkoliv je scénář SSP1–2.6 obecně spojován s relativně mírnějším oteplením a menšími změnami srážkových režimů, zatímco SSP5–8.5 představuje velmi silné oteplení se zásadními změnami srážek, nelze napříč modely v jednotlivých SSP scénářích identifikovat žádný konzistentní prostorový vzorec vývoje. Variabilita mezi jednotlivými modely z hlediska dlouhodobých průměrů se navíc v jednotlivých dekádách budoucího období výrazně liší. Pro pochopení a objektivní a spolehlivou kvantifikaci nejistoty spojené se změnou klimatu je tudíž nezbytné vždy vyhodnocovat celý klimatický predikční ansámbl namísto určování konkrétního středního scénáře.

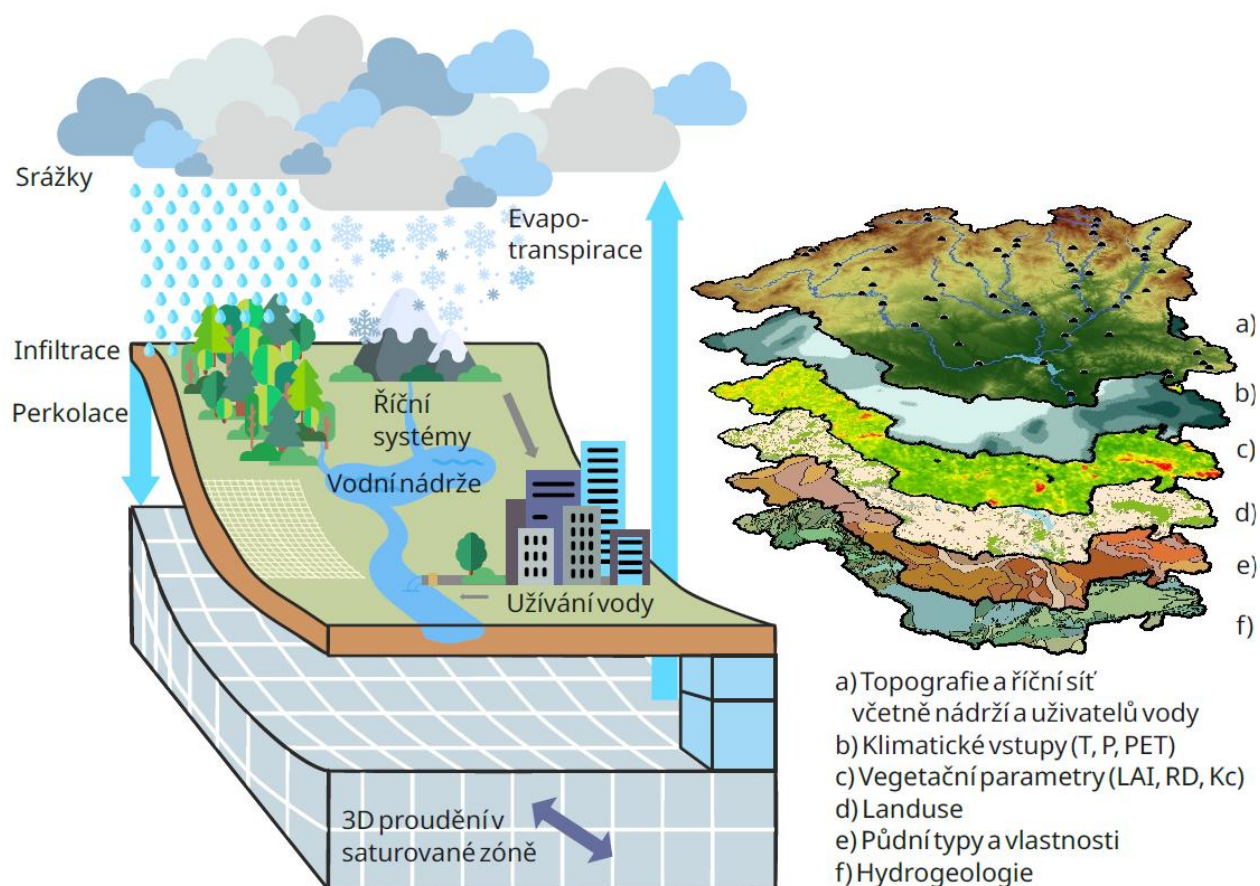
Vzhledem k hrubému prostorovému rozlišení a systematickým chybám globálních modelů byly jejich výstupy transformovány metodou přímé modifikace (Advanced Delta Change, ADC) s využitím pozorovaných časových řad reprezentujících místně specifické klimatické podmínky referenčního období 1981–2010. Tento postup integruje do procesu transformace změny v průměrech i variabilitě, čímž zohledňuje odlišný posun extrémů oproti průměrům a kompenzuje systematické chyby srážkových simulací [8]. Průměrná denní teplota a srážkové úhrny vstoupily do modelovacího procesu přímo ve formě okrajových podmínek, zatímco referenční evapotranspirace (ET_o) byla vypočtena pomocí standardní rovnice Penman-Monteith.

Digitální dvojče povodí

Základem digitálního dvojčete povodí Dyje je plně distribuovaný a fyzikálně založený modelovací systém MIKE SHE (obr. 2), navržený k simulaci komplexních hydrologických procesů napříč vodohospodářskými segmenty [9, 10]. Prostorová diskretizace v regionálním měřítku využívá ortogonální síť s buňkou 500 × 500 m.

Výměna dat mezi moduly probíhá v denním kroku, simulační jádra však pracují s jemnějším časovým dělením dle své vnitřní dynamiky. Povrchový odtok je řešen dvoudimenzionální aproximací difuzní vlny, dynamicky provázanou s prouděním v korytech. Procesy v nenasycené zóně popisuje jednodimenzionální Richardsova rovnice (včetně vlivu makropórů), zatímco nasycená zóna se řídí trojrozměrnou aproximací Boussinesqovy rovnice. Toto těsné provázání umožňuje modelovat obousměrnou interakci mezi zvodní a říční sítí (základní odtok, břehová infiltrace). Zahrnuta je rovněž evapotranspirace slučující výpar z intercepce, obnažené půdy a transpiraci. Vegetační parametry (např. index listové plochy) byly v denním kroku odvozeny ze satelitních dat senzoru MODIS na družici Terra [11]. Součástí modelu je i 17 vodních nádrží, jejichž plně dynamická simulace vychází z platných manipulačních řádů vodních děl. V neposlední

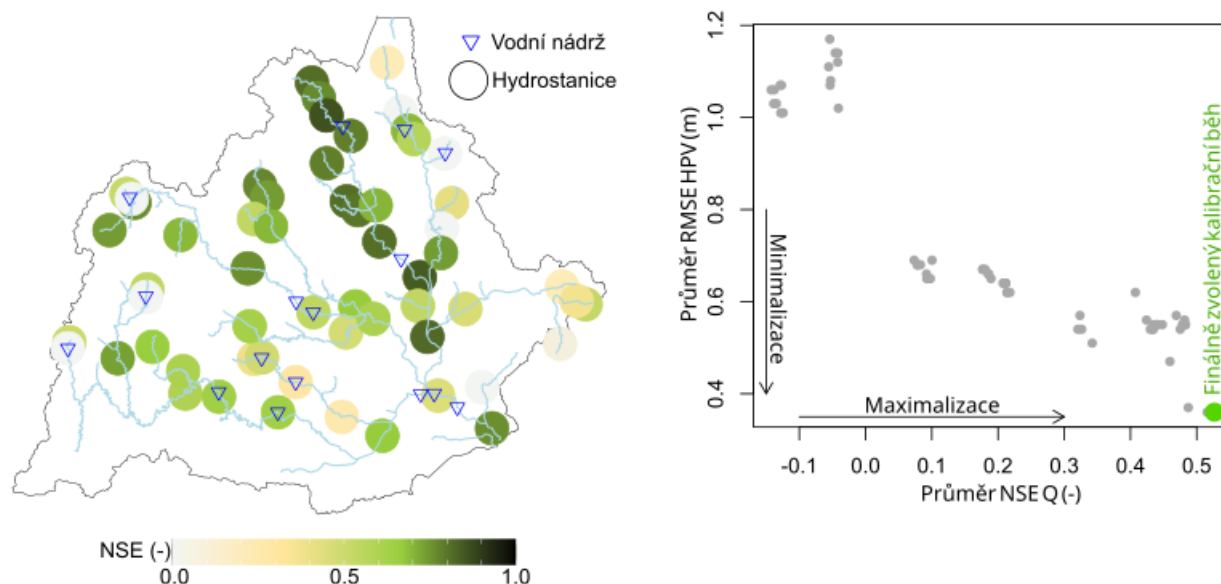
řadě jsou zahrnuta data o užívání vody vycházející z historických záznamů registrů nakládání s vodami.



Obr. 2. Schéma modelového nástroje MIKE SHE s popisem jednotlivých zahrnutých procesů (vlevo) a nákresem prostorově distribuovaných vrstev vstupních parametrů (vpravo)

Fig. 2. Scheme of the MIKE SHE modeling tool with individual included processes (left) and spatially distributed layers of input parameters (right)

Spolehlivost nástroje se opírá o měřená data z 52 limnigrafických stanic. Model byl kalibrován na hydrologicky standardním období 2000–2010 a úspěšně validován na navazující dekádě 2011–2020 (zahrnující extrémní sucho z let 2015–2018), což potvrdilo jeho robustnost i v extrémních podmínkách. Kalibrace cílila na parametry s nejvyšší mírou nejistoty a citlivosti (transmisivita nasycené zóny, charakteristiky odtoku, vegetace a tání sněhu), půdní parametry byly nastaveny na základě vlastních měření hydrogeologických vlastností včetně laboratorního stanovení retenčních křivek z kopaných sond reprezentativních lokalit povodí Dyje. Shoda průtoků byla hodnocena Nash-Sutcliffe koeficientem (NSE), hladiny podzemní vody (HPV) na 70 vrtech střední kvadratickou chybou (RMSE). Finální běh (optimalizující NSE a RMSE; obr. 3) vykázal hodnotu NSE > 0,5 u 78 % stanic. Při kalibraci byl kladen důraz na shodu celého průběhu čar překročení, se zvláštním zřetelem na oblast nízkých průtoků. Nižší efektivita kalibrace v povodí Svitavy byla způsobena limity plošné schematizace velmi složitých hydrogeologických podmínek.

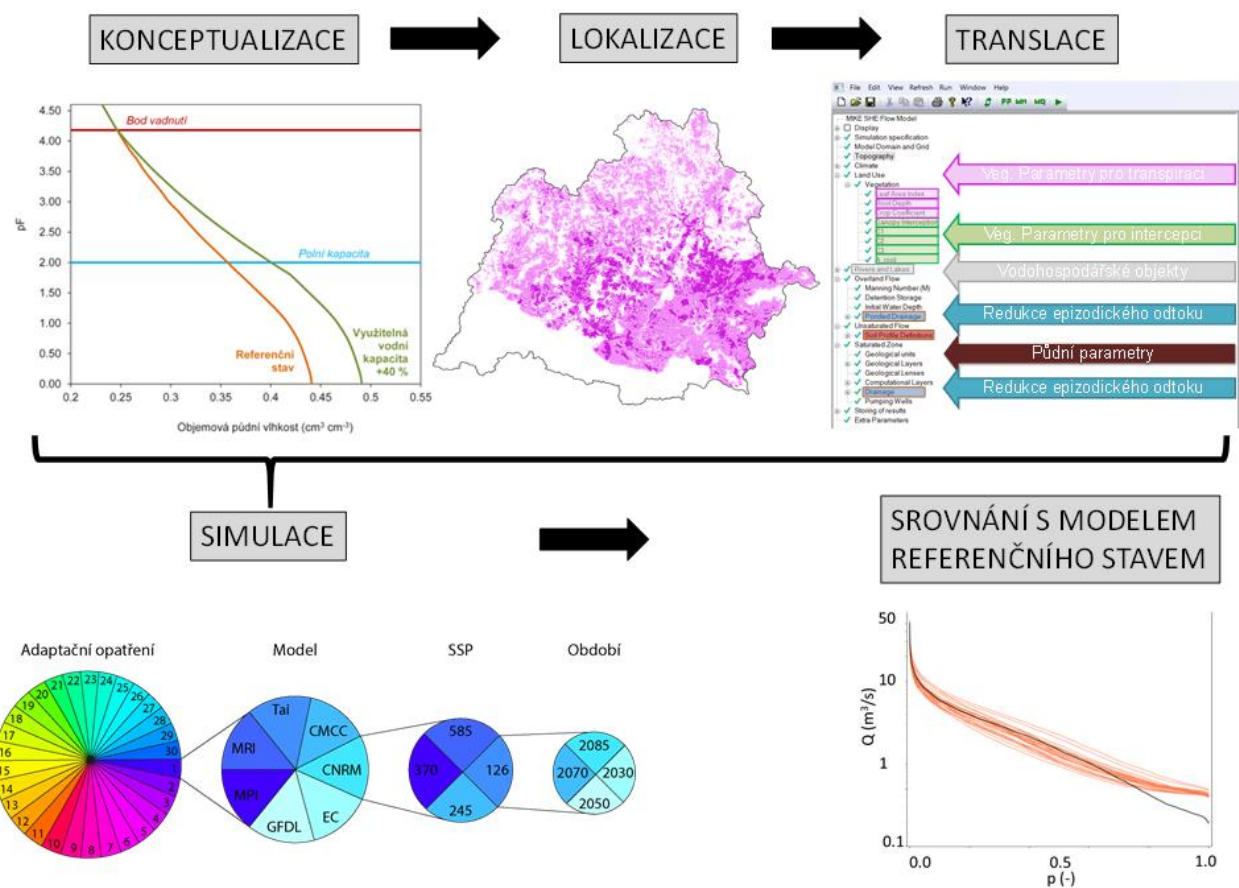


Obr. 3. Výsledky kalibrace průměrných denních průtoků v prostorovém pohledu (vlevo) a multikriteriální výběr finálního běhu na základě minimalizace hodnot RMSE simulovaných a pozorovaných hladin podzemní vody (HPV) a maximalizace hodnot NSE průměrných denních průtoků (vpravo)

Fig. 3. Results of the calibration of mean daily discharges from a spatial perspective (left) and multi-criteria selection of the final run based on minimizing the RMSE values of simulated and observed groundwater levels (GWL) and maximizing the NSE values of mean daily discharges (right)

Konceptualizace adaptačních opatření

Návrh adaptačního opatření zahrnoval několik navazujících fází (obr. 4) a opírá se o oficiální metodiku [12]. Nejprve bylo zapotřebí definovat a konceptualizovat efekt adaptačního opatření ve fyzické realitě povodí a definovat, které procesy opatření přímo ovlivní. Dále bylo zapotřebí objektivně vytipovat místa pro cílení navrhovaného opatření. Dalším krokem byla takzvaná „translace“ fyzikálních účinků opatření do jazyka modelových parametrů systému MIKE SHE a zaručení funkčnosti a logiky opatření z hlediska nelineárních zpětnovazebných vztahů parametrů ve čtyřrozměrném simulačním prostředí (3D prostor a čas) digitálního dvojčete. Tyto fáze bývají časově náročné a zahrnují iterativní proces testování vlivu navrženého opatření a sladění s očekáváním opřeným o expertní odhad, měřená data či literární rešerši. V další fázi je model se zahrnutím opatření zatížen 26 klimatickými scénáři a výsledky jednotlivých běhů jsou srovnány s modelem referenčního stavu a s výsledky budoucí prognózy bez zahrnutí adaptačních opatření.



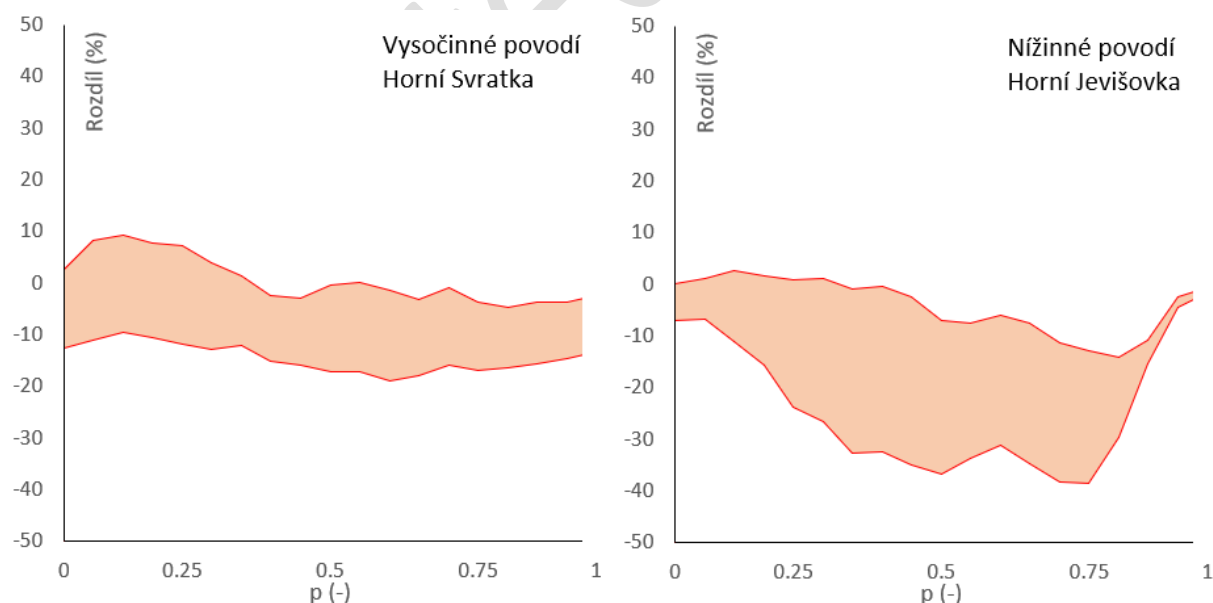
Obr. 4. Proces návrhu a hodnocení vlivu komplexního adaptačního opatření

Fig. 4. The design and impact assessment process of a complex adaptation measure

Cílem opatření nazvaného „Hydrologicky optimální zemědělství“ bylo posílit přirozenou infiltraci, retenci vody v půdě a základní odtok. Lokalizace vycházela z analýzy zranitelnosti ekosystémů, jež identifikovala největší riziko poklesu odtoků v oblastech vysočin [10]. Vzhledem k nedostatečné efektivitě izolovaných zásahů byl navržen a aplikován komplexní přístup zvaný hydrologicky optimální zemědělství. Koncept hydrologicky optimálního zemědělství teoreticky reflektuje dostupné literární zdroje, odborné interdisciplinární odhady týmu CzechGlobe a integruje synergicky působící opatření, jakými jsou bezorebné hospodaření [13], aplikace biouhlu [14], plošné mulčování [15], celoroční pokrytí půdy meziplošinami [16] a cílená podpora půdní bioty k obnově makropórů [17] s úpravami melioračních soustav ke zpomalení epizodického odtoku [18]. Součástí návrhu je také upřednostnění plodin s nižšími transpiračními nároky [19]; v našich podmínkách může takovou plodinu představovat proso. Převod úprav do logiky simulačního nástroje zahrnoval definici nového tvaru půdních retenčních křivek, zvýšení nasycené hydraulické vodivosti a posílení vertikálního toku systémem makropórů. Zpomalení rychlého odtoku bylo modelováno navýšením Manningovy drsnosti a posílením toku makropóry. Změny vegetačního krytu se řešily modifikací indexu listové plochy (LAI) a hloubky kořenové zóny, čímž mohlo digitální dvojče exaktně simulovat hydrologickou odezvu povodí.

VÝSLEDKY

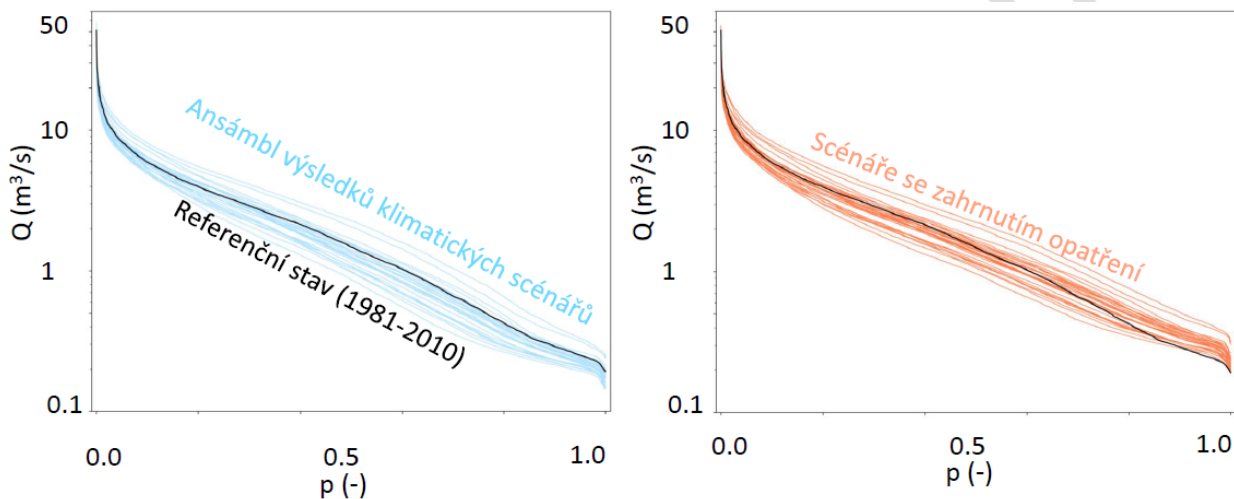
Výsledky modelování naznačují, že v horizontu roku 2050 lze na celém povodí řeky Dyje očekávat v důsledku klimatické změny pokles středních a nízkých průtoků oproti referenčnímu období. Komplexní pohled na budoucí vývoj poskytuje analýza čar překročení průměrných denních průtoků, hodnocená v intervalu percentilů P25 až P75 (obr. 5). V celém spektru průtoků je očekáván výrazný úbytek (až 20 % ve vysočinných oblastech a -40 % v nížinných oblastech), s výjimkou nejvyšších vodních stavů, kde optimistické klimatické scénáře (převážně SSP1-2.6) naopak modelují mírný nárůst. Variabilita poklesu průtoků je vyšší v nížinném povodí.



Obr. 5. Vliv klimatické změny v horizontu 2050 na čáry překročení průměrných denních průtoků se zahrnutím intervalu nejistoty (P25 až P75) klimatických scénářů ve vysočinném povodí (vlevo) a v nížinném povodí (vpravo)

Fig. 5. Impact of climate change in the 2050 projection on the flow duration curves of mean daily discharges, including the uncertainty interval (P25 to P75) of the climate scenarios, in the highland catchment (left) and the lowland catchment (right)

Modelové testy potvrdily, že zvažovaná adaptační opatření mají relevantní efekt pouze při komplexní aplikaci (úprava hydropedologických vlastností, vhodná vegetace a hospodaření zamezující utužení a rychlému epizodickému odtoku). Přestože v horizontu 2050 komplexní zemědělská opatření nepřinesou celkové navýšení dlouhodobých průtoků Q_a (nezaručí větší absolutní objem odtoku vody z povodí v dlouhodobé bilanci), zlepšují distribuci vody v rámci hydrologických situací, vedou k zadržování vody v krajině a nadlepšují základní odtok o jednotky až desítky procent (obr. 6).



Obr. 6. Vliv klimatické změny na odtoky (čáry překročení průměrných denních průtoků) v horizontu 2050 na horním toku Svatky (4420 – Dalečín). Vlevo je prognóza přímého vlivu klimatické změny, vpravo je prognóza se zavedením komplexního adaptačního opatření „hydrologicky optimální zemědělství“. Čáry překročení vycházejí z modelovaných průtoků v denním kroku. Jednotlivé barevné linie představují konkrétní modelové scénáře (26 GCMs)

Fig. 6. Impact of climate change on discharges (flow duration curves of mean daily discharges) in the 2050 horizon on the upper reaches of the Svatka River (4420 – Dalečín). Projected impact of climate change (left), projection with the implementation of the complex adaptation measure „hydrologically optimal agriculture“ (right). The flow duration curves are derived from modeled discharges at a daily time step. The individual colored lines represent specific model scenarios (26 GCMs)

DISKUZE

Hodnocení dopadů klimatické změny a návrh adaptačních strategií jsou neodmyslitelně spjatý s kaskádou nejistot. Ty pramení nejen ze samotných klimatických scénářů, ale rovněž z procesu modelování, kalibrace i z expertních odhadů při parametrizaci navrhovaných opatření [20]. Vzhledem k nezávislosti jednotlivých klimatických projekcí nelze jednoduše určit jeden univerzálně platný scénář. Pro spolehlivější zachycení budoucího vývoje je proto nezbytné pracovat s uceleným ansámblem vhodně vybraných klimatických modelů [7, 21]. Z toho důvodu je nutné výsledné predikce prezentovat nikoli jako izolované deterministické hodnoty, nýbrž v podobě pravděpodobnostního vývoje s jasně definovaným intervalem nejistoty. V kontextu této studie posuzující vliv navrženého opatření v celém povodí se naplno projevují benefity

detailního fyzikálně založeného přístupu. Po nezbytném ověření správnosti modelového nastavení se opakovaně ukazuje, že nelineární podstata vzájemně propojených hydrologických procesů vyvrací zjednodušené hypotézy o chování povodí, a modelovaný vliv navržených opatření se tak liší od prvotních expertních očekávání. Jak upozorňují např. O'Connell et al. [22] nebo Collentine a Futter [23], prostorová redistribuce vody a nelineární interakce mezi retencí a evapotranspirací často generují neintuitivní výsledky, které lze exaktně postihnout pouze nástroji na bázi fyzikálních distribuovaných modelů. V případě použití jednodušších empirických či koncepčních modelů by právě tyto apriorní a zjednodušené předpoklady mohly představovat primární zdroj zásadního zkreslení výsledků. Plně distribuované fyzikální modely naopak umožňují tyto nelineární zpětnovazebné mechanismy exaktně postihnout, a snižují tak riziko nadhodnocení či podhodnocení celkového efektu opatření.

Plně distribuované modely rovněž umožňují exaktně kvantifikovat tzv. paradox zelené a modré vody. Rozšířený expertní předpoklad, že podpora vegetace a zvýšená infiltrace automaticky posilují základní odtok, se často ukazuje jako zavádějící. Jak dokládají Jackson et al. [24], hustší vegetační kryt zvyšuje celkovou evapotranspiraci. V podmínkách kulturní krajiny tak může být infiltrovaná voda buď zcela spotřebována plodinami s vysokými transpiračními nároky, nebo urychleně odvedena historickými systémy plošných meliorací. Synergie posílené evapotranspirace a funkčních mělkých drenáží pak může paradoxně vést k celkovému poklesu průtoků v říční síti (úbytku tzv. modré vody), čímž navržené retenční opatření ztratí svůj primární účel.

ZÁVĚR

Technologie digitálního dvojčete povodí (Digital Twin) představuje klíčový nástroj pro exaktní hodnocení dopadů klimatické změny a návrh adaptačních strategií. Aplikace plně distribuovaného fyzikálního modelu MIKE SHE na povodí Dyje a pilotní povodí horní Svratky potvrdila jeho schopnost detailně postihnout složité, nelineární hydrologické procesy v krajině. Vyhodnocení ansámblu 26 nezávislých klimatických scénářů ukázalo, že bez včasného zavedení opatření lze do roku 2050 očekávat významný pokles středních a nízkých průtoků. Ke spolehlivému zmírnění těchto negativních jevů nepostačují izolované zásahy, nýbrž je nutná implementace komplexního souboru opatření, např. ve formě hydrologicky optimálního zemědělství. Ačkoli tato plošná synergická úprava hydropedologických vlastností půdy a vegetačního krytu nezvýší absolutní objem dlouhodobého odtoku, zlepšuje distribuci vody v povodí a nadlepšuje základní odtok v obdobích sucha. Simulační nástroj exaktně kalibrovaný za využití historických dat tak představuje robustní a plně operativní podporu pro strategické rozhodovací procesy v managementu povodí.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory Technologické agentury České republiky (TA ČR) v rámci projektu „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (č. SS02030027, Centrum Voda)“ a metodická část článku byla financována z programu Evropské unie pro výzkum a inovace Horizon Europe v rámci projektu „PHISHES“ (grantová dohoda č. 101157438) a projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum (NAZV) „Integrované strategie pro přehradní nádrže k udržení jakosti vody při klimatické změně (č. QL25020021)“.

Literatura

[1] BAUER, P., STEVENS, B., HAZELEGER, W. A Digital Twin of Earth for the Green Transition. *Nature Climate Change*. 2021, 1, s. 80–83. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>

- [2] BROO, D. G., SCHOOLING, J. Digital Twins in Infrastructure: Definitions, Current Practices, Challenges and Strategies. *International Journal of Construction Management*. 2023. 23(7), s. 1 254–1 263. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>
- [3] VALVERDE-PÉREZ, B., JOHNSON, B., WÄRFF, CH., LUMLEY, D., TORFS, E., NOPENS, I., TOWNLEY, L. *Digital Water: Operational Digital Twins in the Urban Water Sector: Case Studies*. IWA Digital Water Programme White Paper Series. London: International Water Association (IWA), 2021. Dostupné z: <https://www.iwa-network.org/publications/operational-digital-twins-in-the-urban-water-sector-case-studies>
- [4] MORLOT, M., RIGON, R., FORMETTA, G. Hydrological Digital Twin Model of a Large Anthropized Italian Alpine Catchment: The Adige River Basin. *Journal of Hydrology*. 2024, 629, 130587. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130587>
- [5] PAL, D., MARTTILA, H., ALA-AHO, P., LOTSARI, E., RONKANEN, A.-K., GONZALES-INCA, C. et al. Blueprint Conceptualization for a River Basin's Digital Twin. *Hydrology Research*. 2025, 56(3), s. 197–212. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/nh.2025.111>
- [6] MEITNER, J., ŠTĚPÁNEK, P., SKALÁK, P., DUBROVSKÝ, M., LHOTKA, O., PENČEVOVÁ, R., ZAHRAĐNÍČEK, P., FARDA, A., TRNKA, M. Validation and Selection of a Representative Subset from the Ensemble of EURO-CORDEX EUR11 Regional Climate Model Outputs for the Czech Republic. *Atmosphere*. 2023, 14(9), 1442. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos14091442>
- [7] IPCC. Sections. In: LEE, H., ROMERO, J. (eds.). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023, s. 35–115. Dostupné z: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- [8] ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRAĐNÍČEK, P., FARDA, A., SKALÁK, P., TRNKA, M., MEITNER, J., RAJDL, K. Projection of Drought-Inducing Climate Conditions in the Czech Republic according to Euro-CORDEX Models. *Climate Research*. 2016, 70(2), s. 179–193.
- [9] DHI. *MIKE SHE: Integrated Catchment Modeling [software]*. Verze 2021.1. Hørsholm, Dánsko: DHI A/S., 2021. Dostupné z: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she>
- [10] BERNSTEINOVÁ, J., FISCHER, M., TACHECÍ, P., ŠTĚPÁNEK, P., ZEMAN, E., RÁRA, V., BERNSTEIN, M., VIZINA, A., TRNKA, M. Rivers in Transition: 21st-Century Hydroclimate Projections for the Thaya River Basin, Central Europe. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2026, 65, 103375. ISSN 2214-5818. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2026.103375>
- [11] MYNENI, R., KNYAZIKHIN, Y., PARK, T. *MOD15A2H MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.061>
- [12] FISCHER, M., ZEMAN, E., BERNSTEINOVÁ, J., VIZINA, A., HANEL, M., TACHECÍ, P., BLÁHOVÁ, M., ŠTĚPÁNEK, P., PAVLÍK, P., MÁCA, P., GHISI, T., RAPANTOVÁ, N., JANÁL, P., TRNKA, M. *Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu. Certifikovaná metodika*. Brno: Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., 2023. ISBN 978-80-87902-38-7. Osvědčení MZE-65728/2023-15000 vydalo Ministerstvo zemědělství, Sekce vodního hospodářství, dne 20. 11. 2023.

- [13] STRUDLEY, M. W., GREEN, T. R., ASCOUGH, J. C. II. Tillage Effects on Soil Hydraulic Properties in Space and Time: State of the Science. *Soil and Tillage Research*. 2008, 99(1), s. 4–48. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.007>
- [14] BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*. 2017, 81(4), s. 687–711. Dostupné z: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- [15] KADER, M. A., SENGE, M., MOJID, M. A., ITO, K. Recent Advances in Mulching Materials and Methods for Modifying Soil Environment. *Soil and Tillage Research*. 2017, 168, s. 155–166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.001>
- [16] BASCHE, A. D., DELONGE, M. S. Comparing Infiltration Rates in Soils Managed with Conventional and Alternative Farming Methods: A Meta-Analysis. *PLoS ONE*. 2019, 14(9), e0215702. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- [17] BLOUIN, M., HODSON, M. E., DELGADO, E. A., BAKER, G., BRUSSAARD, L., BUTT, K. R., DAI, J., DENDOOVEN, L., PERES, G., TONDOH, J. E., CLUZEAU, D., BRUN, J.-J. A Review of Earthworm Impact on Soil Function and Ecosystem Services. *European Journal of Soil Science*. 2013, 64(2), s. 161–182. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ejss.12025>
- [18] KULHAVÝ, Z., FUČÍK, P. Adaptation Options for Land Drainage Systems Towards Sustainable Agriculture and the Environment: A Czech Perspective. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2015, 24(3), s. 1 085–1 102. Dostupné z: <https://doi.org/10.15244/pjoes/34963>
- [19] MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y. The Green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011, 15(5), s. 1 577–1 600. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- [20] REFSGAARD, J. CH., VAN DER SLUIJS, J. P., HØJBERG, A. L., VANROLLEGHEM, P. A. Uncertainty in the Environmental Modelling Process – A Framework and Guidance. *Environmental Modelling and Software*. 2007, 22(11), s. 1 543–1 556. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.004>
- [21] CLARK, M. P., WILBY, R. L., GUTMANN, E. D., VANO, J. A., GANGOPADHYAY, S., WOOD, A. W., FOWLER, H. J., PRUDHOMME, CH., ARNOLD, J. R., BREKKE, L. D. Characterizing Uncertainty of the Hydrologic Impacts of Climate Change. *Current Climate Change Reports*. 2016, 2(2), s. 55–64. ISSN 2198-6061. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>
- [22] O'CONNELL, P. E. et al. Review of Impacts of Rural Land Use and Management on Flood Generation: Impact Study Report. *Journal of Hydrology*. 2007, 332(3–4), s. 294–309. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.07.006>
- [23] COLLENTINE, D., FUTTER, M. N. Realising the Potential of Natural Water Retention Measures in Catchment Flood Management: Trade-Offs and Matching Interests. *Journal of Flood Risk Management*. 2018, 11(1), s. 76–84. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12269>
- [24] JACKSON, R. B., JOBBÁGY, E. G., AVISSAR, R., ROY, S. B., BARRETT, D. J., COOK, CH. W., FARLEY, K. A., LE MAITRE, D. C., MCCARL, B. A., MURRAY, B. C. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science*. 2005, 310(5756), s. 1 944–1 947. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.1119282>

Autoři

RNDr. Jana Bernsteinová, Ph.D.¹

bernsteinova.j@czechglobe.cz

ORCID: 0009-0003-9342-0572

doc. Ing. Evžen Zeman, CSc.¹

zeman.e@czechglobe.cz

ORCID: 0000-0003-0790-4849

Ing. Maxim Bernstein¹

bernstein.m@czechglobe.cz

Ing. Václav Rára¹

rara.v@czechglobe.cz

ORCID: 0009-0005-7657-6721

Ing. Milan Fischer, Ph.D.¹

fischer.m@czechglobe.cz

ORCID: 0000-0002-7841-9317

Ing. Pavel Tachecí, Ph.D.²

pt@dhigroup.com

prof. Mgr. Ing. Miroslav Trnka, Ph.D.¹

trnka.m@czechglobe.cz

ORCID: 0000-0003-4727-8379

¹Ústav výzkumu globální změny Akademie věd ČR, Brno (Česká republika)

²Dánský hydraulický institut, a. s., pobočka Praha (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

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

RIVER BASIN DIGITAL TWIN: A TOOL FOR MODELLING ADAPTATION MEASURES FOR WATER RETENTION IN THE LANDSCAPE

BERNSTEINOVÁ, J.¹; ZEMAN, E.¹; BERNSTEIN, M.¹; RÁRA, V.¹; FISCHER, M.¹; TACHECÍ, P.²; TRNKA, M.¹

¹Global Change Research Institute, CAS – Czech Globe, Brno (Czech Republic)

²Danish Hydraulic Institute, Prague branch (Czech Republic)

Keywords: river basin digital twin – MIKE SHE – climate change – adaptation measure – water balance – baseflow

The digital twin technology for river basins (Digital Twin) is an advanced tool for assessing the impact of complex adaptation measures on the water balance in the context of ongoing climate change. At study sites, Dyje River basin and the pilot basin of the upper Svratka, specific measures to promote natural infiltration and enhance baseflow were designed and quantified. For detailed simulation of the hydrological cycle, an integrated, fully distributed, physically based modeling system called MIKE SHE was implemented. The impact of climate change was evaluated using an ensemble of 26 independent climate scenarios derived from global climate models (CMIP6) for 30-year periods around year 2050, compared to a reference historical period from 1981 to 2010. Simulation results of climate change impact without implemented measures predict a decline in average and low flows by 2050. Model tests have shown that implementing a comprehensive set of measures aimed at hydrologically optimal agriculture (including adjusting the soil's hydro-pedological properties and changing the vegetation cover) won't increase the total runoff, but could have a clear potential to improve water distribution and increase base flow. The simulation tool is fully calibrated and provides solid support for decision-making in watershed management.