Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu

Brno 2023

Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Milan Fischer[1], Evžen Zeman[1], Jana Bernsteinová[1], Adam Vizina[2], Martin Hanel[3], Pavel Tachecí[1], Monika Bláhová[1], Petr Štěpánek[1], Petr Pavlík[2], Petr Máca[3], Tomáš Ghisi[1], Naďa Rapantová[4], Petr Janál[5], Miroslav Trnka[1]

[1]Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Bělidla 986/4a, 603 00 Brno

[2]Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6

[3]Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 165 00 Praha Suchdol

[4]Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 2172/15, 708 00, Ostrava-Poruba

[5]Český hydrometeorologický ústav, Kroftova 43, 616 67, Brno

Brno 2023

Poděkování

Certifikovaná metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu TA ČR SS01010207 „Vývoj nástroje pro identifikaci hlavních rizik hospodaření s vodními zdroji v povodí Dyje a metodika jejich systémového řešení v podmínkách měnícího se klimatu“. Příprava scénářů adaptačních opatření vznikla částečně s podporou projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky – AdAgriF (CZ.02.01.01/00/22_008/0004635).

Rádi bychom tímto poděkovali s.p. Povodí Moravy za spolupráci a poskytnutí dat při přípravě případové studie v povodí řeky Dyje. V neposlední řadě děkujeme firmě DHI a.s. za spolupráci a přípravu distribuovaného hydrologického modelu v rámci případové studie.

Oponenti

Ing. František Pavlík, Ph.D., Státní pozemkový úřad, Husinecká 1024/11a, 130 00 Praha 3 – Žižkov

RNDr. Pavel Punčochář CSc., Ministerstvo zemědělství, Sekce vodního hospodářství, Těšnov 17, 117 05 Praha 1

Smlouva o uplatnění metodiky

Povodí Moravy, s.p., Dřevařská 11, 602 00 Brno

Osvědčení

MZE-65728/2023-15000

Osvědčení vydalo

Ministerstvo zemědělství, Sekce vodního hospodářství, dne 20.11.2023

ISBN 978-80-87902-38-7

© Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.

Obsah

Úvod 2
1. METODIKA POSTUPU ŘEŠENÍ 3
1.1 Adaptační opatření v kontextu vodní bilance 3
1.2 Koncept objektivního posuzování adaptačních opatření 5
1.3 Analýza efektivity adaptačních opatření 6
1.4 Aplikační strategie pro optimální kombinaci adaptačních opatření 11
1.5 Aplikovatelnost metodiky 11
1.5 Závěr metodiky 12
2. PŘÍPADOVÁ STUDIE V POVODÍ ŘEKY DYJE 13
2.1 Charakteristika povodí řeky Dyje 13
2.2 Dopady změny klimatu na vodní bilanci 18
2.3 Vliv adaptačních opatření na vodní bilanci 26
2.4 Závěr případové studie 51
Seznam použitých zkratek 52
Seznam publikací, které předcházely metodice 53
Seznam použité literatury 55

Úvod

V průběhu posledních dekád jsme svědky výrazných změn v klimatickém systému planety, které mají hluboký dopad na životní prostředí, ekonomiku a společnost jako celek. V oblasti střední Evropy charakterizované mírným klimatem, kde obvykle v nižších a středních polohách srážky dlouhodobě nepřevyšují potenciální výpar, mají tyto změny zvlášť citelné důsledky pro vodní bilanci a na ní závislé sektory. Dlouhodobé klimatologické trendy rostoucí teploty a potenciálního výparu v kombinaci s nevýrazně se měnícími srážkami vedou k narůstající aridítě této oblasti. Současně, vzrůstající pravděpodobnost extrémních meteorologických událostí jako jsou vlny veder, krátkodobá či dlouhodobá sucha nebo naopak povodně spolu s rostoucím tlakem na vodní zdroje vyžadují komplexní přístup k adaptaci a řešení těchto výzev.

Jelikož tyto změny pozorovatelné na úrovni jednotlivých ekosystémů, povodí a regionů jsou odrazem globální klimatické změny, vedle samotné mitigace, představující zejména snižování emisí skleníkových plynů, je nezbytné směřovat národní strategii k adaptaci na změnu klimatu a její dopady. Vodní hospodářství stojí v popředí těchto adaptací, neboť voda je základní složkou, jejíž dostupnost a kvalita ovlivňují nejen lidskou činnost, ale i krajinu jako celek. Zemědělství, tradiční pilíř ekonomiky střední Evropy, je přímo závislé na stabilní dostupnosti vody, a tak se musí přizpůsobovat novým podmínkám. Rovněž lesnictví čelí novým výzvám spojeným s měnící se dostupností vody a vysokými teplotami přispívajícími ke zvýšenému riziku vzniku požárů a výskytu škůdců. Pro povodí v oblasti střední Evropy je klíčové pochopení těchto výzev a implementace účinných adaptačních opatření.

Cílem předkládané metodiky je představit postupy, jak kvantifikovat dopady předpokládané klimatické změny na vodní bilanci při užití adaptačních opatření v podmínkách ČR na několik příštích dekád. Metodika představuje postup, jak objektivně posuzovat potřebnost adaptačních opatření, jejich účinnost a celkový dopad napříč sektory. Adaptační opatření k omezení následků změny klimatu se dotýká řady oblastí zahrnujících např. veřejné a soukromé infrastruktury, zemědělství, vodní zdroje, ochranu ekosystémů, zdravotnictví, vzdělávání aj. Udržitelnost vodních zdrojů je na klimatických podmínkách přímo závislá. Ve vodohospodářském sektoru mohou být opatření aplikována ve všech hlavních uživatelských segmentech nakládaní s vodami.

Hlavním principem metodiky je využití hydrologických modelů, prostřednictvím nichž lze scénáře změny klimatu transformovat do časových řad hydrologických procesů, a tak kvantifikovat predikci celkové vodní bilance povodí s detailním zohledněním procesů v čase a prostoru. Pro takovou predikci lze analyzovat vodní bilanci s alternativou adaptačních změn zavedených v libovolném čase zvoleného období predikce a vybraného typu adaptačního opatření nebo jejich kombinace.

Daná metodika sestává ze dvou základních částí: (i) obecný metodický popis, jak kvantifikovat dopady změny klimatu na hydrologii povodí s adaptačními opatřeními ve všech segmentech užití vod, (ii) příklad řešení v rámci případové studie v povodí řeky Dyje, přičemž principy a metody jsou obecně přenositelné na libovolné povodí.

Tato metodika (č. 2) navazuje na metodiku stejnojmenného autorského kolektivu s názvem „Metodika pro stanovení hlavních poruch vodohospodářské bilance a optimalizace adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu“ (dále jen metodika č. 1), ve které je popsána řada detailů týkajících se klimatické změny, přípravy klimatických scénářů a sestavení či kalibrace a validace hydrologického modelu. Proto jsou tato konkrétní témata zde představena jen stručně a schematicky, ale na druhé straně uvedena být musí, protože by bez této části byla metodika č. 2 neaplikovatelná.

1. METODIKA POSTUPU ŘEŠENÍ

Podle Zákona 254/2001 Sb., „Zákon o vodách a o změně některých zákonů“ (dále jen vodní zákon, VZ) jsou vodním zdrojem povrchové nebo podzemní vody, které jsou využívány nebo které mohou být využívány pro uspokojení potřeb člověka, zejména pro pitné účely. Povrchové vody jsou vody přirozeně se vyskytující na zemském povrchu a podzemními vodami se rozumí vody přirozeně se vyskytující pod zemským povrchem v pásmu nasycení v přímém styku s horninami. Při definování dostupných vodních zdrojů se povrchové vody dělí na vodní toky a vodní nádrže. Vodní zákon dále definuje pojem vodní bilance, která je spolu s povrchovými vodami ústředním tématem předkládané metodiky. Vodní bilance sestává z hydrologické bilance a vodohospodářské bilance. Hydrologická bilance porovnává přírůstky a úbytky vody a změny vodních zásob povodí, území nebo vodního útvaru za daný časový interval. Vodohospodářská bilance porovnává požadavky na odběry povrchové a podzemní vody a vypouštění odpadních vod s využitelnou kapacitou vodních zdrojů z hledisek množství a jakosti vody a jejich ekologického stavu. Obsah vodní bilance a způsob jejího sestavení stanoví Ministerstvo zemědělství (MZe) ve spolupráci s Ministerstvem životního prostředí (MŽP) vyhláškou. Klimatická změna ovlivňuje vodní bilanci. Obecným přístupem k odvrácení nevhodného vývoje vodní bilance v důsledku klimatických změn je realizace mitigačních a adaptačních opatření. Tato metodika se zabývá obecným přístupem posuzování adaptačních opatření. Konkrétně jsou dále rozebírána opatření, u kterých se předpokládá po jejich realizaci významný dopad na vodní bilanci v budoucím období.

1.1 Adaptační opatření v kontextu vodní bilance

V současné době je diskutována či již implementována široká paleta adaptačních opatření na dopady změny klimatu a její extrémní projevy, nicméně řada z těchto opatření je navržena a realizována bez důsledné analýzy dopadů na vodní bilanci v uceleném povodí – především pro podmínky budoucího užití vod za klimatické změny. Posuzování adaptačních opatření je zapotřebí realizovat v období, kdy má být účinné. Při jejich posuzování nelze vycházet pouze z empirických pozorování. Ekonomicky není vhodné analyzovat efektivitu opatření až po jeho realizaci, tedy vycházet z principu „pokus–omyl“. Velkoplošná adaptační opatření by se samozřejmě neměla ani dnes bez detailní analýzy dopadů nikdy realizovat. Hodnocení adaptačních opatření na základě empirických schematizací a metodik odvozených z historických časových řad obvykle neobsahují nezbytné změny proměnných a parametrů, které jsou přímo procesně navázány na klimatické změny, a tak je nelze zcela akceptovat pro posuzovaní vhodnosti adaptačních opatření. Adaptační opatření na klimatickou změnu s cílem udržet či zlepšit vodní bilanci krajiny pro současné a výhledové podmínky lze rozdělit do několika kategorií na základě různých kritérií. Následující výčet představuje několik z možných členění:

Podle fáze řešení:

Preventivní opatření je především plánování a implementace opatření na základě socioekonomických prognóz a simulací klimatickými modely. Jde například o budování vodních děl pro akumulace vod, přírodě blízká opatření k zadržení vody v krajině a podpoře biodiverzity, agrotechnická opatření v lokalitách s očekávaným poklesem srážek aj.

Reaktivní opatření lze charakterizovat jako reakce na již registrované dopady klimatické změny. Jde například o převody vody do míst, které již dnes částečně trpí nedostatkem vody z důvodu prohlubující se negativní vodní bilance dané oblasti.

Podle doby trvání:

Krátkodobá opatření jsou rychlá opatření k řešení aktuálních problémů, často s menšími náklady a rychlými výsledky.

Dlouhodobá opatření představují plánované strategie řešení změny klimatu. Mohou vyžadovat větší investice a delší dobu k dosažení výsledků. V našich podmínkách především vycházející z programových opatření v oblasti ochrany nebo posílení vodních zdrojů.

Podle způsobu realizace:

Technická adaptační opatření zahrnují stavební, inženýrská a technologická řešení k zachování a optimalizaci vodních zdrojů. Tyto metody se zaměřují na výstavbu infrastruktury, vylepšení technologií a inovace pro efektivní správu vodních zdrojů. Mezi tato opatření patří např. stavba nových nebo rozšíření stávajících vodních nádrží, vývoj a implementace účinnějších zavlažovacích technik, protipovodňová ochrana, recyklace a opětovné využití vody, infrastruktura a technologie pro úsporu vody, ale i pokročilé monitorovací a modelovací nástroje.

Přírodě blízká, tzv. revitalizační nebo renaturalizační opatření, napomáhají k obnovení nebo zachování přirozených hydrologických funkcí krajiny a doprovodných ekosystémů s cílem zlepšit jejich schopnost vyrovnávat se s negativními projevy změny klimatu. Do této kategorie se řadí např. obnova mokřadů, tvorba přirozených retenčních nádrží či obnova přirozených říčních koryt, meandrů a břehů.

Správní opatření představují regulace, plánování, zákony a směrnice, např. regulační omezení odběrů vody v období sucha.

Podle oblasti aplikace adaptačních opatření:

Adaptační opatření v urbanizovaných povodích jsou zaměřena na úpravy v městských oblastech (např. zelené střechy, dešťové údržbové nádrže, dešťová kanalizace, revitalizace vodních toků, akumulace vody). Velmi častým opatřením jsou v těchto oblastech protipovodňová opatření.

Adaptační opatření realizovaná v zemědělském segmentu se zaměřují na efektivní využití vodních zdrojů v rámci zemědělských ploch (nové postupy v pěstování plodin, aplikace přírodních hnojiv do půdy, nové pěstební postupy, meziplodiny, změny užívání půdy, opatření k zadržování vody v půdě a krajině aj.).

Adaptační opatření realizovaná v segmentu lesního hospodářství jsou zaměřena na efektivní využití vodních zdrojů v lesních porostech (lesní skladba porostů, způsob hospodaření, lesotechnická opatření, mechanizace, změna užívaní půdy, opatření k zadržování vody v lesní půdě, aj.).

Adaptační opatření realizovaná v segmentu vodního hospodářství (přírodní opatření jsou zaměřena na zlepšení a ochranu přirozených ekosystémů, např. obnova mokřadů, výsadba stromů k zastínění a snížení evapotranspirace, revitalizace vodních toků; technická opatření jsou zaměřena na zlepšení na vodních dílech, vodních tocích, aj).

Podle prostorového měřítka aplikace adaptačního opatření:

Adaptační opatření mohou být aplikována pouze v lokálním měřítku (travní pásy, doprovodná vegetace, průlehy, výsadba solitérů). Jiná opatření lze aplikovat regionálně, kde jsou adaptační úpravy realizovány v uceleném nebo dílčím povodí (změna pěstovaných plodin, změna hospodaření s půdou vedoucí k plošné změně fyzikálních vlastností, aj.).

1.2 Koncept objektivního posuzování adaptačních opatření

Hlavním principem metodiky je aplikace hydrologických modelů (HM) pro posouzení vlivu zamýšlených adaptačních opatření na vodní bilanci v dotčeném místě, ale i vlivu na širší oblast – dílčí či ucelené povodí. Navrhovaný postup umožňuje posuzovat jak jednotlivá adaptační opatření, tak jejich kombinace zohledňující vzájemné interakce v čase a prostoru. Ty mohou být aditivní až synergické, kde se jednotlivá opatření nejen doplňují, ale vzájemně umocňují. Na druhou stranu však mohou na sebe opatření působit subtraktivně až antagonisticky. Navrhovaný postup vnáší do diskuse o adaptačních opatřeních a jejich zamýšlených i nezamýšlených efektech ryze kvantitativní a ve své podstatě objektivní pohled. Vzhledem k tomu, že adaptační opatření jsou plánována do budoucna, musí být jejich účinnost testována nejen pro současné klimatické podmínky, ale především pro podmínky budoucí. Zohlednění klimatických scénářů je proto neodmyslitelným faktorem předkládané metodiky. Požadovaná délka prognózy se musí odvíjet od zamýšlené životnosti adaptačních opatření.

V rámci metodiky jsou adaptační opatření posuzována pouze v koncepční podobě, tedy nejde o projekční dokumentaci a řešení detailů navržených řešení. Adaptační opatření jsou posuzována způsobem umožňujícím popsat míru ovlivnění konkrétních hydrologických procesů a vodní bilance jako celku. Podstatným krokem je identifikovat parametry HM a správně určit jejich změny reprezentující dopad na vodní bilanci v čase a prostoru v důsledku zavedení opatření. Z toho důvodu je nezbytné, aby použitý, fyzikálně založený HM zohledňoval všechny podstatné procesy a pracoval v prostorovém rozlišení odpovídající rozsahu adaptačního opatření. V případě, že je adaptační opatření prostorově pod rozlišovací schopnost HM, jej lze do modelu zavést skrze modifikaci vybraných parametrů. V takovém případě však musí být daný postup pečlivě verifikován s důrazem na fyzikální smysluplnost dotčených parametrů a s nimi spojených procesů. Mezi zamýšlená obecná adaptační opatření patří ve vyjmenovaných segmentech např.:

a. změny dřevinné skladby (lesní hospodářství);
b. zvýšení retenční kapacity půd a infiltrace (v zemědělském a lesním hospodářství);
c. snížení erozního rizika a utuženosti půd (v zemědělství);
d. přírodě blízká opatření dle metodik MŽP ČR (ve všech segmentech);
e. výstavba malých vodních nádrží dle přijaté koncepce voda v krajině (v segmentu vodního hospodářství);
f. revitalizace a renaturalizace vodních toků (v segmentu vodního hospodářství);
g. komplexní pozemkové úpravy (v zemědělských a lesním hospodářství);
h. výstavba vodních nádrží dle generelu LAPV (lokality pro akumulaci povrchových vod, Ministerstvo zemědělství, 2011; v segmentu vodního hospodářství);
i. převody vody pro vybrané účely (v segmentu vodního hospodářství, v zemědělství);
j. adaptační opatření v urbanizovaných povodích (v urbanizovaném segmentu).

Za významné adaptační opatření v lesním hospodaření je považována úprava dřevinné skladby a struktury lesa tak, aby reflektovala probíhající klimatickou změnu. Z hlediska lesních půd je počítáno s různými opatřeními vedoucími k podpoře jejich retenční kapacity, jako jsou např. úpravy cestní sítě v době obnovy lesa. Dále se jedná o snížení půdního utužení a podpoře infiltračních schopností představující jeden z hlavních směrů adaptačních opatření MZe, které budou postupně realizovány v budoucnosti a pravděpodobně dotačně zvýhodňovány. V zemědělství je dále uvažováno s opatřeními zahrnujícími úpravy zemědělského hospodaření (např. pěstování meziplodin, změny osevních postupů, pásové obdělávání, aplikace mulče, metody přímého setí bez orby či jiné minimalizační technologie, aplikace biouhlu apod.), zpomalení povrchového odtoku např. protierozními opatřeními či budování/využívání závlah (ostrovních/velkých celků). V neposlední řadě je počítáno s komplexními pozemkovými úpravami a opatřeními typu „chytrá krajina“.

Dalšími uvažovanými adaptačními opatřeními jsou revitalizační a renaturalizační úpravy vodních toků dle metodik MŽP, které jsou navrhovány za účelem zadržování vody v krajině a podpory druhové diverzity. Na druhé straně jsou uvažována mitigační opatření z hlediska protipovodňových úprav toků, za účelem minimalizace rizika ohrožení života a majetku, a adaptační opatření v podobě výstavby vodních děl pro akumulaci vod dle publikovaného generelu LAPV a jeho plánované novely. Mezi významné adaptační opatření v povodí patří zamýšlené posílení povrchových vodních zdrojů a jejich vzájemné propojení, které mají vést k uspokojení potřeb pitné vody. Vlastní adaptační opatření navrhovaná příslušnými úřady v rámci agendy územního rozvoje a komplexních pozemkových úprav představují další zamýšlené adaptační aktivity v krajině a systému vodních toků.

1.3 Analýza efektivity adaptačních opatření

Pro posouzení dopadů klimatické změny na hydrologické poměry zájmové oblasti a udržitelnost vodních zdrojů je zapotřebí aplikovat klimatické scénáře v kombinaci s hydrologickým modelem vodní bilance (HM) umožňující transformaci klimatického signálu do časových řad (případně i prostorově distribuovaných) průtoků, stavů hladin vodních nádrží, aktuální evapotranspirace, půdní vlhkosti, zásoby podzemních vod a dalších hydrologických proměnných či odvozených statistických ukazatelů a v neposlední řadě zajištěnosti vodních zdrojů. Výběr proměnných je závislý na typu HM a míře detailu schematizace a typu adaptačních opatření, která se mají posuzovat. Hlavním principem posouzení vlivu opatření je vždy vyhodnocení vodní bilance a porovnání výsledků vodní bilance s referenčním obdobím, případně s obdobím budoucí klimatické změny bez adaptačních opatření.

Samotný metodický postup je postaven na dokumentu s názvem „Metodika pro stanovení hlavních poruch vodohospodářské bilance a optimalizace adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu“ (metodika č. 1 od stejnojmenného autorského kolektivu) a představuje její nadstavbu zaměřenou specificky na adaptační opatření napříč všemi výše uvedenými segmenty. Navržený postup se dělí do 4 základních etap a několika dílčích kroků takto:

A) Simulace vodní bilance pro referenční období a stav

    1. Vymezení zájmového území
    2. Příprava vstupních dat
    3. Sestavení HM vodní bilance
    4. Kalibrace HM
    5. Validace HM

6. Finální referenční simulace vodní bilance
7. Vyhodnocení simulace a tvorba cílových výstupů

B) Simulace vodní bilance pro budoucí období – prognózu – scénáře klimatických změn parametrů a proměnných
   1. Příprava klimatických scénářů a souvisejících parametrů
   2. Simulace vodní bilance pro podmínky budoucích změn klimatu
   3. Vyhodnocení simulací a tvorba cílových výstupů bez adaptačních opatření

C) Simulace vodní bilance pro scénáře klimatických změn včetně adaptačních opatření (jedno adaptační opatření nebo kombinace více opatření)
   1. Příprava scénářů adaptačních opatření a integrace do HM
   2. Simulace vodní bilance s adaptačními opatřeními pro referenční období
   3. Simulace vodní bilance s adaptačními opatřeními pro budoucí podmínky

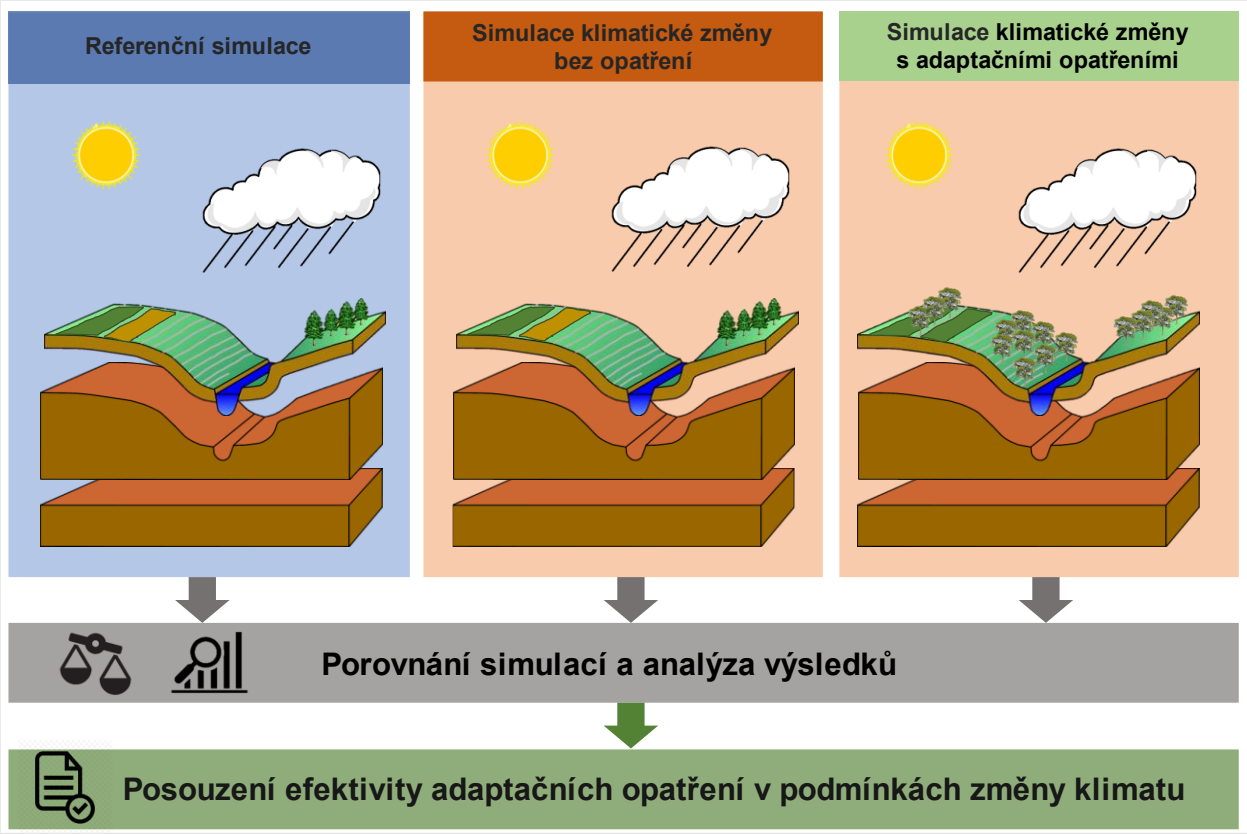
D) Vyhodnocení výsledků a porovnání simulací vodní bilance pro referenční stav, stav změny klimatu bez opatření a s opatřeními
   1. Posouzení efektivity adaptačních opatření a jejich vlivu na vodní bilanci
   2. Příprava optimálního návrhu kombinace adaptačních opatření
   3. Doporučení aplikační strategie pro optimální kombinaci adaptačních opatření

Předkládaná metodika tedy plně přejímá z metodiky č. 1 etapu A) a z větší části rovněž etapu B). Narozdíl od metodiky č. 1 jsou zde v etapě B) zohledněny pouze změny klimatické a současně na meteorologických podmínkách přímo závislé parametry (např. vývoj vegetace). Ostatním změnám s primárním akcentem na adaptační opatření v současných, ale především budoucích klimatických podmínkách se věnuje etapa C). Následnému posouzení efektivity jednotlivých opatřeních, analýze potenciálních synergií a antagonismů a hledání optimální kombinace adaptačních opatření zajišťujících udržitelnou či ideálně zlepšenou vodní bilanci ve všech segmentech se věnuje etapa D). Na závěr této poslední etapy jsou poskytnuta doporučení pro aplikační strategii adaptačních opatření.

V obecné rovině, analýzy efektivity a funkčnosti adaptačních opatření vychází z porovnání proměnných a pomocných parametrů vodní bilance pro tří základní stavy povodí:

- **Referenční stav** – vychází z proměnných a parametrů vodní bilance povodí simulovaných pro historickou referenční časovou řadu (Obr. 1 vlevo).
- **Stav za klimatické změny** – vychází z proměnných a parametrů vodní bilance povodí simulovaných pro sadu klimatických scénářů budoucnosti (Obr. 1 střed).
- **Stav za klimatické změny a uvažovaného adaptačního opatření** – vychází z proměnných a parametrů vodní bilance povodí simulovaných pro sadu klimatických scénářů budoucnosti v kombinaci s aplikací adaptačních opatření (Obr. 1 vpravo).

Tyto tři základní stavy jsou následně porovnány s cílem diagnostikovat, jak změny klimatu a změny v důsledků zavadění adaptačních opatření působí na vodní bilanci (Obr. 1). K tomuto účelu je použit jeden HM, který simuluje (i) průběh proměnných v referenčním období, kde jsou založeny na pozorovaných datech, a (ii) následně je model aplikován pro okrajové podmínky definované klimatickou změnou a (iii) nakonec je shodný model parametricky upraven tak, aby zahrnoval uvažované adaptační opatření a mohl být použit pro posouzení vlivu adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu. Vždy je v rámci testování a vývoje doporučeno model se zahrnutými adaptačními opatřeními testovat i na referenční klimatické řadě a v ideálním případě ověřovat schopnost modelu reprezentovat vliv reálných adaptačních opatřeních na základě empirických dat.



Obr. 1 Schéma metodického postupu. Referenční stav HM pro období kalibrační/validační – vlevo, stav simulace pro klimatickou změnu bez adaptačních a jiných změn v povodí – střed, stav simulace pro klimatickou změnu a adaptační opatření – vpravo.

Vzhledem k velmi komplikovaným vazbám ve vodní bilanci mezi procesy a proměnnými nelze hledat optimalizační funkci analyticky. Současně, většina úloh tohoto typu vyžaduje fyzikálně založený distribuovaný HM, kde potřebná míra komplexnosti vede k vysokým výpočetním nárokům stran výpočetní kapacity a času. To ve většině případů rovněž přináší omezení pro iterativní numerické řešení. Z tohoto důvodu lze zvolit sekvenční postup následného porovnání těchto tří stavů: referenční stav povodí, stav povodí zatížený pouze klimatickou změnou a stav povodí zatížený jak klimatickou změnou, tak změnou parametrů a proměnných odpovídající adaptační změně v prostoru a čase. Porovnáním proměnných a parametrů vodní bilance v celém povodí v ploše a prostoru jsou vyhodnoceny trendy a dopady změn na vodní bilanci. Jak již bylo zmíněno, i když varianta s adaptačními opatřeními pro historické referenční období není jmenovitě součástí výše uvedeného konceptu, její provedení je nezbytnou součástí zavádění adaptačních opatření do HM a prvního testování. Zároveň poskytuje cenné poznatky o efektivitě adaptačních opatření pro současné podmínky.

Strategie postupu v posuzování adaptačních opatření je navržena následovně:

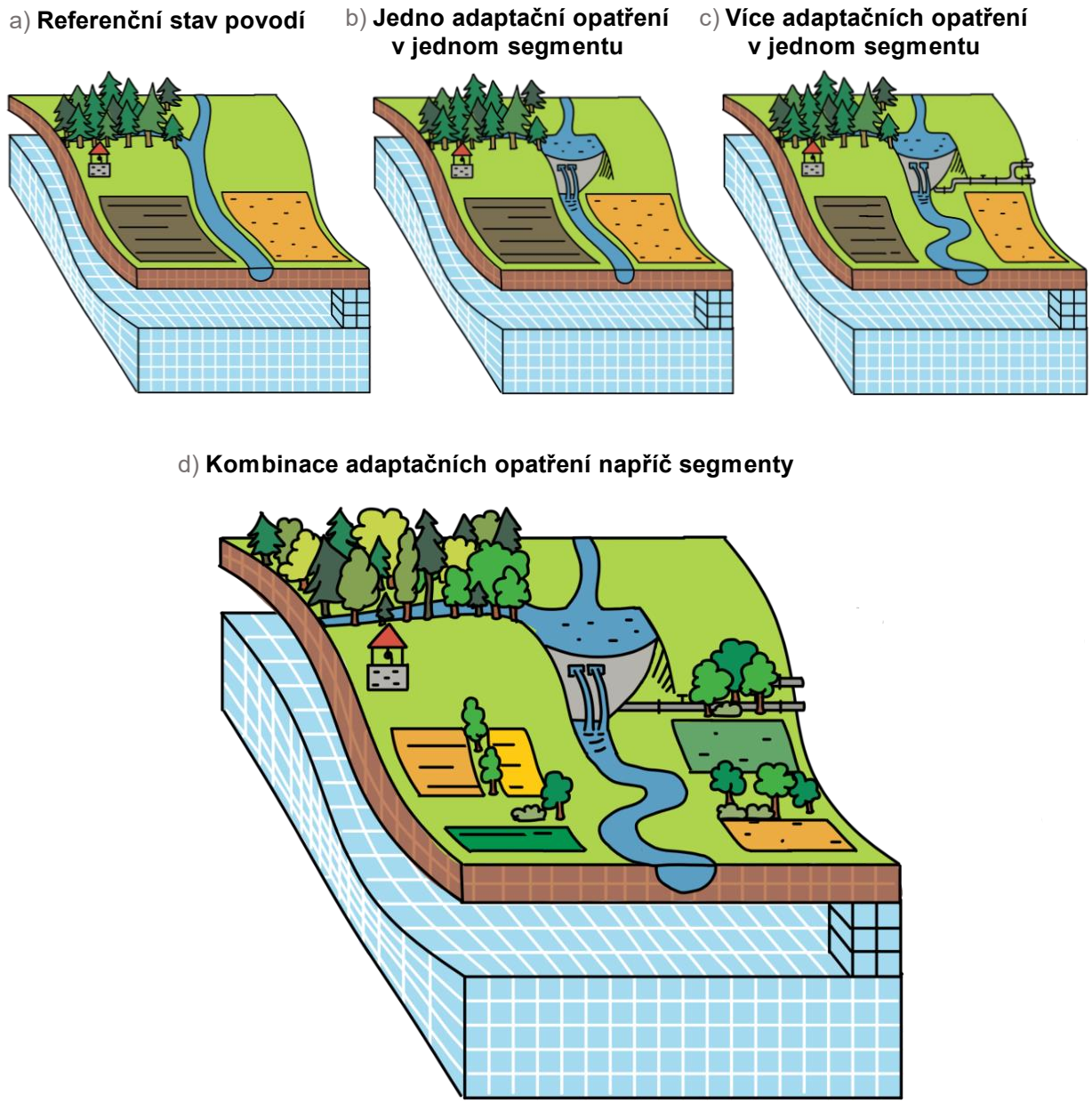
I. Zvolit adaptační opatření ve vybraném povodí.
II. Definovat adaptační opatření prostřednictvím modelových parametrů (konstantní v čase, prostoru či časoprostorově variabilní).
III. Realizovat simulaci pro referenční období bez adaptačního opatření („referenční simulace“).

IV. Realizovat simulaci pro referenční období s adaptačními opatřeními.
V. Realizovat simulaci pro predikční období s klimatickou změnou bez adaptačních opatření.
VI. Realizovat simulaci pro predikční období s klimatickou změnou s adaptačními opatřeními.
VII. Porovnat navzájem proměnné a stavové parametry vodní bilance ze simulací popsaných předcházejících čtyřech bodech III, IV, V a VI.
VIII. Vyhodnotit efektivitu a vliv adaptačního opatření na vodní bilanci v ploše povodí a v čase, a to především na klíčové procesy a jejich část vodní bilance (odtok z povodí, evapotranspirace, půdní vlhkost stavy hladin v povrchových tocích, vodních nádržích a podzemích vodách).

Je doporučeno tímto způsobem testovat adaptační opatření nejprve jednotlivě a následně také v různých kombinacích. Základním výchozím bodem je referenční simulace (Obr. 2a), vůči které se všechny další simulace srovnávají. Tato strategie je úspěšná, jen když dochází k simulacím jednotlivých adaptačních opatření postupně, v určených segmentech (např. vodní hospodářství, nebo lesní hospodářství) a provede se kroková analýza vlivů těchto adaptačních opatření na vodní bilanci (Obr. 2b). Následně se přidávají v segmentu uživatele vod další opatření a na nich dochází k simulaci kombinovaných opatření obdobného charakteru (např. revitalizační opatření na tocích v celém povodí + změna na systémech odvodnění + malé vodní nádrže; Obr. 2c). Dále je doporučeno tímto způsobem testovat adaptační opatření v různých kombinacích (Obr. 2d). Pouze tímto postupem lze odhalit z výstupů simulací trendy a dopady jednotlivých opatření na proměnné a parametry, které mohou působit na vodní bilanci v různých lokalitách posuzovaného povodí a v čase součinně či protichůdně. Postupně lze nalézt optimální sestavu adaptačních opatření a jejich optimální časové působení.

Z výstupů simulačních modelů jsou k dispozici nejen hodnoty proměnných popisujících jednotlivé hydrologické procesy, ale vzhledem k využití širokého spektra klimatických scénářů rovněž i míra nejistoty těchto proměnných.

Míru efektu jednotlivých opatření na vodní bilanci v povodí je většinou vhodné testovat obálkovou nebo maximalistickou alternativou, kterou se ověří reakce systému vodní bilance na navrhované – maximální – změny proměnných a parametrů v čase a prostoru. Například, pokud se uvažuje se změnou dřevinné skladby o 5 %, je vhodné provést i simulaci se změnou řádově vyšší, aby bylo zřejmé, jakým směrem a zda vůbec tato výraznější změna vodní bilanci ovlivňuje. Znalost míry vlivu adaptačního opatření v závislosti na rozsahu jeho implementace umožní daleko lépe stanovit vhodný rozsah opatření a zkrátí se tak potřebný čas k hledání optimálního nastavení adaptačních opatření – především snížením počtu potřebných simulací HM k nalezení optimálního stavu vodní bilance.



Obr. 2 Schéma metodického iterativního testování adaptačních opatření s využitím fyzikálně založeného distribuovaného modelu. Vše lze testovat pro referenční klimatické podmínky, ale především pro predikce klimatických scénářů, které jsou nezbytné pro komplexní posouzení adaptačních opatření a nalezení optimální kombinace. Obr. a) ukazuje simulaci pro referenční období, obr. b) simulace jednotlivých adaptačních opatření postupně jedno po druhém, obr. c) simulaci kombinovaných opatření obdobného charakteru (v jednom segmentu odvětví) a obr. d) simulaci kombinovaných opatření ve více segmentech odvětví.

1.4 Aplikační strategie pro optimální kombinaci adaptačních opatření

Základem posuzování dopadů klimatické změny či jiných předpokládaných změn na zajištěnost vodních zdrojů a související hydrologické poměry je porovnání simulací zahrnující tyto změny vůči simulaci bez změn – tedy simulaci referenční. Místa, kde dochází v důsledku klimatické změny k největším negativním změnám, označujeme jako oblasti rizikové. Pro tyto oblasti lze navrhnout adaptační opatření a integrovat je do HM. Poté lze postupně ověřovat efektivitu navrhovaných adaptačních opatření a případně provádět další úpravy – tj. optimalizace adaptačních opatření. Změna klimatu charakterizovaná především růstem teploty vede k narůstajícímu potenciálnímu výparu. Jako následek dochází k nárůstu aktuální evapotranspirace, ale jen v oblastech, kde evapotranspirace není limitována dostupnou vodou. V důsledku lze předpokládat, že změny v aktuální evapotranspiraci budou výraznější ve vyšších nadmořských výškách, kde v současnosti aktuální evapotranspirace není limitována dostupnou vodou, ale dostupnou energií (teplota). Růst evapotranspirace o pouhých 10 % může mít devastující dopad na odtoky ze zdrojových povodí, a proto je třeba adaptační opatření navrhovat tak, aby v konkrétní oblasti přinášely smysluplný efekt. Multikriteriální posouzení opatření dle této metodiky by mělo přispět k tomu, že nebudou realizována adaptační opatření, která slouží pouze jednomu uživateli, a přitom vodní bilanci v principu zhoršují. Tato metodika (společně s metodikou č. 1) navrhuje objektivní hodnocení souboru adaptačních opatření s cílem ovlivnit výběr souboru adaptačních opatření rovněž způsobem vedoucí k optimalizaci investic do opatření pro udržitelnost vodních zdrojů v ČR.

1.5 Aplikovatelnost metodiky

Cílem aplikace navržené metodiky je tedy hledat optimální sestavu adaptačních opatření, která přinášejí mnohem více synergických efektů a daleko méně konfliktních situací v bilanci vod v povodí. Tato metodika stejně jako metodika č. 1 je aplikovatelná v podmínkách dostupnosti dat v ČR, o čemž svědčí případová studie v povodí Dyje, která je součástí metodiky.

Metodika analýzy efektivity adaptačních opatření je použitelná pro většinu zmíněných adaptačních opatření v uceleném povodí. Aplikace HM na analýzu efektivity adaptačních opatření má jedno prostorové omezení, které vychází z porovnání měřítek aplikace adaptačních opatření a velikosti výpočetní buňky HM. Pro analýzy vyloženě lokálních adaptačních opatření (plošně menších než několik výpočetních buněk) nebo bodových opatření nejsou hydrologické modely se čtvercovou výpočetní sítí v rozlišení v řádu stovek metrů zcela vhodné. Aplikace takovýchto HM je sice možná, ale není přímočará a vyžaduje implementaci dodatečných předpokladů v rámci parametrizace. Vhodnější je použití distribuovaných modelů s vyšším prostorovým rozlišením či modelů s nepravidelnou výpočetní sítí umožňující zavedení bodových prvků.

Postupy, kterými se zabývá tato metodika rovněž ani primárně necílí na analýzy ucelených urbanizovaných povodí, respektive dílčích povodích, ve kterých je významná část povodí urbanizovaná. Hlavním důvodem je především to, že povrchový, ale i hypodermický[1] odtok je v urbanizovaném povodí ovlivněn výše ležícími vodními díly a zástavbou, která významně ovlivňuje užití ploch povodí a ovlivňují tak procesy odtoku, vsaku a evapotranspirace. Tyto

[1] Hypodermický (podpovrchový) odtok je relativně rychlá složka odtoku, která probíhá ve svrchní vrstvě půdy. Voda z hypodermického odtoku se typicky do toku dostává později než povrchový odtok, ale rychleji než odtok základní.

procesy jsou nesrovnatelné s procesy obdobného povodí přírodního charakteru. Procesy vodní bilance mají v urbanizovaném povodí jiné funkční vazby a je tedy nezbytné v analýze adaptačních opatření přistoupit ke specifickým postupům.

1.5 Závěr metodiky

Navržený metodický postup je v souladu s hlavními dokumenty schválenými vládou ČR. Kromě VZ se jedná zejména o následující dokumenty: Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky, Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR, Národní akční plán adaptace na změnu klimatu, Metodika pro přípravu Plánů pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody.

„Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu“ umožňuje posuzovat vhodnost a efektivitu investic do adaptačních opatření, jako reakci na vlivy změny klimatu na vodní bilanci v povodí.

Metodika je sestavena tak, že je schopna ověřit vlastnosti jednotlivých adaptačních opatření a jejich optimální kombinaci v jejich umístění a času realizace. Vzhledem k povaze prognózy klimatických změn předložená metodika zároveň umožňuje porovnávat míru nejistoty u určujících proměnných a parametrů, na kterých je optimální sestavení adaptačních opatření navrhováno.

Metodika č. 2 zásadním způsobem přispívá k poznání mechanismů a vazeb při působení klimatických změn, které ovlivní vodní bilanci v povodí a tím samozřejmě disponibilitu vodních zdrojů pro množinu uživatelů včetně jejich případných proměnných požadavků na vodní zdroje v budoucnosti. Metodika je v souladu s přijatými principy EU taxonomie, protože přímo podporuje dva cíle taxonomie ze 6 vytčených a schválených:

- Zmírňování změny klimatu (mitigace)
- **Přizpůsobování se změně klimatu (adaptace)**
- Ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémů
- **Udržitelné využívání a ochrana vodních a mořských zdrojů**
- Prevence a omezování znečištění
- Přechod na oběhové hospodářství

“K dosažení klimatických cílů bude potřeba velký objem jak veřejného, tak soukromého kapitálu. V rámci Evropské unie by mobilizaci soukromého kapitálu měla napomoci právě taxonomie, neboť přináší klasifikaci udržitelných a klimatu prospěšných aktivit”.

Metodika pomáhá kvantifikovat efektivitu adaptačních opatření a zároveň přispívá k udržitelnosti vodních zdrojů pro kvalifikované uživatele, protože přímo hodnotí, zda cíle adaptačních opatření přispívají alespoň k jednomu ze zmíněných cílů a zároveň významně nepoškozují cíle ostatní.

2. PŘÍPADOVÁ STUDIE V POVODÍ ŘEKY DYJE

Druhá část metodiky představuje ukázku aplikace prostorově plně distribuovaného modelu s cílem posoudit vliv adaptačních opatření na vodní bilanci v podmínkách klimatických změn. Vzhledem k tomu, že některé údaje byly již prezentovány v případové studii metodiky č. 1, jsou zde představeny jen stručně. I když případová studie prezentuje některé z předběžných výsledků, účelem není poskytnout jednoznačné informace o vodní bilanci v 21. století, ale především názorně představit koncept analýzy a aplikaci metodiky.

2.1 Charakteristika povodí řeky Dyje

2.1.1 Klimatické podmínky

Dlouhodobý průměr (1981–2010) průměrné roční teploty vzduchu v povodí Dyje činí 8,3°C. Území s nadmořskou výškou do 300 m n. m. jsou mírně teplejší (9,4 °C), naopak oblasti s nadmořskou výškou nad 300 m n. m. chladnější (7,6 °C). Od poloviny 80 let 20. století lze pozorovat nárůst teploty vzduchu. Trendy jsou pro všechny sezóny významně rostoucí (statisticky signifikantní trend při hladině významnosti p = 0,05). Průměrná roční teplota roste o 0,51 °C za 10 let, což odpovídá i průměrným hodnotám v ČR.

Dlouhodobý průměr (1981–2010) roční sumy srážek v povodí Dyje je 613,6 mm. Polohy pod 300 m n. m. jsou srážkově chudší (530,7 mm/rok) v porovnání s polohami nad 300 m n. m. (651,5 mm/rok). V ročních sumách pozorujeme malý růst srážek a to 7 mm za 10 let. V zimě, na jaře a v létě je sice paradoxně pozorován klesající trend, ale na podzim rostoucí. Pod 300 m n. m. pozorujeme mírný rostoucí trend, naopak ve vyšších polohách pokles. Je ale nutné zdůraznit, že změny jsou malé a srážky jsou velmi variabilní a trendy statisticky nevýznamné.

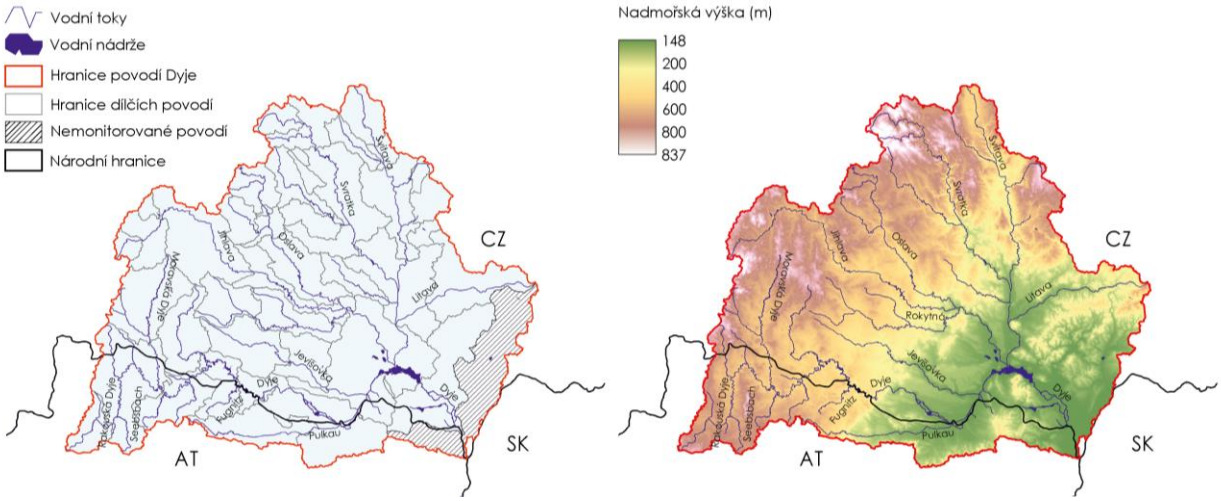
Referenční evapotranspirace (ET_o) představuje potenciální evapotranspiraci hypotetického travního porostu nelimitovaného vodou ani živinami (Allen et al., 1998). Průměrná hodnota roční (ET_o) v letech 1981–2010 byla v povodí Dyje 688,1 mm. S ohledem na skutečnost, že srážky nevykazují žádné dlouhodobé trendy, ale ET_o statisticky významně narůstá, lze hovořit o zvyšování aridity dané oblasti.

2.1.2 Charakteristika půd

Rozšíření půdních typů v oblasti povodí Dyje je úzce spjato s geomorfologickým členěním území české i rakouské části povodí. V české části povodí Dyje se nejčastěji vyskytují kambizemě (58,7 %), které jsou dominantním půdním typem především ve středních a vyšších nadmořských výškách povodí. V dolních částech povodí jsou nejčastějším půdním typem černozemě (17,4 %). V české části povodí se z půdních typů dále vyskytují hnědozemě (5,5 %), v oblasti toků fluvizemě (4,8 %), pelosoly a pseudogleje (obě 4 %). Obdobně v rakouské části povodí jsou nejčastějším půdním typem kambizemě (55,2 %), které dominují středním a vyšším nadmořským výškám povodí. V dolních částech povodí jsou nejčastějším půdním typem černozemě (33,4 %). V rakouské části povodí se dále vyskytují pseudogleje (8,3 %) a v oblasti toků fluvizemě (0,7 %). Zbylou plochu v obou případech zahrnují ostatní půdní typy.

2.1.3 Využití krajiny

Převážnou část české části povodí Dyje tvoří orná půda (59 %, CORINE Land Cover 2018). Další nejpočetnější skupinou využití území jsou lesy, převážně jehličnaté (16 %). Listnaté lesy pokrývají asi 6 % povodí Dyje a smíšené pak 7 %. Celková lesnatost území je zhruba 30 %, což odpovídá přibližně průměrné hodnotě České republiky. Lesy jsou v posledních letech postiženy kůrovcovou kalamitou, která decimuje především stejnověké smrkové porosty. Na druhou stranu odumřelé smrkové monokultury mohou být do budoucna nahrazeny lesem s rozmanitější skladbou, a tak může vzniknout stabilnější ekosystém. O zbytek území se rovným dílem dělí pastviny a zastavěná plocha (obě kategorie 6 %). Rakouská a česká část povodí Dyje jsou v procentuálním zastoupení jednotlivých tříd podobné. V Rakouské části je však více orné půdy (66 %) než v české části (58 %). Celková lesnatost je naopak vyšší v české části povodí (30 % vs. 23 %). Rozdíl je také v druhové skladbě lesa. Na obou stranách povodí sice převládají jehličnaté lesy, avšak v rakouské části tvoří celých 64 % všech lesů a v české části pouze 53 %. V české části je více smíšených lesů (8 % vs. 4 %) a mírně vyšší podíl nalezneme i v kategorii listnatý les (6 % vs. 5 %). Zbylé třídy mají podobné zastoupení v obou částech povodí. V povodí Dyje se nachází několik větších měst, z nichž nejvýznamnější je Brněnská aglomerace (379,5 tis. ob.). Druhým největším městem v povodí je Jihlava (50,9 tis. ob.) ležící v horní části povodí Jihlavy. Následuje Třebíč a Znojmo s 35,8 tis. a 33,7 tis. obyvatel. Významnější městy nad 10 tis. obyvatel jsou Blansko (12 tis. ob.), Velké Meziříčí (11,5 tis ob.) a Nové Město na Moravě (10,1 tis. ob.). Na Rakouské straně povodí stojí za zmínku město Laa an der Thaya představující největší obec (6,2 tis. ob.).



Obr. 3 Vlevo – mapa povodí řeky Dyje s vymezením 38 dílčích povodích reprezentovaných závěrovým profilem s vodoměrnou stanicí ČHMÚ. Šrafovaně je vyznačeno dílčí povodí, které není v současnosti monitorováno. Vpravo – digitální model terénu povodí řeky Dyje. Součástí obou map je zjednoušená říční síť včetně systému vodních děl.

2.1.4 Hydrologické poměry

Dyje je středoevropská řeka vzniklá spojením Rakouské Dyje a Moravské Dyje v Dolních Rakousích a tekoucí dále na pomezí Rakouska a Česka, převážně po území Moravy. Celková délka toku činí 311 km, na území ČR pak 235,4 km. Hlavními přítoky řeky Dyje jsou Svratka,

Svitava, Jihlava, Oslava, Jevišovka a Rokytná. Povodí Dyje se skládá z 11 povodí 3. řádu, na české straně leží v povodí 129 útvarů povrchových vod. Z hlediska typologie vodních toků jsou v povodí zastoupeny toky středních výšek na krystaliniku (Horní Dyje, Jihlava, Oslava, Rokytná, Svitava, Svratka) a nížinné toky na sedimentárních horninách (dolní Dyje, dolní Svratka). V části povodí zasahující do Českomoravské vysočiny jsou relativně velké úhrny srážek (Horní Dyje a Svratka > 650 mm), srážky na níže položených povodích jsou nižší (Jevišovka, dolní Jihlava a Svratka) a v souvislosti s vyšším výparem v níže položených částech povodí generují podstatně méně odtoku (Obr. 3). Konkrétně, zatímco v horních částech povodí jsou odtoky i kolem 180 mm, v dolních povodích to je již jen kolem 60 mm, což odpovídá rozpětí odtokových součinitelů od téměř 0,3 po 0,11. Podíváme-li se na jednotlivé útvary povrchových vod, tak pro cca 15 % útvarů je odtokový součinitel nižší než 0,1, což jasně vypovídá o zranitelnosti povodí.

Po stránce hydrologické patří oblast povodí Dyje, stejně jako oblast povodí Moravy, k úmoří Černého moře, vodu odvádí prostřednictvím řeky Dyje do Moravy a dále do Dunaje. Hlavní pramennou oblast představuje východní a jižní část Českomoravské vrchoviny. Hustota říční sítě v západní části Dyjsko-svrateckého úvalu je jedna z nejnižších v celé ČR. Vlivem tání sněhu dosahují vodní toky maximálních průtoků převážně v březnu, minimální průtoky jsou podle charakteru toku od června do října. Důležitou roli hrají rašeliniště a rašelinné louky v desítkách lokalit podél vrcholové rozvodnice hlavního evropského rozvodí. Jejich celková plocha je asi 850 ha. Retenční význam mají i vodní nádrže budované na většině řek stékajících z Českomoravské vrchoviny (Dyje, Jihlava, Oslava, Svratka), vodní díla u Nových Mlýnů na Dyji a u Dalešic na Jihlavě. Značný hydrologický a klimatický význam měly i rybníky na jižní Moravě, které se udržely především v širším okolí Lednice, největší z nich je Nesyt (307 ha).

2.1.5 Geologické a hydrogeologické poměry

Horninové prostředí zájmové oblasti povodí Dyje je velmi heterogenní a strukturně velmi složité. Materiálová heterogenita a strukturně komplikovaná geologická stavba je podmíněna zejména jeho dlouhodobým vývojem od proterozoika do recentu. Tato oblast se nachází na rozhraní dvou odlišných geologických jednotek – Českého masívu v západní části zájmové oblasti a systému Západních Karpat.

Zájmová oblast povodí Dyje je z geologického hlediska tvořena předplatformními jednotkami Českého masivu, kterými jsou moravikum, brunovistulikum a moldanubikum tvořenými dominantně metamorfovanými a magmatickými horninami označovanými souhrnně jako krystalinikum. Na krystalinický základ nasedají na východním okraji sedimenty devonu, spodního karbonu (kulmu) a svrchního karbonu až permu označované také společným termínem permokarbon. Pomineme-li pouze malé ostrůvky sedimentů jurského stáří následuje po ukončené variské orogenezi platformní vývoj s mohutnou a plošně rozsáhlou sedimentací v období křídy. Do zájmové oblasti zasahují křídové sedimenty především na severu jižním okrajem vysokomýtské a ústecké synklinály. V období terciéru sedimentovaly horniny v dílčích pánvích tvořících dnes pouze denudační relikty na starších horninách. Plošně nejrozsáhlejší jednotky Západních Karpat, tvořící východní okraj zájmové oblasti, jsou zejména sedimenty karpatské předhlubně a karpatského flyše, které jsou však vlastnostmi velmi odlišné. Severozápadním okrajem zasahuje do zájmové oblasti vnitrohorská vídeňská pánev. Horninové formace Českého masivu i Západních Karpat jsou pak v období kvartéru lokálně překryty akumulačními sedimenty

z období pleistocénu v podobě spraší a vátých písků a aluviálními sedimenty především z období holocénu.

Geologická stavba se promítá do velmi komplexních hydrogeologických poměrů, kdy v zájmovém území jsou zastoupeny všechny typy propustnosti od průlinové, přes puklinovou, průlinovo-puklinovou až po krasovou. Základní bilanční hydrogeologickou jednotkou s jednotným oběhem podzemních vod je hydrogeologický rajón. V povodí Dyje je zastoupeno 22 rajónů svrchní a základní vrstvy hydrogeologické rajonizace ČR. Celkově lze konstatovat že hydrogeologické poměry v celé oblasti povodí Dyje budou z hlediska přestupu podzemních vod do vod povrchových ovlivňovány zejména kvartérními sedimenty (včetně eluvií a deluvií krystalinika), vyjma oblastí křídy a karpatské předhlubně, kde vystupují na bázi kvartérní formace, a i přímo do kvartérních sedimentů, podzemní vody hlubšího oběhu.

2.1.6 Vodní díla a vodohospodářská infrastruktura v povodí Dyje

Z pohledu vodního hospodářství vytváří česká část povodí Dyje tzv. Dyjsko-svrateckou vodohospodářskou soustavu tvořenou celkem 21 vodními nádržemi. Nádrže v této soustavě jsou především víceúčelové s významem i pro širší území a pro přeshraničí a zahrnují víceúčelové vodohospodářské uzly: Znojemský, Ivančicko-Pohořelický, Brněnský, Vírský a Břeclavský.

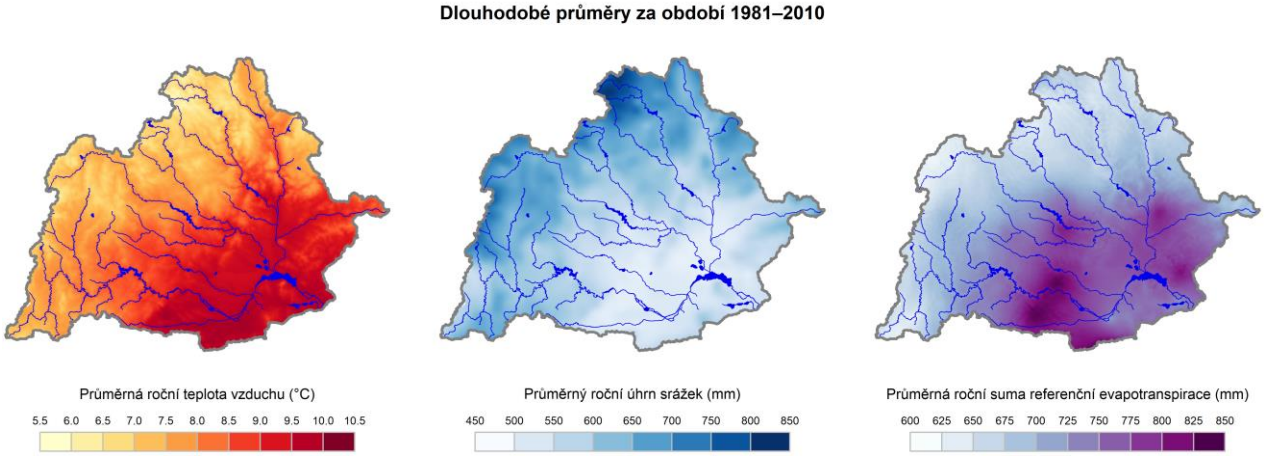
Mezi nejvýznamnější vodní díla (VD) Dyjsko-svratecké vodohospodářské soustavy patří:

- Vodárenská nádrž Nová Říše na Olšanském potoce v povodí Moravské Dyje provozovaná od roku 1985 slouží převážně pro skupinový vodovod Telč – Třešť.
- Vodárenská nádrž Landštejn na Pstruhovci sloužící od roku 1973 převážně pro zásobování vodárenské skupiny Staré Město pod Landštejnem – Slavonice – Dačice.
- VD Vranov představující nejvýznamnější VD na řece Dyji bylo vybudováno v letech 1930–1934 jako betonová gravitační hráz z litého betonu, délky v koruně 290,4 m a výšky nade dnem 47 m. Celkový objem nádrže je 132,696 mil. m^3 a zatopená plocha 761,3 ha. Hlavními účely VD Vranov jsou zajištění minimálního zůstatkového průtoku v toku pod jezem ve Vranově, nadlepšení průtoků pro zajištění minimálního zůstatkového průtoku v Dyji v bilančním profilu jezu Krhovice, odběr pro skupinový vodovod Znojmo a pro skupinový vodovod Vranov – Moravské Budějovice – Dukovany, zajištění průtoků v Dyjsko-mlýnském náhonu od Krhovického jezu (dle mezistátních dohod s Rakouskem), výroba špičkové elektrické energie, odběry pro závlahy převážně pod VD, ochranu před velkými vodami (snížení kulminací velkých vod), rekreace, vodní sporty, sportovní rybolov a plavba.
- VD Znojmo sloužící převážně k týdennímu vyrovnání nerovnoměrných průtoků v Dyji způsobených špičkovým provozem vodní elektrárny Vranov a pro vodárenský odběr.
- V horním toku Jevišovky je provozována nejstarší přehrada na Moravě Jevišovice sloužící ke snížení povodňových průtoků, pro trvalé zajištění minimálního zůstatkového průtoku a pro rekreaci.
- Vodní nádrže Nové Mlýny na Dyji slouží mimo jiné k trvalému zajištění minimálních zůstatkových průtoků, snížení povodňových průtoků, zajištění závlah, rybářství, zlepšení hygieny, čistoty vody a k likvidaci komářích kalamit v oblasti. Horní nádrž Nové Mlýny je provozována od roku 1978 a slouží pro akumulaci vody pro zajištění závlahových odběrů, rekreaci a vodní sporty.

- Nedaleko města Jihlavy, je vodárenská nádrž Hubenov na Maršovském potoce sloužící pro vodárenský odběr pro zásobení Jihlavy, akumulaci vody pro trvalé zajištění minimálního zůstatkového průtoku a ke snížení povodňových průtoků. Výsledný efekt této nádrže zvyšují převody ze sousedních povodí, a to Jedlovského a Jiřínského potoka.
- Na středním toku Jihlavy je od roku 1978 nádrž Dalešice sloužící především k výrobě elektrické energie v přečerpávací vodní elektrárně, akumulaci vody pro trvalé zajištění minimálního zůstatkového průtoku pod nádrží Mohelno, zajištění odběru vody pro jadernou elektrárnu Dukovany z nádrže Mohelno, zajištění odběru pro závlahy a průmysl pod nádrží Mohelno a ke snížení povodňových průtoků.
- Navazující na Dalešice je nádrž Mohelno. Jedná se o vyrovnávací nádrž přečerpávací vodní elektrárny Dalešice sloužící k akumulaci vody pro zajištění odběru vody pro jadernou elektrárnu Dukovany. Vyrovnanými odtoky je zajištěn minimálního zůstatkového průtoku pod VD. Nádrž také slouží ke snížení povodňových průtoků.
- Na řece Oslavě je vodárenská nádrž Mostiště sloužící k akumulaci vody pro vodárenský odběr skupinového vodovodu Velké Meziříčí – Třebíč, k trvalému zajištění minimálního zůstatkového průtoku pod VD, ke snížení povodňových průtoků a energetickému využití.
- Nejvýznamnějším VD Svratecké soustavy je přehrada Vír I. Vodárenská nádrž slouží především ke snížení povodňových průtoků a akumulaci vody pro vodárenský odběr pro skupinové vodovody Bystřice n. Pernštejnem a Žďár n. Sázavou, vodárenský odběr pro Vírský oblastní vodovod, zajištění minimálního zůstatkového průtoku a nadlepšení průtoků pro energetické využití ve špičkové vodní elektrárně Vír I.
- Záložním zdrojem pro potřeby Brna a okolí je Brněnská nádrž na řece Svratce sloužící k akumulaci vody pro zajištění minimálního zůstatkového průtoku, výrobu elektrické energie ve špičkové vodní elektrárně, snížení povodňových průtoků, rekreaci a vodní sporty, plavbu a rybářství.
- V západní části horního povodí Svitavy na toku Křetínka je od roku 1976 nádrž Letovice sloužící především ke kompenzačnímu nadlepšení průtoků ve Svitavě, zajištění minimálního zůstatkového průtoku pod VD, energetickému využití v MVE a ke snížení povodňových průtoků.
- Ve východní části horního povodí Svitavy na toku Bělá je od roku 1990 provozována vodárenská nádrž Boskovice.
- Nejvýchodnější nádrží je vodárenská nádrž Koryčany na řece Kyjovce. Nádrž slouží především k akumulaci vody pro vodárenský odběr skupinového vodovodu Kyjov.

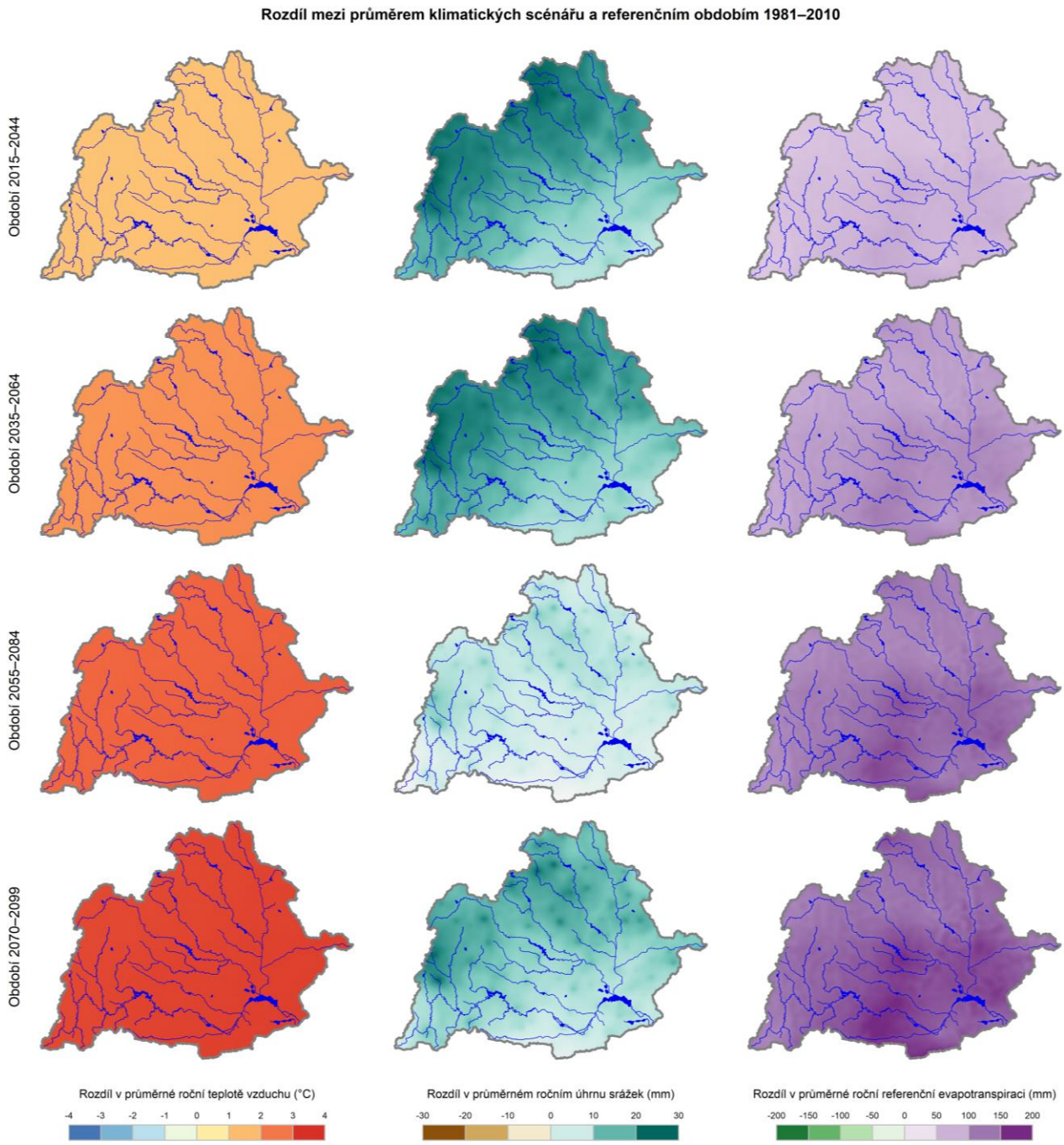
2.2 Dopady změny klimatu na vodní bilanci

Příprava klimatických scénářů byla detailně popsána v metodice č. 1. Celkem bylo připraveno 26 klimatických scénářů vycházejících ze simulací až 7 globálních klimatických modelů (GCM) a 4 prognóz socioekonomického vývoje (SSP). Tyto klimatické scénáře vycházející ze simulací poslední generace klimatických modelů CMIP6 byly připraveny v prostorovém rozlišení 500 m a denním časovém kroku metodou pokročilé přímé modifikace. Tato metoda využívá referenční období z pozorované časové řady. S ohledem na stacionaritu časové řady bylo vybráno časové období 1981–2010. Na základě tohoto období byly následně vytvořeny 4 časové bloky: 2015–2044 (označováno jako “2030”), 2035–2064 (“2050”), 2055–2084 (“2070”) a 2070–2099 (“2085”). Období se navzájem překrývají. Pro následné simulace kombinující adaptační opatření a další změny bylo vzhledem k časové úspoře období 2055–2084 vynecháno.

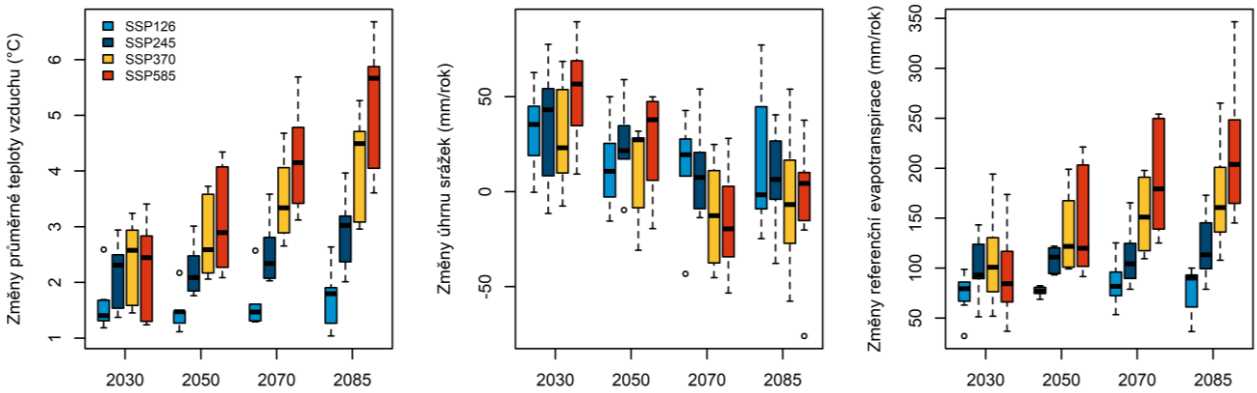


Obr. 4 Prostorová distribuce dlouhodobých (1981–2010) průměrů tří vybraných klimatologických proměnných podstatných pro vodní bilanci: průměrná denní teplota vzduchu, roční úhrny srážek a roční sumy referenční evapotranspirace. Rozdíl mezi ročními srážkami a referenční evapotranspirací představuje tzv. klimatickou vodní bilanci (např. Fischer et al., 2023). Období 1981–2010 je pro účely této případové studie bráno jako referenční období.

Zatímco pro průměr ze všech 26 klimatických scénářů (dále jen střední klimatický scénář) je nárůst teploty pro celé povodí řeky Dyje ke konci století přibližně 4 °C (Obr. 5), scénáře spojené s nejnižší úrovní budoucích emisí indikují zvýšení teploty pouze o 1 °C, avšak scénáře spojené s nejvyššími emisemi nárůsty o více než 6 °C (Obr. 6). V případě srážek jsou změny pro střední scénář v rozmezí ±30 mm/rok (Obr. 5) a pro všechny scénáře pak přibližně ±60 mm/rok (Obr. 6). Změny v referenční evapotranspiraci jsou vždy pozitivní a mnohem výraznější než změny srážek a dosahují v nížinách až 200 mm/rok pro střední scénář (Obr. 5) a i více než 200 mm/rok pro celé povodí řeky Dyje se zohledněním více scénářů (Obr. 6).

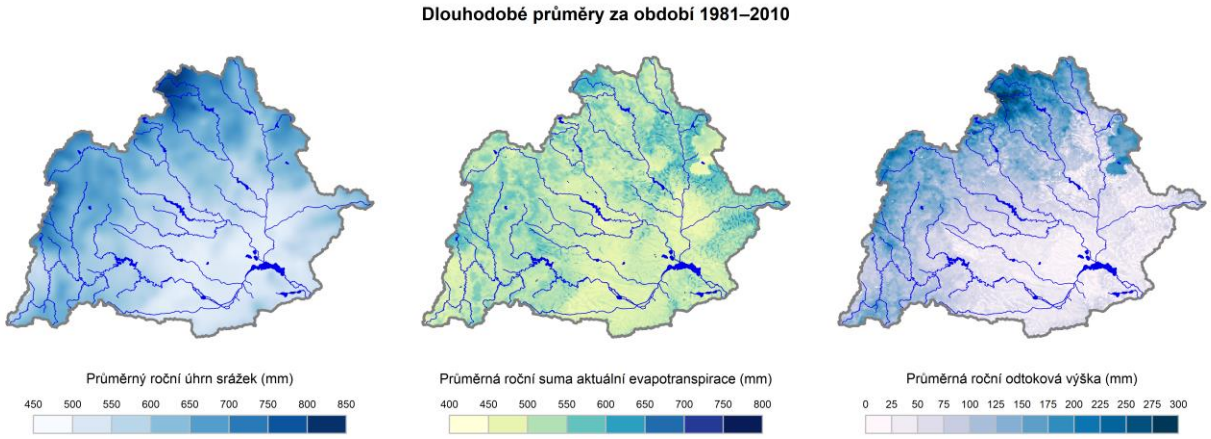


Obr. 5 Změny dle středního klimatického scénáře (průměr ze všech klimatických scénářů) vůči referenčnímu období (1981–2010) pro vybrané klimatologické proměnné (průměrná teplota vzduchu, průměrné roční úhrny srážek a průměrné roční sumy referenční evapotranspirace) pro čtyři výhledová třicetiletá období. Střední scénář představuje průměr z celkem 26 klimatických scénářů.

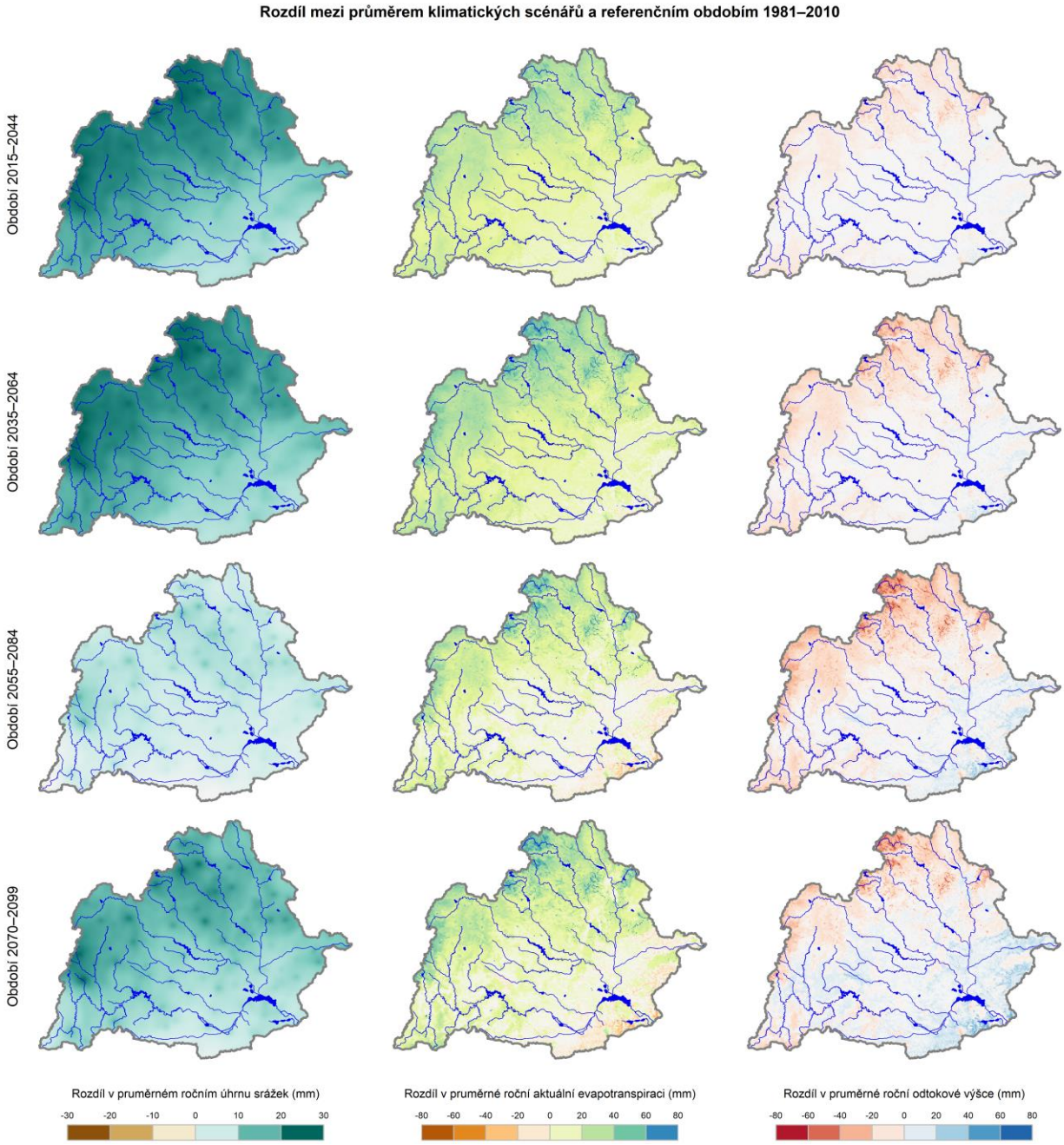


Obr. 6 Krabicové grafy pro tři vybrané klimatologické proměnné (průměrná teplota vzduchu, průměrné roční úhrny srážek a průměrné roční sumy referenční evapotranspirace), znázorňující změny oproti referenčnímu období 1981–2010 pro celkem čtyři výhledová třicetiletá období. Klimatologické proměnné představují časové řady prostorového průměru celého povodí řeky Dyje. Jednotlivé barvy kategorizují klimatické scénáře dle různých socioekonomických scénářů (SSP). Centrální část grafu, krabice, ukazuje rozptyl středních 50 % dat (mezikvartilový rozsah). Spodní a horní hrany krabice odpovídají prvnímu a třetímu kvartilu dat, které vymezují střední polovinu datové sady. Čára uvnitř krabice ukazuje medián (druhý kvartil) datové sady, což je hodnota, která dělí soubor na dvě stejně velké poloviny. Úsečky grafu se táhnou od horní a dolní části krabice k nejvyšším a nejnižším hodnotám v datové sadě, které nejsou považovány za odlehlé hodnoty. Tyto úsečky naznačují rozsah většiny dat. Body umístěné mimo tyto úsečky jsou považovány za odlehlé hodnoty. Tyto body ukazují na data, která se výrazně liší od zbytku sady.

Obr. 6 ukazuje, že teplota vzduchu velmi konzistentně roste s mírou emisí dle SSP. Stejně tak je tomu u referenční evapotranspirace. U srážek však nelze pozorovat jakoukoliv v čase konzistentní závislost na SSP.



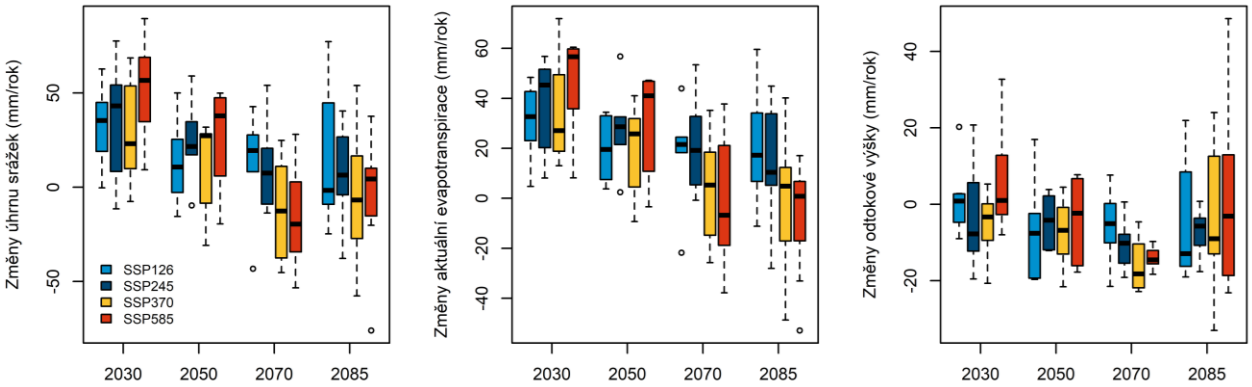
Obr. 7 Mapy dlouhodobých (1981–2010) průměrů tří základních hydroklimatických proměnných: roční úhrny srážek (interpolace pozorovaných dat ČHMÚ), roční sumy aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulovaného distribuovaným hydrologickým modelem MIKE SHE.



Obr. 8 Změny dle středního klimatického scénáře vůči referenčnímu období (1981–2010) pro vybrané hydroklimatické proměnné: roční úhrny srážek (interpolace pozorovaných dat ČHMÚ), roční sumy aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulovaného distribuovaným hydrologickým modelem MIKE SHE. Změny zahrnují čtyři výhledové třicetileté období. Střední scénář představuje průměr z celkem 26 klimatických scénářů.

Simulace distribuovaným hydrologickým modelem MIKE SHE pro referenční období (Obr. 7) a čtyři výhledová období (Obr. 8) indikují mírný, v rámci celého povodí poměrně rovnoměrný, nárůst srážek. Vyšší než tento nárůst srážek je však nárůst aktuální evapotranspirace a to především v horních částech povodí. To vede v těchto zdrojových oblastech k výraznému poklesu celkového odtoku. U těchto simulací bylo předpokládáno, že v krajině v budoucích podmínkách nedoje k

žádným změnám, tj. žádná adaptační opatření nebudou aplikována, a výsledné rozdíly tak poukazují pouze na dopad klimatické změny. Nicméně i tato základní verze modelu zohledňuje, že vegetace má určitou dynamiku závislou na meteorologických podmínkách konkrétního roku (dynamický začátek a konec růstové sezóny a negativní reakce vegetace na sucho) stanovenou prostřednictvím parsimonního modelu vývoje vegetace dle Xin et al. (2020). Dle této schematizace bude budoucí vegetace v dolních částech povodí vystavena vysokému stresu atmosférického sucha[2] způsobeného velmi vysokým sytostním doplňkem[3], což povede k výrazným poklesům transpirace a tvorby listové plochy. Jako následek lze pozorovat v těchto oblastech pokles aktuální evapotranspirace a rovněž paradoxně mírný nárůst celkového odtoku.



Obr. 9 Krabicové grafy pro tři vybrané hydroklimatické proměnné (průměrné roční úhrny srážek představující vstupní data, roční sumy aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulovaného distribuovaným hydrologickým modelem MIKE SHE) znázorňují změny oproti referenčnímu období 1981–2010 pro celkem čtyři výhledová třicetiletá období. Hydroklimatické proměnné představují časové řady prostorového průměru celého povodí řeky Dyje. Jednotlivé barvy kategorizují klimatické scénáře dle různých socioekonomických scénářů (SSP).

Stejně jako u srážek, ani u aktuální evapotranspirace a celkového odtoku v povodí řeky Dyje nelze pozorovat jakoukoliv v čase konzistentní závislost na SSP (Obr. 9).

Odtok modelovaný hydrologickým modelem MIKE SHE je generován ze 2 modulů (navzájem propojených částí modelovacího nástroje). Rychlý povrchový odtok z modulu povrchového proudění (Overland Flow) zahrnuje **plošný povrchový odtok** a také **koncentrovaný odtok**

[2] Atmosférické sucho se týká situace, kdy v atmosféře chybí vlhkost, což vede ke snížení srážek a zvyšuje potenciál pro suché podmínky v krajině. Tento stav může mít vážné důsledky pro zemědělství, vodní zdroje a ekosystémy. Atmosférické sucho často souvisí s vysokými hodnotami sytostního doplňku, protože suchý vzduch zvyšuje poptávku po vlhkosti z půdy a rostlin.

[3] Sytostní doplněk (vapor pressure deficit, VPD) je termín používaný v meteorologii a ekofyziologii rostlin, který popisuje rozdíl mezi množstvím vodní páry, kterou by vzduch mohl obsahovat, kdyby byl nasycen, a aktuálním množstvím vodní páry. Sytostní doplněk je klíčovým ukazatelem pro rostlinný růst, protože ovlivňuje transpiraci rostlin a schopnost vzduchu absorbovat vlhkost z půdy a rostlin. Při konstantní relativní vlhkosti je sytostní doplněk exponenciální funkcí teploty. S rostoucím sytostním doplňkem narůstá transpirace rostlin. Nicméně řada rostlin včetně dřevin reagují na rostoucí sytostní doplněk přivíráním průduchů, čímž brání poklesu hydratace pletiv. Přivírání průduchů však omezuje příjem CO_2, a tedy fotosyntézu, čímž se rostliny dostávají do stresu. K tomuto fenoménu dochází i při dostatečné zásobě vody v půdě (Novick et al., 2016). S rostoucí globální teplotou nelineárně narůstá sytostní doplněk, což může vést ke stresu rostlin i za předpokladu dostatečné zásoby půdní vláhy.

modelem nepopsanými vodními toky. Tento odtok odvádí do říčního koryta vodu přímo z povrchu, aniž by prošla půdní vrstvou, a doba zdržení takové vody je v řádu jednotek až desítek minut (dle vzdálenosti lokality od vodního toku).

Z modulu saturované zóny je do říční sítě přiváděn **hypodermický odtok** (Saturated Drainage). Jedná se o odtok gravitační vody ve vrchní podpovrchové vrstvě odvedený do vodního toku předpokládanou sítí preferenčních cest s dobou zdržení v řádu hodin až jednotek dnů. Dále je do říční sítě přiváděn **základní odtok** (Base Flow) daný přímou komunikací saturované zóny a koryta vodního toku, u kterého je možné předpokládat mnohonásobně vyšší dobu zdržení v řádu dnů až let (podle konkrétních hydrogeologických podmínek dané lokality).

Celkový odtok prezentovaný v této metodice je součet výše popsaných složek. Pro potřeby pochopení hydrologických procesů a jejich změn byly kromě celkového odtoku hodnoceny i jednotlivé složky, a to především ve formě agregované do dvou skupin – přímý a základní odtok. **Přímý odtok** je podle definice ČHMÚ[4] definován jako ta část srážek nebo tání sněhu, která relativně rychle odtéká povrchově nebo podpovrchově do toku. Skládá se ze dvou složek:

1) povrchového odtoku (surface runoff),
2) hypodermického odtoku (interflow/subsurface runoff).

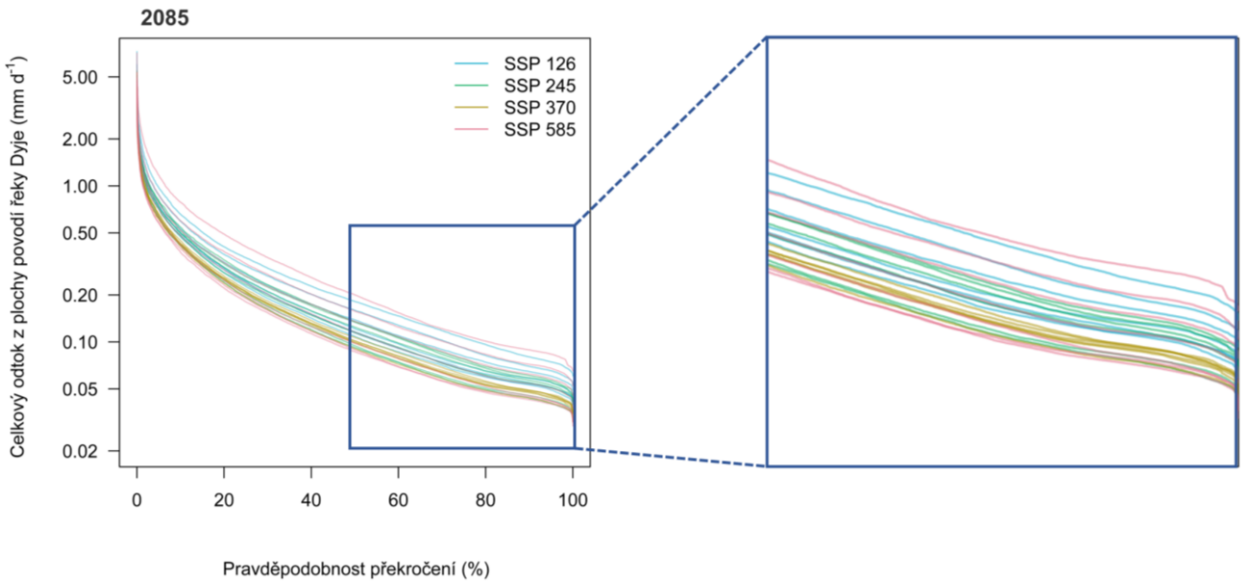
V případové studii povodí řeky Dyje jsou modelovány všechny výše popsané formy odtoku. Nicméně, při značné míře generalizace je zapotřebí si uvědomit, že procesně založený model vycházející z fyzikálních podmínek schematizovaného prostředí přerozděluje jednotlivé složky specifickým způsobem. Hranice mezi základním a hypodermickým odtokem je ovlivněna počtem zahrnutých (schematizovaných) vodních toků. Při zachování velikosti buňky výpočetního gridu 500 m bylo nutné do korytové schematizace hydralulickým modelem zahrnout jen hlavní toky a jejich významné přítoky. Výsledný základní odtok je tudíž výsledkem komunikace těchto toků se saturovanou zónou v jejich okolí. Zbylá část základního odtoku připadající na komunikaci nepopsaných toků je připojena ke složce hypodermického toku formou mělké podpovrchové drenáže. Toto tvrzení dokazuje srovnání s výsekovým modelem horního toku Svratky s menší mírou generalizace, který byl zhotoven pro metodické účely v gridu o velikosti buňky 200 m a je v něm zahnuto větší množství vodních toků. Základní odtok jako výsledek tohoto detailního modelu Svratky (200 m) vyhodnocený z referenčního období v profilu 4480 je dvakrát vyšší než základní odtok vyhodnocený ve stejném profilu a období z modelu Dyje 500 m. Z výše popsaných důvodů rozdělení přímý/základní odtok v modelu Dyje (500 m) podhodnocuje význam složky základního odtoku a srovnatelnost hodnot s jinými metodami určení základního odtoku je omezená. Nicméně, rozdělení je konzistentní v rámci všech simulací, a tudíž lze hodnoty srovnávat napříč klimatickými scénáři a modelovými variantami.

Výsledné časové řady denních průměrů celkového odtoku povodí řeky Dyje byly pro účely vyhodnocení a srovnání vyobrazeny formou čar překročení hodnot celkového odtoku (Obr. 10 a Obr. 11). Pro variantu modelu nezohledňující žádné změny v krajině (variantu bez adaptačních opatření) byly pro čtyři simulované období vyobrazeny čáry překročení denních hodnot celkového odtoku všech klimatických scénářů. Toto zobrazení vyjadřuje nejistoty v klimatických okrajových podmínkách a vyhodnocení efektu klimatické změny v rámci celého spektra klimatických scénářů.

Na Obr. 10 je patrné že odtok, narozdíl od teploty vzduchu či ET_o (Obr. 6), nevykazuje žádnou konsistentní závislost na kategorii SSP. Např. SSP 585 poskytuje jak nejvyšší hodnoty, tak

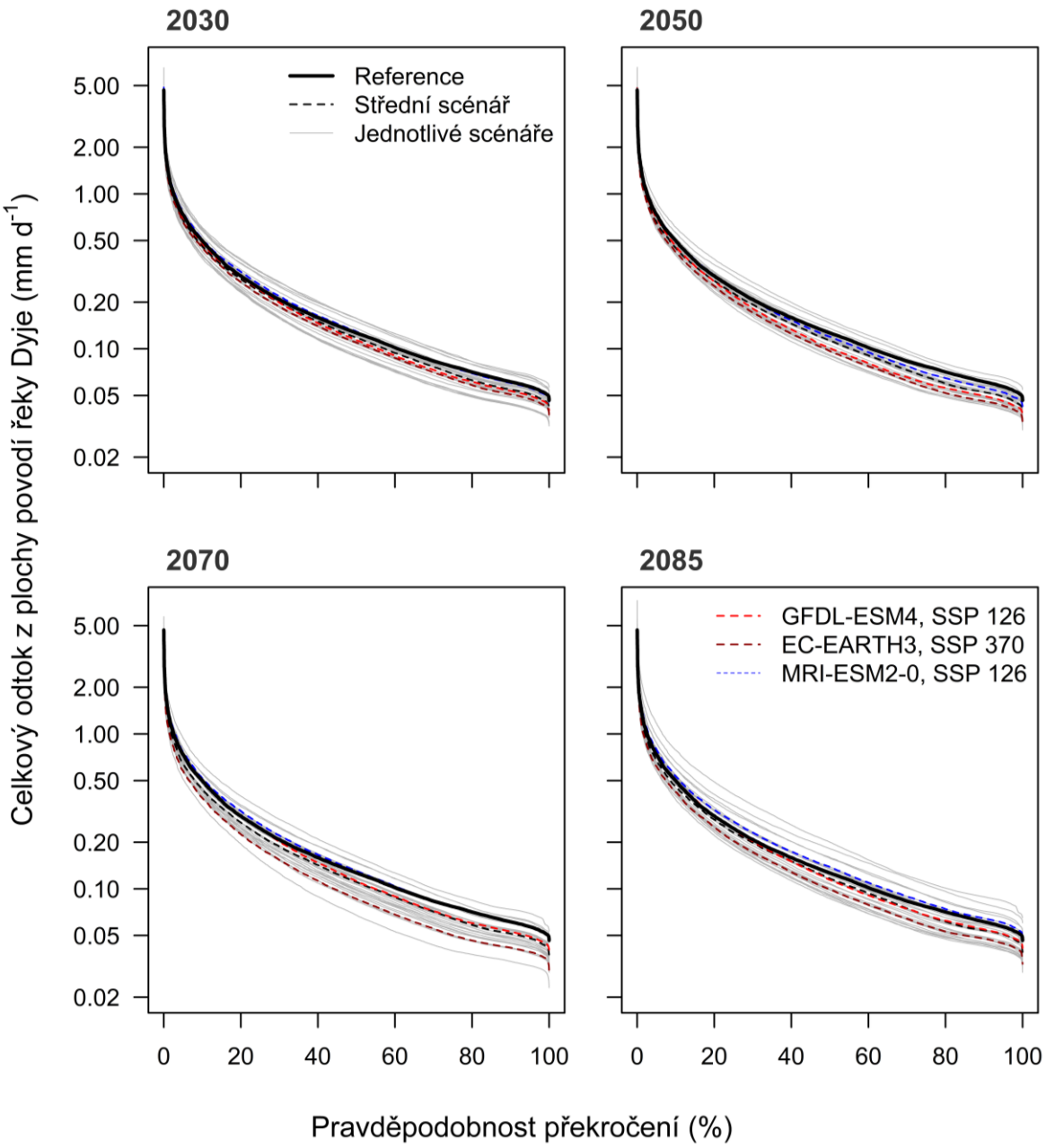
[4] https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/navmenu.php_tab_1_page_1.1.0.htm

nejnižší hodnoty odtokových výšek. Příčinou této vysoké variability v rámci kategorií SSP je variabilita srážek (Obr. 9).



Obr. 10 Vlevo – Ukázka čár překročení celkového odtoku pro sadu 7 klimatických modelů a čtyř barevně odlišených SSP pro poslední třicetileté období 21. století. Vpravo – přiblížený pohled na druhou (sušší) polovinu čar překročení. Za povšimnutí stojí, že nelze identifkovat závislost odtoku na kategoriích SSP.

Z toho důvodu je uvažováno pro účely této případové studie, že všechny klimatické scénáře a z nich odvozené hydrologické simulace představují možný vývoj hydrologických poměrů v budoucnosti. Střední scénář je pak vybírán jako medián ze všech klimatických scénářů napříč SSP či jako konkrétní kombinace klimatického modelu a SSP, která se mediánu nejvíce přibližuje. Mimo střední scénář byly identifkovány rovněž i kombinace SSP klimatických modelů reprezentujících horní a dolní kvartil. Z hodnocení čar překročení celkových odtoků z celého povodí Dyje pro pravděpodobnost vyšší než 50 % (sušší polovina) byl vybrán jako **střední scénář** klimatický model GFDL-ESM4 pro SSP 126. Na tomto místě je nutné zdůraznit, že volbu středního scénáře nelze zobecňovat nad rámec této případové studie. Lze pouze konstatovat, že pro výběr scénářů, pokud je nezbytné pracovat pouze s jedním (tento postup obecně nedoporučujeme), je vhodné realizovat simulace pro celé spektrum scénářů a následně vybrat střední hodnoty dle odtoku, nikoli na základě teplot a srážek, kde by výběr středního scénáře nemusel nutně odpovídat středním hodnotám odtokových řad (myšleno z pohledu jejich variability). **Sušší scénář** byl identifikován jako kombinace klimatického modelu EC EARTH3 a SSP 370. **Vlhčí scénář** byl určen kombinací klimatického modelu MRI-ESM2-0 a SSP 126 (Obr. 11).



Obr. 11 Čáry překročení pro celkový odtok z plochy povodí řeky Dyje pro čtyři různá třicetiletí, kde uvedený rok indikuje střed období. Černá souvislá linie značí simulaci pro referenční období. Jednotlivé plné šedé linie zobrazují různé kombinace klimatických modelů a SSP, kde medián ze všech scénářů je vyobrazen přerušovanou černou linií. Barevné přerušované linie pak značí výběr konkrétní kombinace modelů a SSP (názvy v pravém dolním panelu), které mají v průběhu celého století nejblíže ke kvantilu 0,75 (modrá), ke kvantilu 0,5, tj. mediánu (červená) a ke kvantilu 0,25 (tmavě červená).

2.3 Vliv adaptačních opatření na vodní bilanci

2.3.1 Uvažovaná adaptační opatření a další změny

V rámci případové studie byla navržena a testována adaptační opatření pouze v obecné rovině s cílem identifikovat parametry v hydrologických modelech, jež by tato opatření reprezentovala. Konkrétně byly připraveny datové sady pro návrhy změn retenčních a infiltračních charakteristik půd, změny dřevinné skladby lesních porostů, změny osevních postupů a pěstovaných plodin a série technických opatření zahrnující výstavbu vodních děl a změny odběrů pro vodárenské účely. Zamýšlená obecná i konkrétní adaptační opatření v povodí řeky Dyje vycházejí z materiálů MŽP a MZe, které byly publikovány ve spojitosti s aktivitami boje proti suchu, a z dalších dostupných zdrojů. Mezi zamýšlená obecná adaptační opatření patří např.:

a. změny dřevinné skladby;
b. zvýšení retenční kapacity a infiltrace zemědělských a lesních půd;
c. snížení erozního rizika a utuženosti půd;
d. přírodě blízká opatření dle metodik MŽP;
e. výstavba malých vodních nádrží dle přijaté koncepce voda v krajině;
f. revitalizace a renaturalizace vodních toků;
g. komplexní pozemkové úpravy;
h. výstavba nádrží dle generelu LAPV;
i. převody vody pro vybrané účely (vodárenské, zemědělství);
j. adaptační opatření v urbanizovaných povodích (např. Brno).

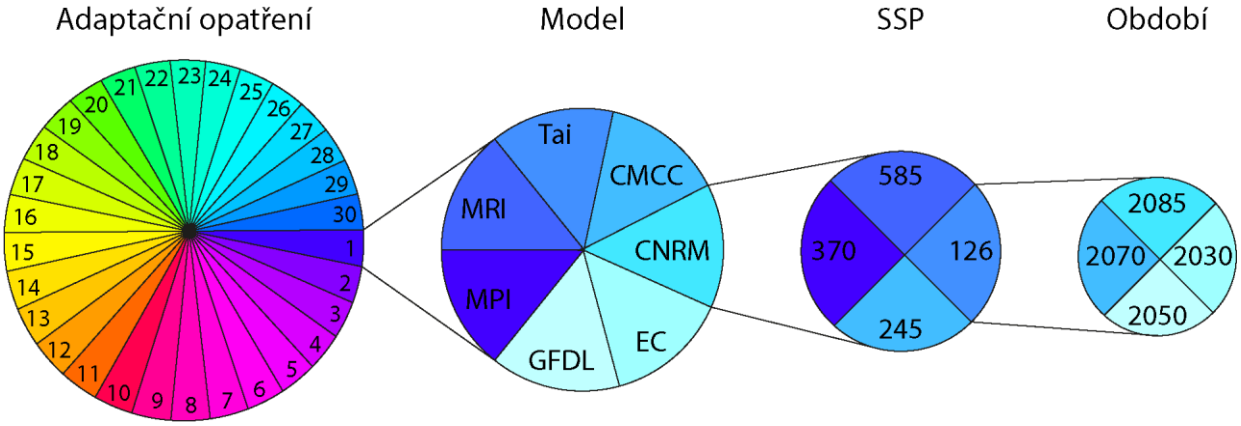
Jako významné adaptační opatření v lesnictví je považována změna dřevinné skladby tak, aby reflektovala probíhající klimatickou změnu, ale i např. změny v lesních cestních sítích s cílem posilnit schopnost lesů zadržovat vodu. Dále je počítáno s různými opatřeními vedoucími ke změnám retenční kapacity půd, snížení půdní utuženosti a k podpoře infiltrační schopnosti představující hlavní směr adaptačních opatření MZe, které budou postupně realizovány a v budoucnosti zřejmě dotačně zvýhodňovány. V zemědělství je dále uvažováno s opatřeními zahrnujícími změnu zemědělského hospodaření (např. no-till, pásové obdělávání, aplikace biouhlu, změny osevních postupů), zpomalení povrchového odtoku např. protierozní opatření či budování/využívání závlah (ostrovních/velkých celků). V neposlední řadě je počítáno s komplexními pozemkovými úpravami a opatřeními typu „chytrá krajina“.

Uvažovanými adaptačními opatřeními jsou i přírodě blízké úpravy toků, revitalizace a renaturalizace vodních toků dle metodik MŽP, které jsou navrhovány za účelem protipovodňové ochrany či za účelem zadržování vody v krajině. Na druhé straně jsou uvažována adaptační opatření v podobě výstavby vodních děl pro umělou akumulaci vod dle publikovaného generelu LAPV a jeho plánované novely. Mezi významné adaptační opatření patří v povodí Dyje zamýšlené posílení povrchových vodních zdrojů a jejich vzájemné propojení, které mají vést k uspokojení potřeb pitné vody pro městské aglomerace. Vlastní adaptační opatření navrhovaná krajskými úřady v rámci agendy územního rozvoje a komplexních pozemkových úprav představují další zamýšlené adaptační aktivity v krajině a systému vodních toků.

Distribuovaný hydrologický model byl sestaven v prostředí nástroje MIKE SHE / MIKE 11(MIKE HYDRO) pro celé povodí řeky Dyje v prostorovém rozlišení 500 m. Model sestává z pěti pracovních částí, sestavených ve stejném rozlišení a propojených v jeden celek, pro které jsou

použity jednotné datové vstupy pokrývající celé území. Celková plocha modelovaného území činí 12 739 km^2, z toho asi 2 135 km^2 je na území Rakouska. Základní časový krok výpočtu je 1 den. Výsledky jsou ukládány v intervalech 1 den a 1 měsíc a dále vyhodnocovány.

Sestavený, nakalibrovaný a verifikovaný (viz metodika č. 1) distribuovaný hydrologický model MIKE SHE (Abbott et al., 1986) byl následně využit pro rozsáhlý počet simulací s cílem posoudit vliv změny klimatu a adaptačních opatření v povodí řeky Dyje. Celkem se jedná o 30 variant specificky nastavených modelů představujících buď referenční stav využití krajiny (tj. odpovídající současným podmínkám) či očekávané nebo hypotetické změny využití krajiny včetně zavedení různých adaptačních opatření. Těchto 30 variant bylo simulováno pro 7 různých klimatických modelů a pro 4 různé socioekonomické scénáře vedoucí k různým úrovním emisí. Tato sada byla simulována v průběhu 3–4 třicetiletí reprezentujících budoucí období.



Obr. 12 Schematické znázornění simulací distribuovaným hydrologickým modelem povodí řeky Dyje. První kruh (zleva) znázorňuje očekávané či hypotetické změny využití krajiny včetně různých adaptačních opatření. Těchto 30 variant bylo zatíženo sérií okrajových podmínek zahrnující 7 klimatických modelů (druhý kruh), 4 různé socioekonomické scénáře (SSP) vedoucí k různým úrovním emisí (třetí kruh). Celá sada modelů byla simulována v průběhu 3–4 třicetiletí reprezentujících budoucí období (poslední kruh). Období 2070 bylo pro většinu simulací v rámci časové efektivity vynecháno).

Vybraných 30 variant očekávané či hypotetické změny využití krajiny včetně různých adaptačních opatření či specifických nastavení HM spojených s plošnými vstupy lze stručně popsat následovně (tento seznam není konečný a jedná se pouze o pracovní seznam simulací realizovaných v rámci projektu TA ČR SS01010207).

Tabulka 1 Přehledný seznam adaptačních opatření či jiných uvažovaných změn a specifických modelových příkladů včetně jejich základního popisu. Typ zahrnuje Technická opatření (T), Přírodě-blízká opatření (PB) a jejich Kombinaci (K). Oblast vymezuje, na kterou část povodí je opatření zacíleno a Segment určuje hospodářský segment, na jehož adaptaci je opatření zaměřeno: vodohospodářský (VH), zemědělský (Z) a lesnický (L).

ID	Název modelové varianty	Typ	Oblast	Segment
01	Model s parametry a nastavení identickým k modelu referenčního stavu	-	-	-
02	Nádrže LAPV (Borovnice, Kuřimské Jestřabí, Plaveč, Vysočany, Brtnice)	T	Úseky vodních toků	VH
03	Celoplošně orná půda	PB	Celé povodí	Z
04	Celoplošně trvalý travní porost	PB	Celé povodí	Z
05	Celoplošně smíšený les	PB	Celé povodí	L
06	Zvýšení využitelné vodní kapacity (VVK) o 40 %	PB	Orná půda	Z
07	Rekonstrukce kůrovcové kalamity po roce 2015	PB	Jehličnaté lesy	L
08	Typové plodiny na orné půdě	PB	Orná půda	Z
09	Změna plodin na orné půdě k víceletým pícninám a intenzivnímu využívání meziplodin	PB	Orná půda	Z
10	Koncept „Sámova říše“[5] – Zvýšení propustnosti koryt	PB	Říční síť	VH
11	Koncept „Sámova říše“ – Zvýšení hydraulické drsnosti	PB	Říční síť	VH
12	Koncept „Sámova říše“ – Celková změna vegetačního pokryvu na listnatý les	PB	Celé povodí	L
13	Koncept „Sámova říše“ – Odstranění přehradních nádrží při zachování vodárenských odběrů a zajištění MZP	T	Úseky vodních toků	VH
14	Koncept „Sámova říše“ – Odstranění přehradních nádrží při zachování vodárenských odběrů v současném rozsahu	T	Úseky vodních toků	VH
15	Koncept „Sámova říše“ – Kombinace „přírodě blízkých“ úprav 10–12	PB	Celé povodí	L / Z
16	Koncept „Sámova říše“ – Komplexní sestava variant 10–13 reprezentující povodí bez antropogenních vlivů, ale s požadavky na vodu 21. století	K	Celé povodí	L / Z / VH
17	Zvýšené odběry z VD Vír I a propojení vodárenských soustav Dyje-Vltava	T	Úseky vodních toků	VH

[5] Koncept povodí řeky Dyje bez antropogenních vlivů, ale s požadavky na vodu 21. století označovaný pracovně jako "Sámova říše".

ID	Název modelové varianty	Typ	Oblast	Segment
18	Komplexní varianta realistických přírodě-blízkých opatření	K	Celé povodí	L / Z
19	Technická varianta 17) podpořená výstavbou vodních nádrží dle generelu LAPV	T	Úseky vodních toků	L / Z / VH
20	Technická varianta 17) podpořená výstavbou vodní nádrže Kuřimské Jestřabí dle generelu LAPV	T	Úseky vodních toků	L / Z / VH
21	Změna dřevinné skladby lesa dle plánů OPLR se zohledněním kůrovcové kalamity po roce 2015	PB	Jehličnaté lesy	L
22	Testovací verze průměrných vegetačních parametrů	PB	Celé povodí	L / Z
23	Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v současném nastavení hodnot odběru	T	Úseky vodních toků	VH
24	Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o celou časovou řadu stávajícího odběru Březová	T	Úseky vodních toků	VH
25	Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o polovinu časové řady stávajícího odběru Březová	T	Úseky vodních toků	VH
26	Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o 1,5násobek časové řady stávajícího odběru Březová	T	Úseky vodních toků	VH
27	Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v současném nastavení hodnot odběru	T	Úseky vodních toků	VH
28	Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o celou časovou řadu stávajícího odběru Březová	T	Úseky vodních toků	VH
29	Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o polovinu časové řady stávajícího odběru Březová	T	Úseky vodních toků	VH

ID	Název modelové varianty	Typ	Oblast	Segment
30	Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o 1,5násobek časové řady stávajícího odběru Březová	T	Úseky vodních toků	VH

2.3.2 Integrace adaptačních opatřeních do hydrologického modelu

Tato část popisuje zavedení konkrétních variant (Tabulka 1) do HM. U vybraných opatření jsou přiloženy dílčí výsledky integrované pro celé povodí, anebo pro zajímavé úseky vodních toků či jednotlivé plochy využití území. Výsledky demonstrují směr působení adaptačního opatření a naznačují potenciální rozsah ovlivnění dané oblasti. Hlavním záměrem uvedení výsledků je podpořit a prokázat smysl uvedeného metodologického postupu.

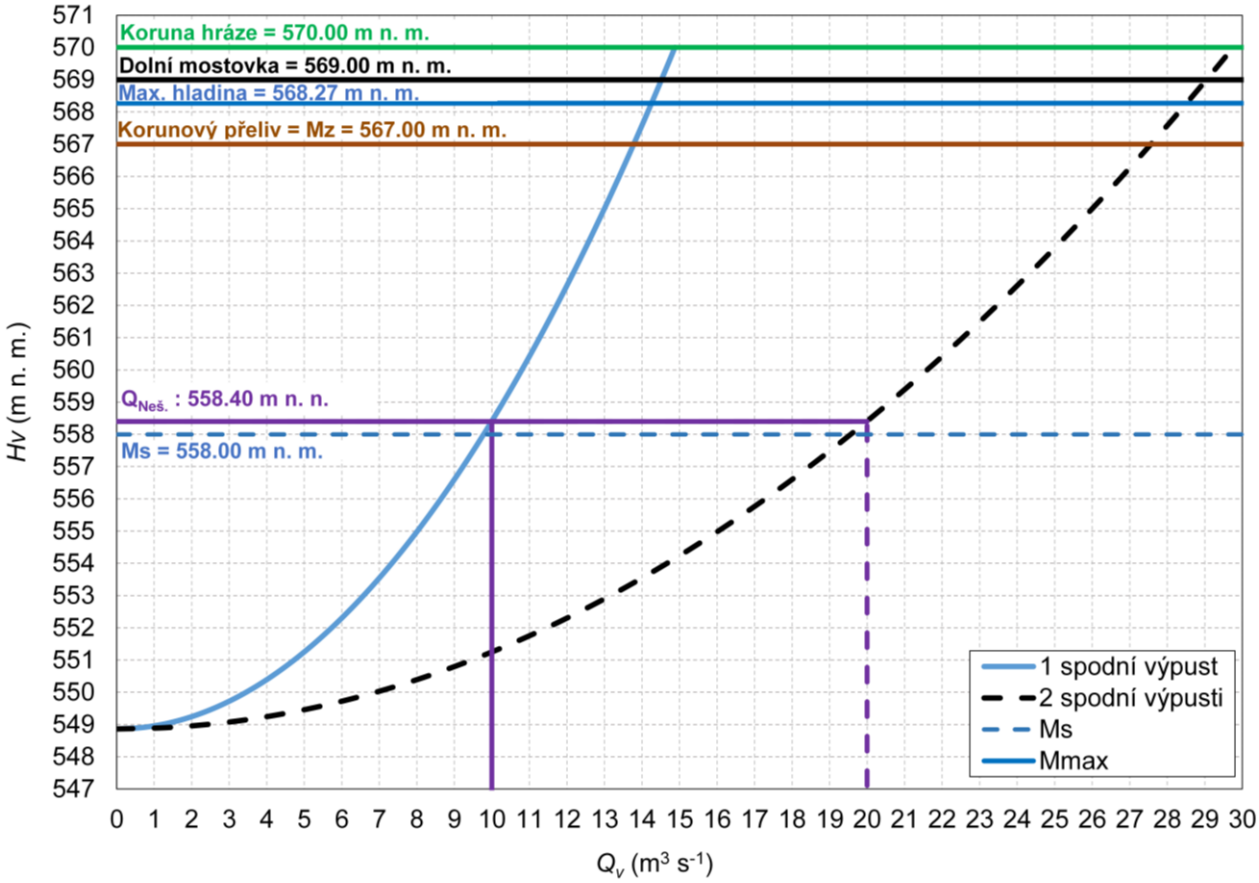
1) Model s parametry a nastavením identickým k modelu referenčního stavu

Verze modelu s identickým nastavením se simulací referenčního stavu. Jedinou změnou oproti referenčnímu stavu je výměna souboru klimatických vstupů (teplota vzduchu, srážky a ET_o) a plošně distribuovaných vegetačních parametrů – index listové plochy (leaf area index, LAI), vegetační koeficient (crop coefficient, K_c) a hloubka kořenění (root depth, RD) – modelovaných na podkladě očekávaných klimatických podmínek pomocí fenologického/růstového modelu (Xin et al., 2018, Bahrami et al., 2022).

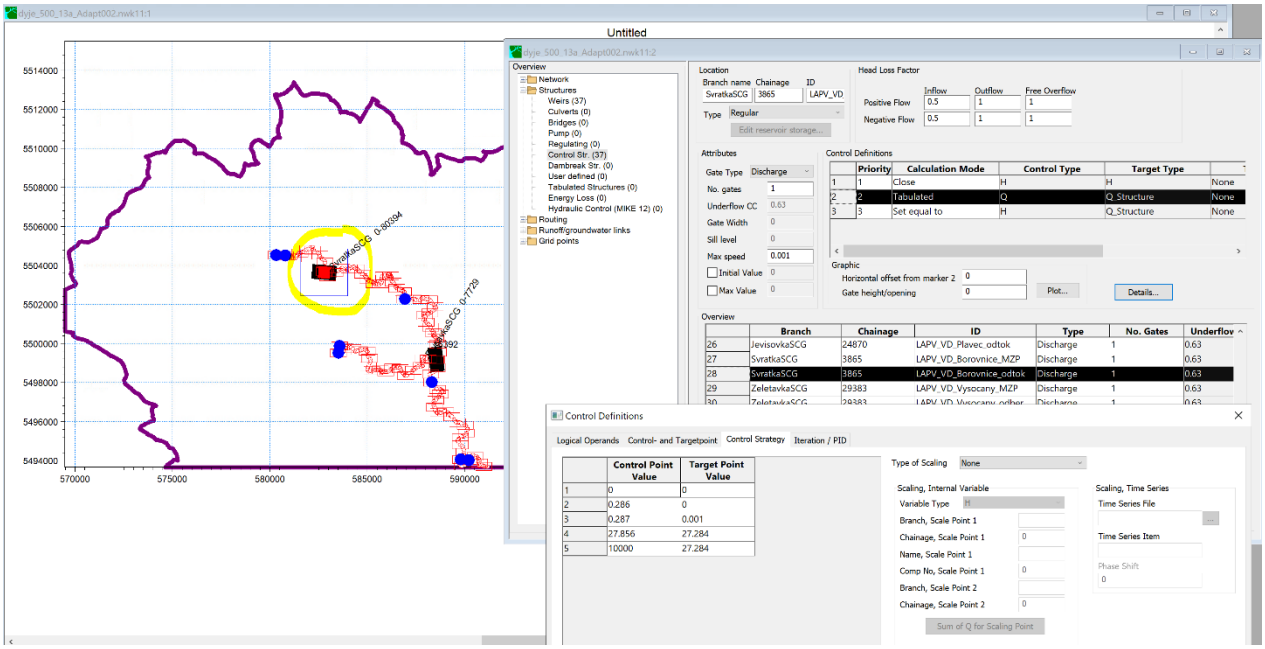
2) Nádrže LAPV (Borovnice, Brodce, Kuřimské Jestřabí, Plaveč, Vysočany)

Do hydraulické části modelu bylo zadáno 5 nádrží z generelu LAPV, konkrétně Borovnice (objem zásobního prostoru 44,056 mil. m^3) na horním toku řeky Svratka (ř. km 3,9), Kuřimské Jestřabí (objem zásobního prostoru 42,20 mil. m^3) na toku Libochovka (ř. km 11,1), Plaveč (objem zásobního prostoru 20,40 mil. m^3) na toku Jevišovka (ř. km 24,9), Vysočany (objem zásobního prostoru 100,00 mil. m^3) na toku Želetavka (ř. km 29,4) a Brodce (objem zásobního prostoru 12,70 mil. m^3) na toku Brtnice (ř. km 1,9). Podkladem pro schematizaci bylo odborné technické zpracování návrhu týmem prof. Říhy z VÚT Brno – Zpracování konceptu vodohospodářského řešení vybraných nádrží (VÚT, Brno, 2022) (Obr. 13).

Každá navržená nádrž z generelu LAPV byla zadána do hydraulického modulu MIKE 11 formou několika objektů na toku (Obr. 14). Výpustný objekt je rozdělen na dvě části. První část popisuje minimální zůstatkový průtok (MZP) navržený pod nádrží. Tato hodnota má nejvyšší prioritu a je zajištěna vždy, když je přítok do nádrže větší nebo roven hodnotě MZP. Zbytek přítoku je odveden spodní výpustí až do kapacity tohoto objektu definované podle navržené geometrie. Po překročení kapacity spodní výpusti je zbylý průtok převáděn přes bezpečnostní přeliv, který je definovaný objektem jezu s širokou korunou. Kapacita tohoto objektu není nikdy překročena. Návrhy nádrží z generelu LAPV nezahrnují návrhy vodárenských odběrů, a proto nejsou z nádrží žádné odběry realizovány.



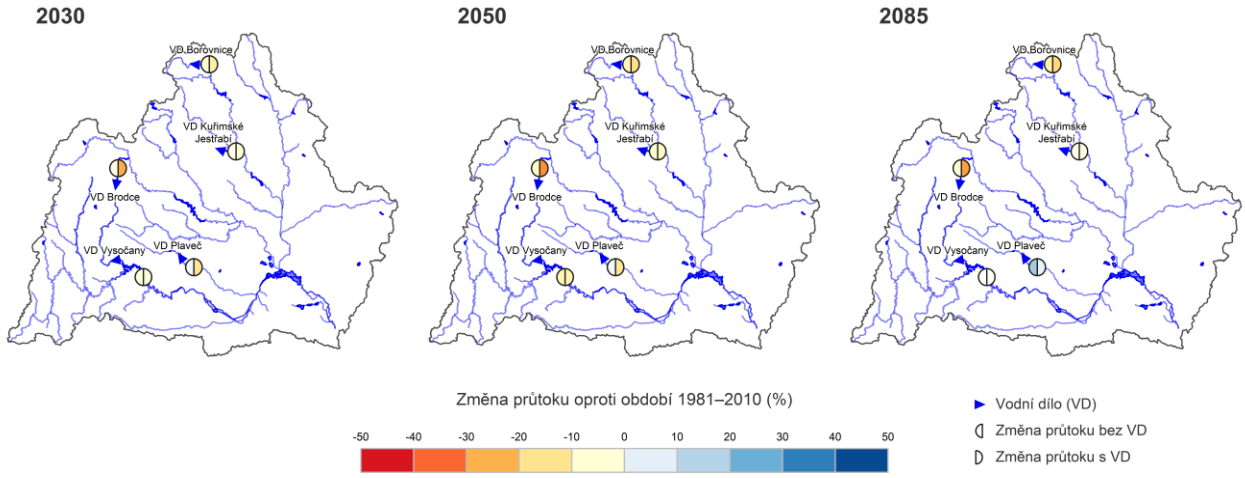
Obr. 13 Příklad technického návrhu pro schematizaci LAPV Borovnice. Vykreslení konsumpčních křivek výpustných objektů. Z grafu je možné odečíst kapacitu spodních výpustí při dané hladině včetně navržených mezních hladin. Rozmezí uvažovaných hladin je od 547 m n. m. do 568 m n. m. Neškodný průtok byl vyhodnocen do hladiny 558,4 m n. m. Po překročení této hladiny je převáděn průtok, který může způsobovat škody při rozlivu na dolním toku i když i tento průtok je menší, než jaký by byl, kdyby přítok do nádrže nebyl nádrží transformován.



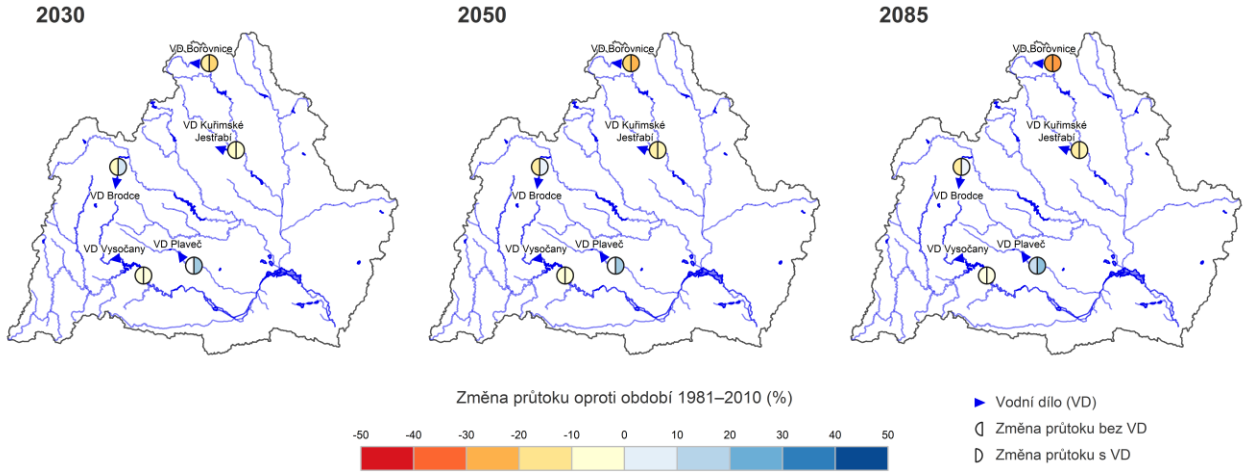
Obr. 14 Příklad zadání výpustného objektu podle návrhu LAPV Borovnice. V tomto případě se jedná o zadání spodní výpustě, zbytku po minimálním zůstatkovém průtoku (0,27 $m^3 s^{-1}$), který je v modelu řešen zadáním zvláštního objektu.

Efekt zbudování vodních děl byl hodnocen jako změny M-denních průtoků (např. Kukla et al., 2022) na nejbližší vodoměrné stanici položené níže po toku. V případě VD Vysočany je nejbližší vodoměrná stanice položena až na toku Dyje, do které se Želetavka vlévá ve zdrži VD Vranov. Z tohoto důvodu je efekt VD Vysočany zhlazen či překryt transformací a nadlepšením z VD Vranov. VD Plaveč je uvažováno 14 km pod hrází VD Jevišovice a přítok do něj je tudíž ovlivněný. Při hodnocení nízkých stavů může docházet ke zdánlivému zhoršení průtoků na dolním toku z důvodu převádění MZP a nadržování nadbytku po MZP v objemu VD pro budoucí zajištění MZP. V případě realizace tohoto VD by bylo nezbytné návrh výpustných objektů a strategií důkladně optimalizovat z hlediska zajištění nadlepšení průtoků na dolním úseku.

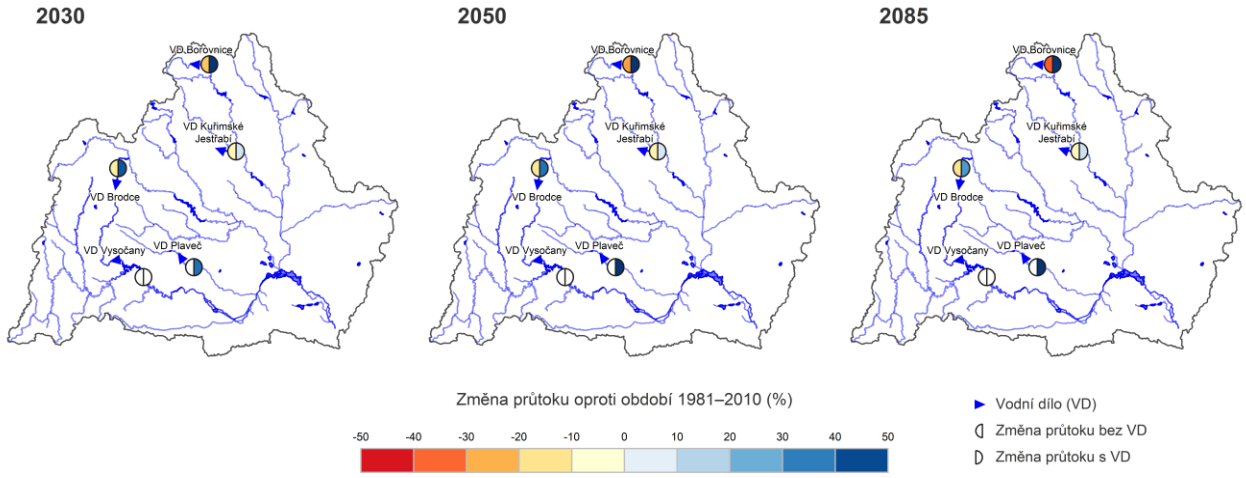
Vodní díla Borovnice, Kuřimské Jestřabí a Brodce jsou zbudovány na horních neovlivněných úsecích. Jejich role v procesu transformace povodňových průtoků a nadlepšování MZP je přímočará a zřejmá z Obr. 15–18.



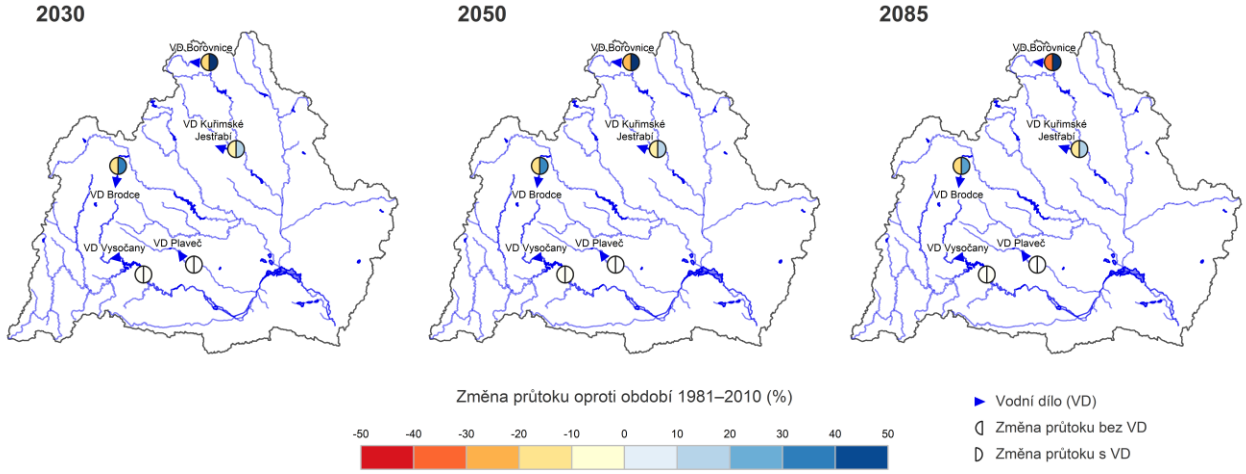
Obr. 15 Změny M-denního průtoku Q30d oproti referenčnímu období 1981–2010 pro střední klimatický scénář (medián ze všech simulací) během různých třicetiletých period pro vybrané vodoměrné stanice ČHMÚ nacházející se neblíže po proudu od uvažovaných vodních děl dle generelu LAPV v povodí řeky Dyje. Záporné hodnoty indikují snížení průtoku, kladné hodnoty naopak jeho zvýšení. Levý půlkruh značí změny oproti referenčnímu období bez vybudovaného VD a pravý půlkruh s vybudovaným VD. Vodní dílo transformuje povodňové průtoky, a tak redukuje povodňové ohrožení na dolním toku. Pozn. – výsledky ovlivnění VD Vysočany jsou srovnány až pod VD Vranov. VD Plaveč je ovlivněno výše položeným VD Jevišovice. Proto jsou výsledky těchto dvou VD v nesouladu s ostatními VD.



Obr. 16 Změny M-denního průtoku Q180d oproti referenčnímu období 1981–2010 pro střední klimatický scénář (medián ze všech simulací) během různých třicetiletých period pro vybrané vodoměrné stanice ČHMÚ nacházející se neblíže po proudu od uvažovaných vodních děl dle LAPV v povodí řeky Dyje. Záporné hodnoty indikují snížení průtoku, kladné hodnoty naopak zvýšení. Levý půlkruh značí změny oproti referenčnímu období bez vybudovaného VD a pravý půlkruh s vybudovaným VD. Pozn. – výsledky ovlivnění VD Vysočany jsou srovnány až pod VD Vranov. VD Plaveč je ovlivněno výše položeným VD Jevišovice. Proto jsou výsledky těchto dvou VD v nesouladu s ostatními VD.



Obr. 17 Změny M-denního průtoku Q330d oproti referenčnímu období 1981–2010 pro střední klimatický scénář (medián ze všech simulací) během různých třicetiletých period pro vybrané vodoměrné stanice ČHMÚ nacházející se neblíže po proudu od uvažovaných vodních děl dle LAPV v povodí řeky Dyje. Záporné hodnoty indikují snížení průtoku, kladné hodnoty naopak zvýšení. Levý půlkruh značí změny oproti referenčnímu období bez vybudovaného VD a pravý půlkruh s vybudovaným VD. Pozn. – výsledky ovlivnění VD Vysočany jsou srovnány až pod VD Vranov. VD Plaveč je ovlivněno výše položeným VD Jevišovice. Proto jsou výsledky těchto dvou VD v nesouladu s ostatními VD.



Obr. 18 Změny M-denního průtoku Q355d oproti referenčnímu období 1981–2010 pro střední klimatický scénář (medián ze všech simulací) během různých třicetiletých period pro vybrané vodoměrné stanice ČHMÚ nacházející se neblíže po proudu od uvažovaných vodních děl dle LAPV v povodí řeky Dyje. Záporné hodnoty indikují snížení průtoku, kladné hodnoty naopak zvýšení. Levý půlkruh značí změny oproti referenčnímu období bez vybudovaného VD a pravý půlkruh s vybudovaným VD. Pozn. – výsledky ovlivnění VD Vysočany jsou srovnány až pod VD Vranov. VD Plaveč je ovlivněno výše položeným VD Jevišovice. Proto jsou výsledky těchto dvou VD v nesouladu s ostatními VD.

3) Celoplošně orná půda

V celé ploše modelu byla zadána jednotná kategorie land use reprezentující třídu 211 (orná půda) databáze CORINE Land Cover 2018 (CLC 18)[6]. Zadání proběhlo formou změny vegetačních parametrů (index listové plochy, vegetační koeficient a hloubka kořenění) na jednotný popis časovou řadou vycházející z měsíčních průměrů platných pro celé referenční období. Jedná se o hypotetický scénář pro představu o vnější obálce efektu jednotlivých změn.

4) Celoplošně trvalý travní porost

V celé ploše modelu byla zadána jednotná kategorie land use reprezentující třídu 231 (trvalý travní porost) databáze CLC 18. Zadání proběhlo formou změny vegetačních parametrů (index listové plochy, vegetační koeficient a hloubka kořenění) na jednotný popis časovou řadou vycházející z měsíčních průměrů platných pro celé referenční období. Jedná se rovněž o hypotetický testovací scénář pro představu o citlivosti na jednotlivé změny.

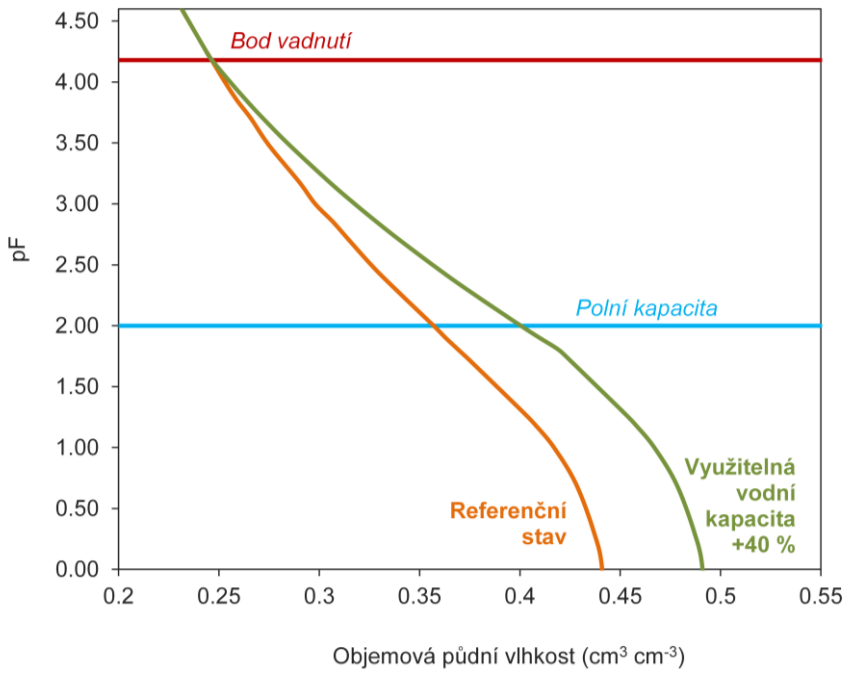
5) Celoplošně smíšený les

V celé ploše modelu byla zadána jednotná kategorie land use reprezentující třídu 313 (smíšený les) databáze CLC 18. Zadání proběhlo formou změny vegetačních parametrů (index listové plochy, vegetační koeficient a hloubka kořenění) na jednotný popis časovou řadou vycházející z měsíčních průměrů platných pro celé referenční období. Cílem variant 3–5 je vytvořit vnější extrémní obálku očekávaných stavů a tím sledovat potenciální rozsah a směr možných změn založených podle relevantních návrhů.

6) Zvýšení využitelné vodní kapacity (VVK) o 40 %

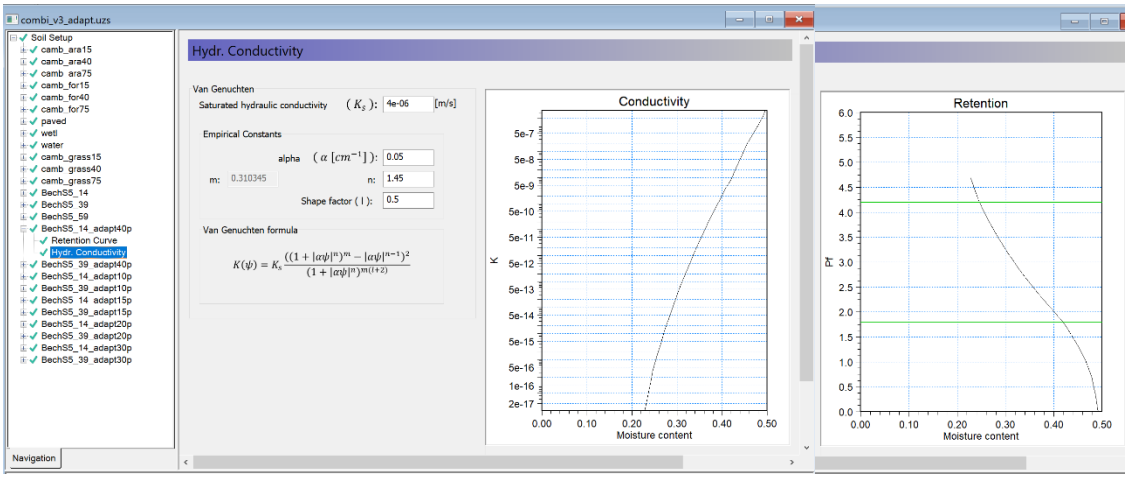
Pro veškerou ornou půdu vymezenou podle CLC 18 jako třídu 211 byly modifikovány parametry retenčních křivek příslušných půd. Modifikace byla provedena v rozmezí vlhkostních potenciálů odpovídajících bodu vadnutí a polní kapacitě (Obr. 19). Cílem modifikace bylo navýšit retenční kapacitu dané půdy o 40 % (Trnka et al., 2022). Z modifikované křivky byly zpětně odvozeny nové parametry Van Genuchten rovnice pro určení ostatních půdních vlastností.

[6] https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018



Obr. 19 Příklad navýšení retenční kapacity půdy přímou modifikací retenční křivky v oblasti využitelné vodní kapacity, tj. rozmezí objemové půdní vlhkosti mezi polní kapacitou (pF = 2) a bodem vadnutí (pF = 4.2). pF je logaritmická míra sacího potenciálu vody v půdě. Jednoduše řečeno, pF je logaritmus (o základu 10) hodnoty negativního tlaku vody v půdě vyjádřeného v centimetrech vodního sloupce.

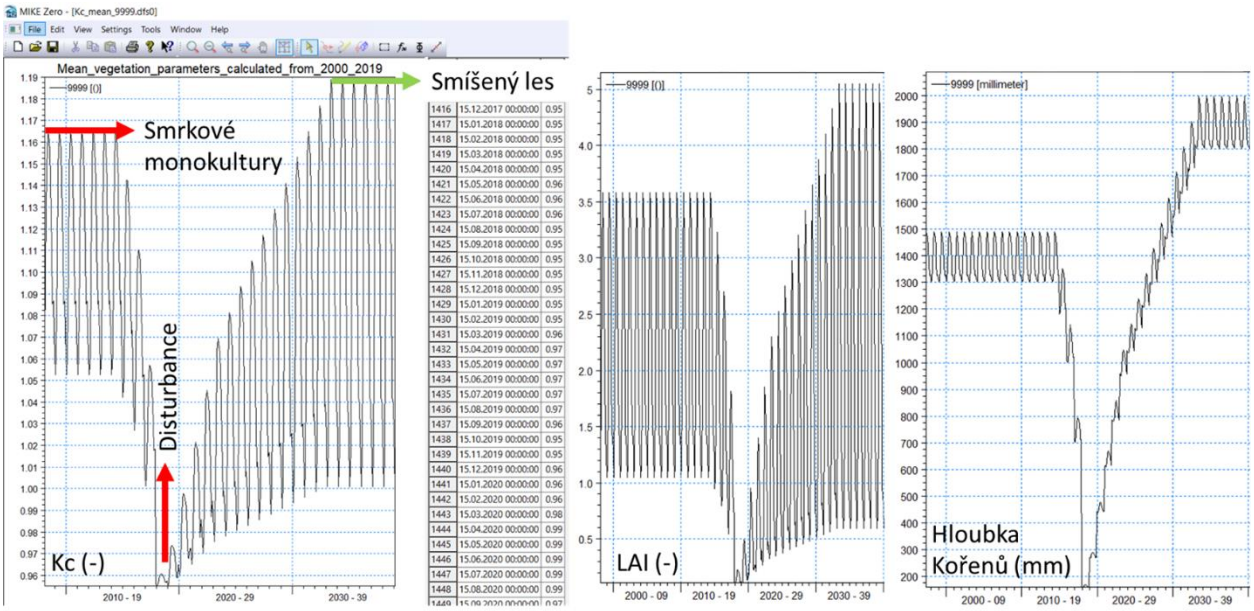
Takto modifikované pF křivky s celkově vyšší retenční kapacitou byly následně zavedeny do Modelu MIKE SHE (Obr. 20). Hlavním důvodem této varianty je testováni vlivu adaptačních opatření, jejichž cílem je zvýšit retenční vlastnosti půd, které tuto vlastnost vlivem utuženosti a eroze do velké míry ztratily.



Obr. 20 Příklad zadání modifikovaných půdních vlastností do modelu MIKE SHE variantní simulace 06.

7) Rekonstrukce kůrovcové kalamity po roce 2015

V tomto případě se nejednalo o adaptační opatření, ale o rekonstrukci vlivu změny vegetační struktury lesa způsobené kůrovcovou kalamitou, mimo jiné způsobenou extrémním suchem a vlnami veder v období 2014–2019 (Brázdil et al., 2022). Kůrovcem postižené lokality byly definovány jako holiny s následnou regenerací – přechodem do vegetační třídy smíšený les. Nepředpokládá se opětovné vysazení smrkové monokultury náchylné k této formě disturbance, ale změna dřevinné skladby směrem ke smíšeným a listnatým lesům. Doba regenerace do zdravého porostu se stejnými vegetačními parametry, jako má zapojený smíšený les v jiných oblastech, je odhadnuta a v modelu stanovena na 15 let (Obr. 21). Modifikace formou změny vegetačních parametrů přímo ovlivňuje stanovení aktuální evapotranspirace. Výsledky je zapotřebí srovnávat s "neovlivněnou simulací" popisující hypotetický stav bez kůrovcové kalamity. Takovou variantu využití území lze vytvořit nahrazením parametrů ovlivněných porostů parametry zdravých porostů z blízkého okolí dané lokality či ponecháním původních parametrů z období bez negativního vlivu kůrovce.

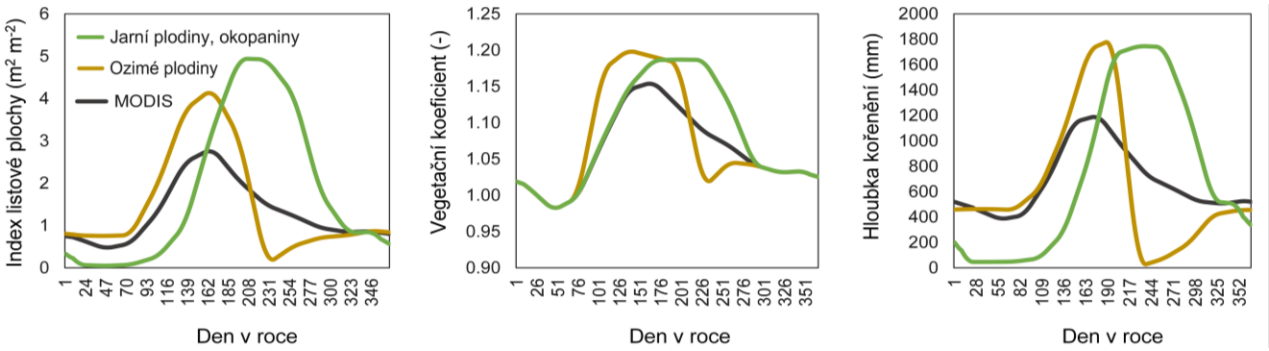


Obr. 21 Zavedení modifikace vegetačních parametrů do hydrologického modelu MIKE SHE zohledňující vliv disturbance jehličnatého lesa a následnou regeneraci a převedení do kategorie smíšeného lesa.

8) Typové plodiny na orné půdě

Adaptace plodin byla v modelu zavedena změnou vegetačních parametrů (index listové plochy, vegetační koeficient a hloubka kořenění). Opatření bylo plošně zavedeno pouze pro plochy, které zabírá orná půda (CLC 18 = 211). Byly vytvořeny parametry pro typickou hypotetickou plodinu, která se řadí mezi jarní plodiny a okopaniny (např. kukuřice setá, řepa cukrovka apod.) seté na jaře. Dále byly vytvořeny parametry pro hypotetickou plodinu (pšenice setá, řepka olejka) setou

na podzim. Výsledky obou variant byly srovnávány s výsledky modelu s průměrnými vegetačními parametry pro třídu land use CLC 18 = 211 (orná půda) na základě satelitního snímkování spektroradiometrem MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Obr. 22).

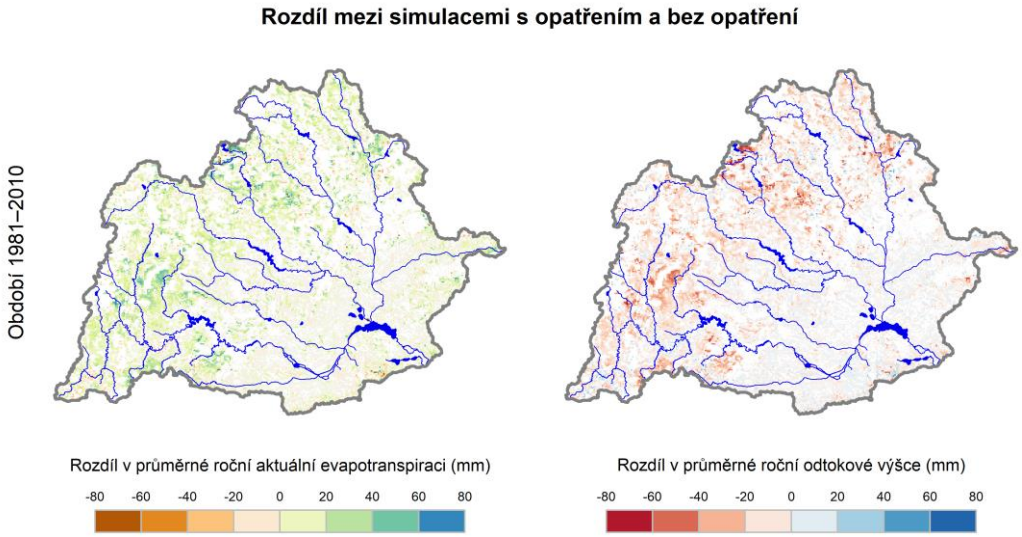


Obr. 22 Průměrný roční chod vegetačních parametrů navržených a testovaných pro ozimé a jarní plodiny a průměr pro ornou půdu dle satelitního snímkování senzorem MODIS.

9) Změna plodin na orné půdě k víceletým pícninám a intenzivnímu využívání meziplodin

Změna plodin je v modelu zavedena změnou vegetačních parametrů (index listové plochy, vegetační koeficient a hloubka kořenění). Opatření je plošně vymezeno pouze pro plochy, které zabírá orná půda (CLC 18 = 211). Oproti variantě 8, kde model pracuje s průměrnými vegetačními parametry pro ornou půdu, tato varianta pracuje s plošně distribuovanými vegetačními parametry odvozenými na základě satelitního snímkování MODIS. Ke každému pixelu spadajícímu do oblasti pokryté ornou půdou byl vybrán nejbližší pixel v kategorii CLC 18 = 231 (trvalé travní porosty) a vegetační parametry příslušné tomuto pixelu byly přepsány do původního pixelu s ornou půdou. Varianta vychází z předpokladu pěstování plodin podobných trvalému travnímu porostu. Vzorovou hypotetickou plodinou je víceletá pícnina, ale opatření zahrnuje i osevní postupy zajišťující, že půda je stále pokryta zelenou vegetací (např. intenzivní využívání meziplodin).

Z výsledků (Obr. 23) je patrné, že plodiny pokrývající půdu v delším vegetačním období od jara až do podzimu spotřebují více vody pro transpiraci než plodiny s kratší vegetační sezónou. Nárůst transpirace má za přímý následkem snížení odtokové výšky především v horních částech povodí, kde je evapotranspirace více limitována energií než půdní vlhkostí (Fischer et al., 2023). V dolních částech povodí dochází k častějšímu omezení evapotranspirace v důsledku snížení obsahu půdní vláhy, a tak není pro významný nárůst transpirace ve vodní bilanci dostatek vody. Negativní dopad na odtok tudíž není tak patrný.



Obr. 24 Prostorově distribuované výsledky změny aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulace varianty 09 (Tabulka 1, změna plodin na orné půdě k víceletým pícninám a meziplodinám) vůči simulaci referenční.

Povodí řeky Dyje bez antropogenních vlivů, ale s požadavky na vodu 21. století – "Sámova říše"

Varianty 10–16 vycházely z hypotetické studie nazvané “Sámova říše”. Studie se snažila zrekonstruovat stav povodí před výraznými antropogenními zásahy, jako je výstavba vodních nádrží a napřimování toků. Při tomto nastavení hydrologického procesu lze očekávat větší retenční schopnost půd, zvýšenou míru aktuální evapotranspirace, zvýšení břehové infiltrace a obecně méně vody v korytech jako výsledek bilance. Studie řeší do jaké míry by takové přírodě blízké povodí zajistilo potřeby obyvatelstva při uvažování dnešní míry socioekonomického rozvoje. Jedná se o soubor změn týkajících se jak přírodě blízkých úprav (změny v land use, renaturalizace koryt), tak technických úprav modelu (změna na vodních dílech a vodárenských odběrech). Varianty 10–13 zahrnují vždy jen jednu změnu. Varianta 15 představuje simulace integrující opatření 10–12 a varianta 16 opatření 10–14, tj. kompletní kombinaci reprezentující „Sámovu říši“. Konkrétní změny v nastavení procesů jsou popsány níže.

10) Koncept „Sámova říše“ – Zvýšení propustnosti koryt

Propustnost koryt definuje rychlost obousměrného přetoku vody ze saturované zóny do vodního toku a tím přímo ovlivňuje velikost základního odtoku. V této variantní simulaci byly parametry propustnosti zadány přesně podle koeficientu nasycené hydraulické vodivosti saturované zóny. Nastavení předpokládá, že koryta toků jsou rozvolněná, dnový materiál je propustný a v plné komunikaci s podložím. Toto nastavení bylo aplikováno na celou říční síť povodí řeky Dyje a mělo za následek nejen navýšení podílu základního odtoku na celkovém odtoku, ale i navýšení břehové infiltrace, proudění z koryta do saturované zóny. Na výsledcích byla patrná i změna aktuální evapotranspirace v bezprostřední blízkosti toků poukazující na větší míru saturace říčních niv.

11) Koncept „Sámova říše“ – Zvýšení hydraulické drsnosti říčních koryt

Jedná se o opatření s cílem navrátit přírodě blízký charakter vodního toku. Varianta vychází z předpokladu plně rozvinutého geomorfologického typu koryt. V takových tocích lze předpokládat střídání tůní a dnových stupňů, přítomnost balvanů a také břehové a dnové vegetace. Kombinace těchto vlastností způsobuje vysokou míru turbulence proudění obzvláště na více sklonitých úsecích toku. Turbulentní proudění bylo schematizováno navýšením hydraulické drsnosti toku, odporového parametru, který ovlivňuje rychlost proudění a výšku hladiny při daném průtoku. Hydraulická drsnost také ovlivňuje transformaci průtoku v korytě, a tudíž i dobu zdržení. Mimo jiné toto opatření zahrnuje i rozvolnění trasy napřímených úseků opět vedoucí k navýšení doby zdržení odtoku v korytě. V modelu lze toto navýšení aproximovat zavedením náhradní hydraulické drsnosti (jejím navýšením nad reálné limity).

Úprava hydraulické drsnosti koryt v říčním modelu byla aplikována pouze na horní a střední toky se sklonem větším než 2 % (kde lze výše popsané procesy předpokládat). Podkladem pro navýšení hydraulické drsnosti byla studie návrhu revitalizace horní Svratky[7].

12) Koncept *„Sámova říše“* – Celková změna vegetačního pokryvu na listnatý les

Jedná se o přírodě blízkou variantu s cílem navrátit povodí řeky Dyje původní vegetační kryt. Nastavení vegetačního pokryvu vychází z mapy potenciální přirozené vegetace (Neuhäuslová et al. 1997), kde jednoznačně dominuje listnatý les. Mapa potenciální přirozené vegetace zachycuje abstraktní a hypotetický vegetační kryt, který je výrazem rovnováhy mezi současným, člověkem ireverzibilně změněným prostředím a vegetací. Jedná se oficiální produkt z dílny Botanickeho ústavu AV ČR, v. v. i. Zadání proběhlo formou změny vegetačních parametrů, konkrétně indexu listové plochy, hloubky kořenění a vegetačního koeficientu na jednotný popis časovou řadou vycházející z měsíčních průměrů platných pro celé referenční období a pro třídu CLC 18 = 311 (listnaté lesy).

13) Koncept „Sámova říše“ – Odstranění přehradních nádrží při zachování vodárenských odběrů a zajištění MZP

V této technické variantě byla odstraněna všechna vodní díla akumulující vodu v povodí řeky Dyje. Jedná se celkem o 18 přehradních profilů a příslušných nádrží schematizovaných v modelu povodí řeky Dyje. V případě vodárenských nádrží byl odběr ponechán v původní lokalitě, avšak byl omezen podmínkou zachování MZP na dolním toku. Pakliže byl průtok v odběrné lokalitě menší než MZP, odběr nebyl realizován. Pakliže byl průtok větší než MPZ, ale menší než MZP + odběr, odběr byl realizován v částečné míře. V plné míře byl realizován odběr v případě, že průtok v lokalitě odběru byl větší nebo roven MZP + odběr. Odběrný objekt byl pozorován z hlediska naplnění těchto strategií. Výsledkem studie bylo hodnocení “zabezpečenosti odběru” bez přehradních nádrží

[7] Ve studii revitalizace horního toku Svratky je navrženo prodloužení revitalizovaného úseku o 40 %. Byla hledána taková hodnota náhradní korytové drsnosti, aby se doba zdržení v korytě bez revitalizace vyrovnala době zdržení v korytě s revitalizací vyrovnala. Výsledkem studie je hodnota parametru drsnosti n=0.14, která má za následek požadované zvětšení doby zdržení ve vodním toku.

14) *Koncept „Sámova říše“ – Odstranění přehradních nádrží při zachování vodárenských odběrů v současném rozsahu*

V této technické variantě byly pouze odstraněny vodní nádrže. Odběry v této variantě byly ponechány v původním stavu, nebylo tedy řešeno zabezpečení MZP. Jedná se o pomocnou variantu zpracovanou pouze pro účely změny vyhodnocení vodní bilance v ploše způsobené odstraněním vodních děl.

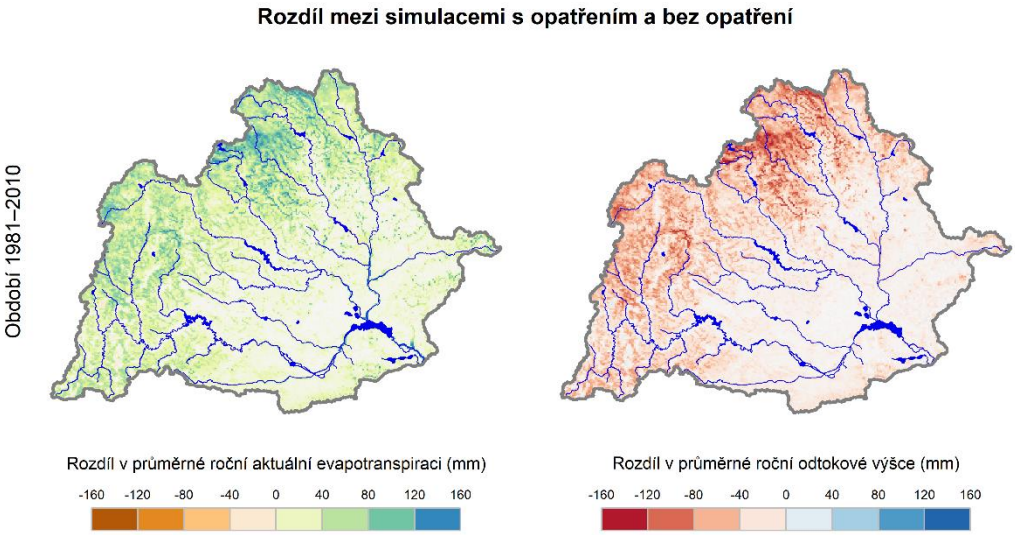
15) *Koncept „Sámova říše“ – Kombinace „přírodě blízkých“ úprav 10–12*

Varianta kombinuje opatření č.10, 11, 12. Jedná se o celkové zhodnocení přírodě blízkých, netechnických úprav v povodí řeky Dyje. Vodní díla a odběry v tomto nastavení tedy zůstaly v nezměněném stavu.

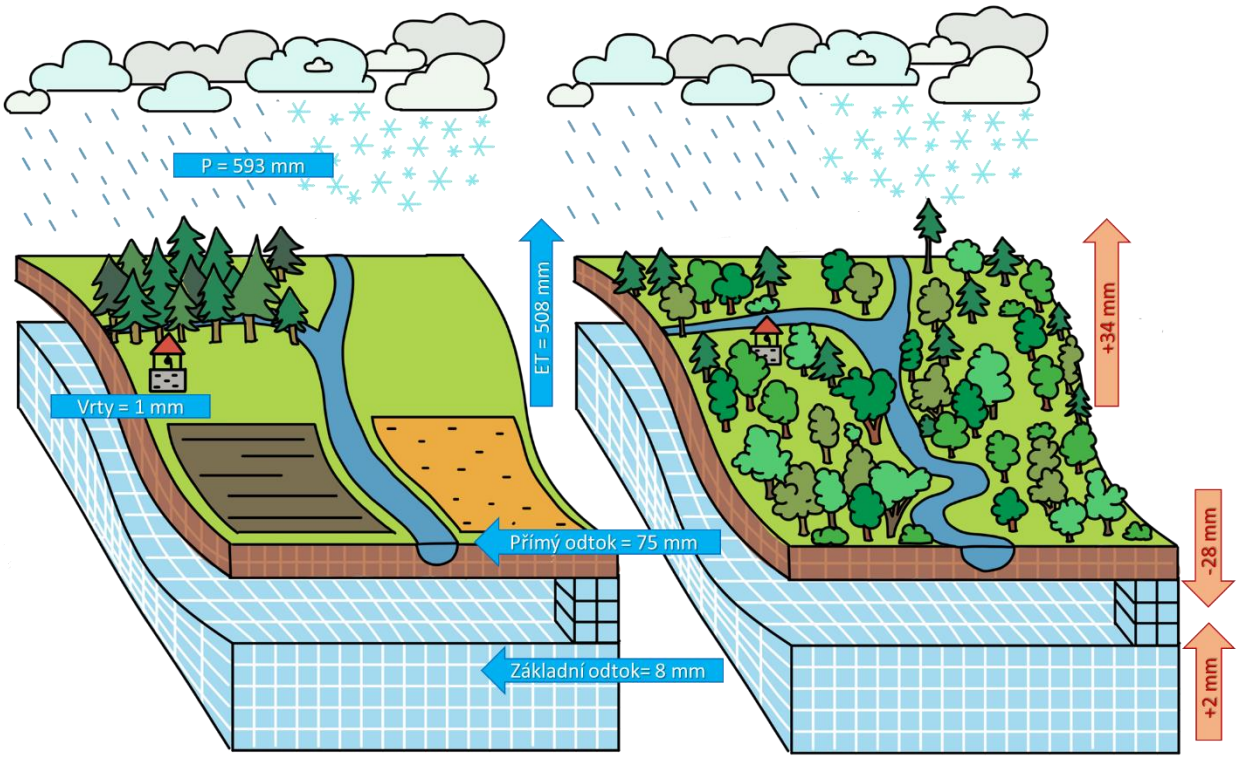
16) *Koncept „Sámova říše“ – Komplexní sestava variant 10–13 reprezentující povodí bez antropogenních vlivů, ale s požadavky na vodu 21. století*

Varianta kombinuje opatření č. 10, 11, 12 a 13. Jedná se o celkové nastavení všech změn v povodí pro popis Sámovy říše. Toto hypotetické nastavení předpokládá antropogenně neovlivněné povodí řeky Dyje zatížené požadavky na vodní zdroje od lidské společností v současné míře socioekonomického rozvoje.

Z výsledků je patrné, že v hypotetické „Sámově říši“ by byla mnohem větší evapotranspirace z povodí způsobená navýšenou složkou transpirace z lesního ekosystému. Tento nárůst o 7 % koresponduje s poklesem přímého odtoku o 37 %. Změnilo by se také rozdělení mezi jednotlivými složkami odtoku ve prospěch základního odtoku (Obr. 26). Ve variantě 16 stojí ještě za zmínku zvýšená břehová infiltrace, kterou se z řek dotuje saturovaná zóna téměř 5 mm/rok. Posílení procesu břehové infiltrace ve variantě 16 je způsobeno nastavením přímé komunikace mezi saturovanou zónou a vodním tokem. Břehová infiltrace je v ostatních variantách v celkovém pohledu zanedbatelná.



Obr. 25 Prostorově distribuované výsledky změny aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulace varianty 16 (Tabulka 1, „Sámova říše“) vůči simulaci referenční.



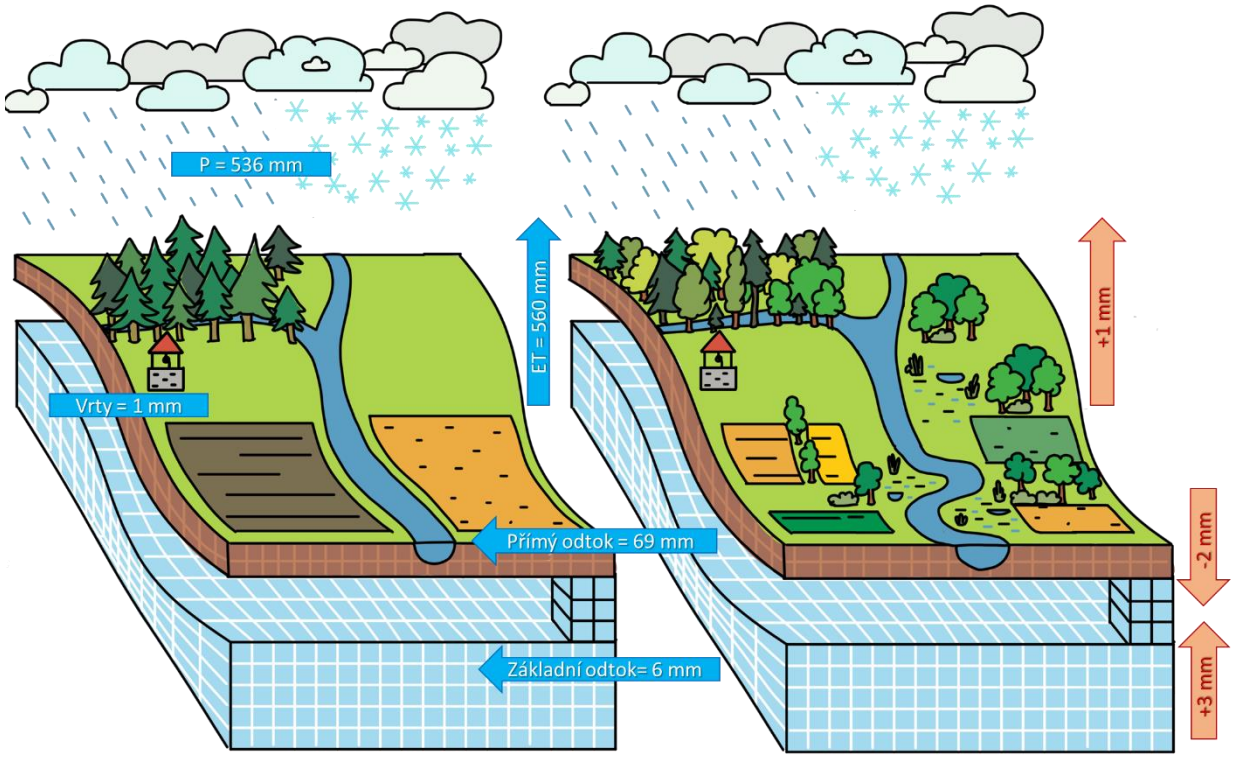
Obr. 26 Vyhodnocení celkové bilance ze simulace referenčního období (1981–2010). Vlevo je výsledek simulace s nastavením podmínek současného stavu povodí a vpravo je simulace s podmínkami odpovídajícími „Sámově říši“ (varianta 16). Modré šipky popisují nejvýznamnější složky vodní bilance spolu s průměrným ročním úhrnem (mm/rok). Červené šipky ukazují směr rozdílu variantní simulace oproti simulaci referenčního stavu.

17) Zvýšené odběry z VD Víru a propojení vodárenských soustav Dyje-Vltava

Varianta 17 zahrnuje návrh na propojení vodohospodářských soustav Dyje-Vltava a posílení vodárenských odběrů z VD Vír. Podklady pro propojení soustav Dyje-Vltava a posílení odběru z VD Vír I byly poskytnuty Vodárenskou Akciovou Společností a.s. (VAS), divize Brno. Podle návrhu budou odběry z Víru lineárně narůstat z 30 l/s (současný stav) na 40 l/s (2025), 60 l/s (2035) a 90 l/s (2050), na hodnotě 90 l/s zůstanou odběry ve zbytku období. Z tohoto množství bude třetina převáděna do povodí Vltavy pro zásobení vodárenské soustavy Žďár nad Sázavou. Převedení 8–30 l/s z Želivky do povodí Dyje je formou vypouštění do čistírny odpadních vod (ČOV) Jihlava. Úpravy modelu zahrnovaly změnu odběrů a vypouštění zadaných formou okrajových podmínek a také zřízení řízeného vodárenského odběru z VD Vír I se strategiemi odebírání pro zabezpečení MZP. Řízený objekt lze po celou dobu simulace sledovat z hlediska zabezpečenosti odběru.

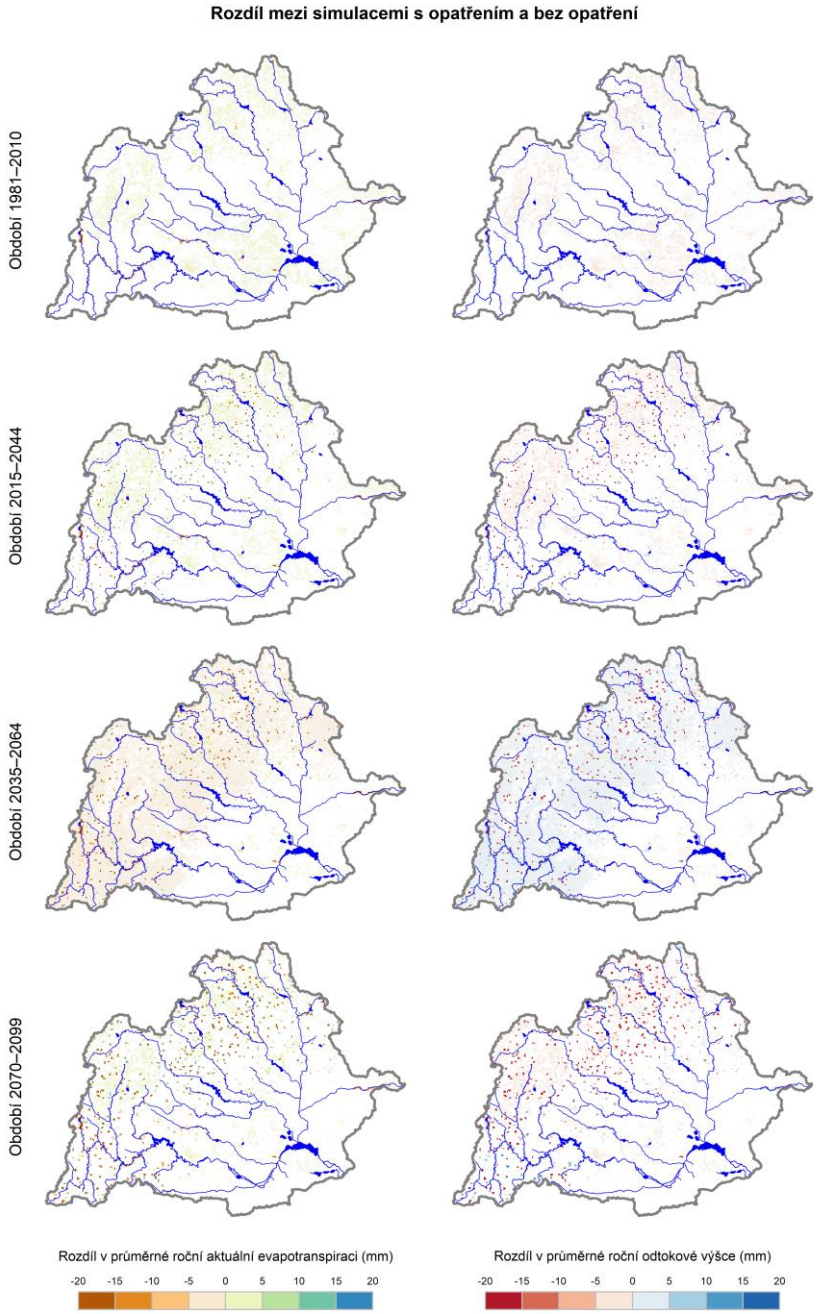
18) Komplexní varianta realistických přírodě-blízkých opatření

Účelem přírodě blízké varianty bylo integrovat několik přírodě blízkých opatření v celém území povodí řeky Dyje a tím zhodnotit synergické působení jednotlivých vlivů na odtok. Na rozdíl od předešlých hypotetických limitních variant byla zde snaha o nastavení realistických podmínek. V rámci varianty 18 byla zvýšena drsnost koryt v hydraulickém modulu MIKE 11 na horních úsecích modelovaných toků o 20 %. Dále byla nastavena zvýšená propustnost koryta na hodnotu odpovídající nasycené hydraulické vodivosti saturované zóny. Dřevinná skladba lesů byla změněna k cílovému stavu jako důsledek regenerace lesa po přírodní disturbanci způsobené kůrovcovou kalamitou. Retenční schopnost orné půdy byla zvýšena o 15 % (např. v důsledku zvýšení obsahu humusu a snížení utuženosti půd).



Obr. 27 Vyhodnocení celkové bilance v povodí řeky Dyje a její změny v časovém horizontu 2050 pro střední klimatický scénář a komplexní sadu přírodě blízkých adaptačních opatření (varianta 18).

Z obrázku Obr. 27 je patrné, že v celkovém pohledu na povodí Dyje dochází k vyrušení vlivů jednotlivých adaptačních opatření, a proto je souhrnný efekt jen málo zřetelný. Větší rozdíly je možné najít v dílčích částech povodí. Nicméně, i tento pohled značí, že sada komplexních opatření by mohla vést ke změně distribuce jednotlivých složek odtoku. Mohlo by dojít k požadovanému poklesu odtoku rychlé složky (přímého odtoku) a nárůstu základního odtoku. Posílení základního odtoku na úkor odtoku rychlého by mohlo vést ke stabilizaci hydrologického procesu a ke zmírnění dopadů hydrologického sucha na vodní ekosystémy.



Obr. 28 Prostorově distribuované výsledky změny aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulace varianty 18 (Tabulka 1, komplexní sada přírodě blízkých adaptačních opatření) vůči referenční simulaci pro střední klimatický scénář.

19) Technická varianta 17) podpořená výstavbou vodních nádrží dle generelu LAPV

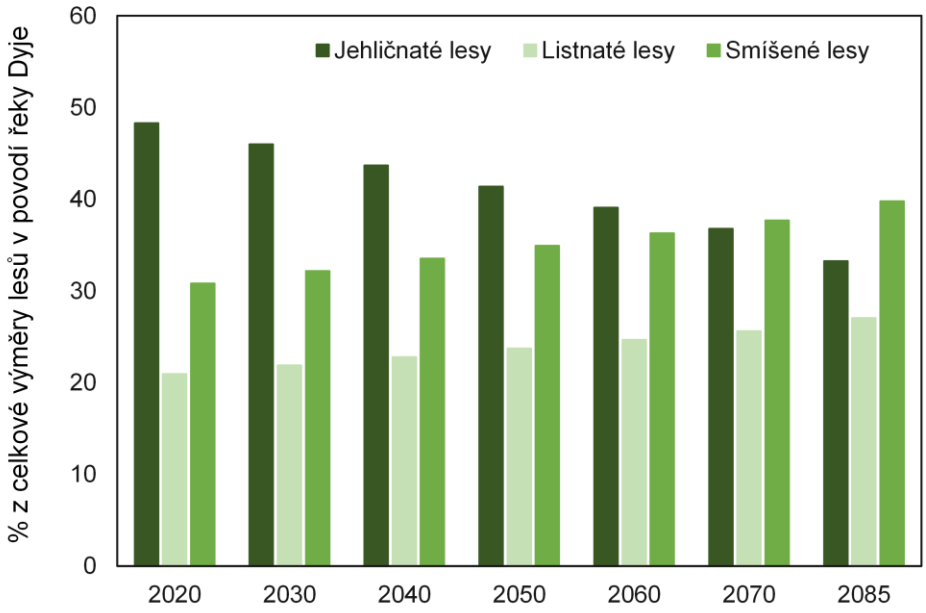
Tato varianta kombinuje variantu 02 a 17 (Tabulka 1). Byl zadán navýšený odběr z VD Vír, převod mezi vodárenskými soustavami Dyje-Vltava a byly schematizovány všechny navržené nádrže podle generelu LAPV. Cílem této varianty je zhodnotit všechna v současné době uvažovaná technická opatření.

20) Technická varianta 17) podpořená výstavbou vodní nádrže Kuřimské Jestřabí dle generelu LAPV

Tato varianta kombinovala variantu 17 a část varianty 02 (Tabulka 1) týkající se nádrže Kuřimské Jestřabí navržené podle generelu LAPV na toku Libochovka. Varianta má za účel zhodnotit opatření, která mají vysokou pravděpodobnost realizace (podle vyjádření PMo, s.p.).

21) Změna dřevinné skladby lesa dle plánů OPLR se zohledněním kůrovcové kalamity po roce 2015

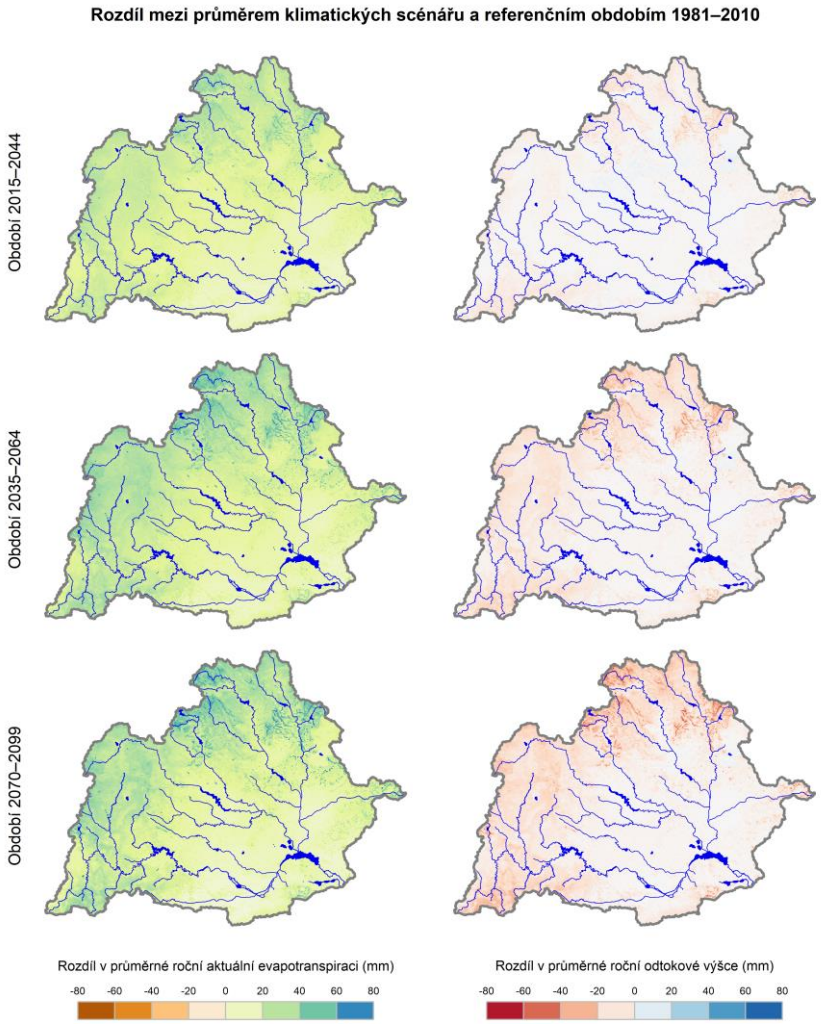
Varianta popisuje cílový stav po změnách dřevinné skladby vlivem kůrovce (stejné změny vegetace jako ve variantě 18, Tabulka 1). Vybrané lesní plochy byly v této variantě převedeny do třídy smíšených a listnatých lesů a byly jim přiřazeny příslušné vegetační parametry. Projekce byla zhotovena pro každé třicetiletí na základě zhodnocení a extrapolace současného trendu vývoje lesního hospodářství. Tento postup vychází z Obr. 29 a byl navržen ve spolupráci s Ústavem pro výzkum lesních ekosystémů (IFER, s.r.o.).



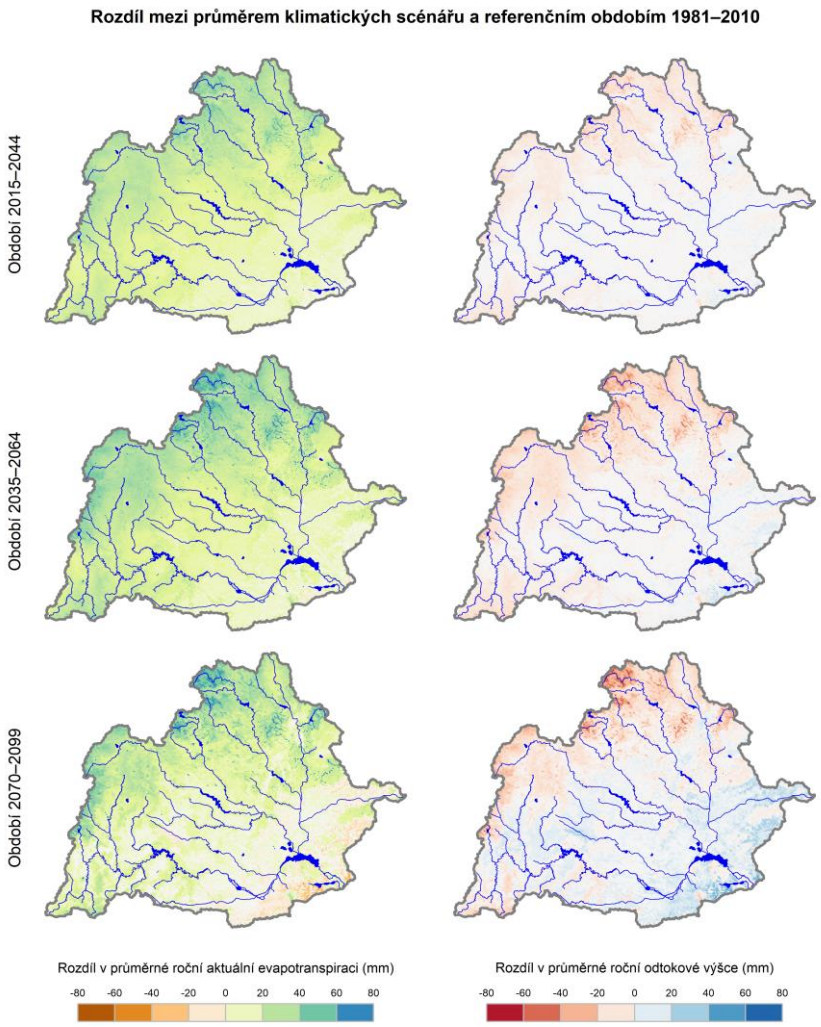
Obr. 29 Předpokládané změny dřevinné skladby lesů pro vybrané dekády 21. století v povodí řeky Dyje. Jedná se o prognózu vycházející z oblastních plánů rozvoje lesů (OPRL) pro tzv. přírodní lesní oblasti (PLO) Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHUL). Tato prognóza zohledňuje akceleraci změn způsobenou nedávnou kůrovcovou kalamitou.

22) Testovací verze průměrných vegetačních parametrů

V této modelové variantě byly testovány vegetační parametry a jejich vliv na výslednou bilanci. Pro každý pixel byla zadána průměrná hodnota vypočtená v tomto pixelu v daném kalendářním dni napříč celým obdobím 2000–2020.



Obr. 30 Prostorově distribuované výsledky změny aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulace varianty 22 (Tabulka 1) vůči simulaci referenční. Pro každý pixel byla zadána průměrná hodnota vegetačních parametrů (index listové plochy, vegetační koeficient a hloubka kořenění) vypočtená v tomto pixelu v daném kalendářním dni napříč celým obdobím 2000–2020. Tato varianta tedy předpokládá, že vegetace má stále stejnou sezónní dynamiku, která odpovídá dlouhodobému průměru.



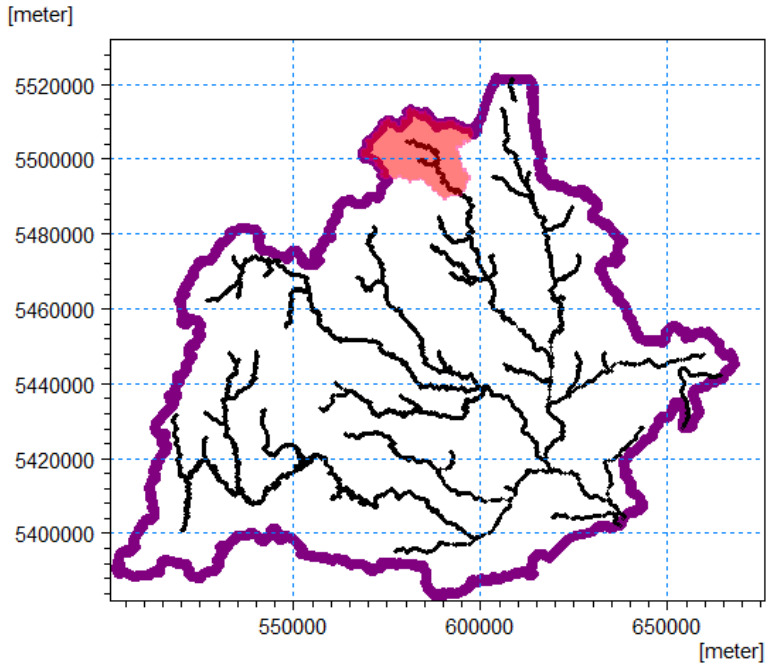
Obr. 31 Prostorově distribuované výsledky změny aktuální evapotranspirace a celkového odtoku simulace varianty 01 (Tabulka 1) vůči simulaci referenční. Jedná se o zopakování části Obr. 8 pro snazší porovnání s Obr. 30. Zde jsou pro každý pixel dynamicky se měnící hodnoty vegetačních parametrů (index listové plochy, vegetační koeficient a hloubka kořenění). Tato dynamika je závislá na konkrétních meteorologických podmínkách a zohledňuje meziroční rozdíly ve fenologii vegetace a možný stres suchem.

Nakonec byla zhotovena série variantních simulací zabývajících se detailněji posouzením zabezpečenosti odběrů z VD Vír I (23–26) v kombinaci s VD Borovnice z generelu LAPV (27–30). Tyto varianty byly detailně analyzovány v metodice č. 1 a zde jsou představeny jen pro úplnost koncepčně.

23) Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro Brněnské Vodárny a Kanalizace, a.s. (BVK) a Vodárenskou Akciovou Společnost, a.s. (VAS) v současném nastavení hodnot odběru

Výsekový model zahrnul horní tok řeky Svratky po hráz VD Vír a přítok Fryšávka (Obr. 32). Pro zrychlení výpočetního času je při testování dílčích částí modelu možné omezit oblast simulace na ucelené povodí. V tomto případě došlo k redukci simulované plochy na 4 % z celkové

plochy povodí řeky Dyje a k tomu úměrného snížení výpočetního času na cca 6–8 % času potřebného k simulaci srovnatelného období celým modelem povodí řeky Dyje (cca 24 hodin výpočetního času).



Obr. 32 Rozsah výsekového modelu pro testování zabezpečenosti vodárenských odběrů z VD Vír.

Vodárenský odběr byl testován z hlediska zabezpečenosti v celém rozsahu současných i budoucích klimatických podmínek. Tento výsekový model byl dále použit pro testování navýšeného vodárenského odběru po hypotetickém výpadku prameniště Březová a při uvažování rostoucích nároků na zásobování pitnou vodou.

24) Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o celou časovou řadu stávajícího odběru Březová

V této variantě byl převeden celý požadavek odběru vody z prameniště Březová na VD Vír a bylo testováno, zda by mohl být takový odběr z nádrže zabezpečen. Varianta předpokládala výpadek prameniště Březová způsobený havárií anebo změnou hydrogeologických podmínek. Hodnota stávajícího odběru Březová je v průměru 680 l/s. Tato hodnota byla stanovena v modelu referenčního stavu a vychází z agregace evidovaných hodnot.

25) Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o polovinu časové řady stávajícího odběru Březová

V této variantě byla převedena polovina požadavku odběru vody z prameniště Březová na VD Vír I a bylo testováno, zda by mohl být takový odběr z nádrže zabezpečen. Varianta předpokládala částečný výpadek prameniště Březová způsobený havárií anebo změnou hydrogeologických podmínek.

26) *Výsekový model nad VD Vír I pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o 1,5násobek časové řady stávajícího odběru Březová*

V této variantě byl převeden 1,5násobek požadavku odběru vody z prameniště Březová na VD Vír I a bylo testováno, zda by mohl být takový odběr z nádrže zabezpečen. Varianta předpokládala výpadek prameniště Březová způsobený havárií anebo změnou hydrogeologických podmínek. Varianta navíc zahrnula potenciální nárůst spotřeby vody v budoucích dekádách a testovala schopnost vodárenské soustavy zabezpečit větší nároky společnosti při méně vlhkostně příznivých klimatických podmínkách podle scénářů budoucího vývoje klimatu.

Vodárenská soustava byla v dalším kroku posílena výstavbou VD Borovnice z generelu LAPV. Varianty 27–30 byly zhotoveny pro testování obdobných scénářů jako varianty 23–26 s VD Borovnice nadlepšující přítok do VD Vír I v období se sníženými průtoky. Zadání VD Borovnice vychází ze stejných pravidel jako v případě varianty 2).

27) Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v současném nastavení hodnot odběru
28) Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o celou časovou řadu stávajícího odběru Březová
29) Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o polovinu časové řady stávajícího odběru Březová
30) Výsekový model nad VD Vír I s výstavbou VD Borovnice pro řešení zabezpečenosti odběru pro BVK a VAS v navýšeném nastavení hodnot odběru o 1,5násobek časové řady stávajícího odběru Březová

Varianty 27–30 jsou rovněž detailně analyzovány v metodice č. 1.

2.4 Závěr případové studie

Zkušenosti z pilotního projektu v povodí Dyje, kde byla metodika odvozena a pilotně aplikována, jasně dokazují, že ne nutně jsou veškerá adaptační opatření vhodná ve všech oblastech (např. horská *vs*. nížinná povodí), ne nutně je pozitivní vliv jednotlivých adaptačních opatření aditivní, a nakonec, efektivita a funkce adaptačních opatření pro současné podmínky se může lišit v podmínkách budoucího klimatu. Aby byl vliv adaptačních opatření posouzen co nejobjektivněji a zohlednil navíc roli klimatické změny, která je dominantním faktorem většiny procesů ovlivňujících vodní bilanci, klade navrhovaný postup velký důraz na aplikaci deterministických, fyzikálně založených hydrologických modelů.

Klimatická změna byla aplikována v co možná nejkomplexnější formě, tj. v kombinaci scénářů socioekonomického vývoje a různých klimatických modelů. Toto zatížení klimatickou změnou bylo okrajovou podmínkou pro testování adaptačních opatření. Lze předpokládat, že při provázání socioekonomických vazeb by šlo některé klimatické scénáře a prověřované alternativy budoucnosti eliminovat.

Dále lze jen podtrhnout, že varianta klimatických změn bez jakýchkoliv adaptačních opatření je možná spekulativní, protože společnost bude zřejmě reagovat v průběhu budoucích let na klimatické změny. Tato varianta – tedy nakládání s vodami beze změn, a zároveň žádné další antropogenní změny, však představuje důležitý etalon pro porovnání všech adaptačních opatření, které se mají posuzovat.

Případová studie v povodí Dyje prokázala použitelnost distribuovaného hydrologického modelu na posuzování efektivity většiny adaptačních opatření ve všech segmentech uživatelů vod. Dále případová studie jasně potvrdila zcela zásadní roli aktuální evapotranspirace a její změny v posuzovaném období. Ty jsou přímo ovlivněny klimatickými změnami a jimi ovlivněných klíčových proměnných – především teplotou vzduchu, která se nade vší pochybnost zvyšuje.

Metodika ukazuje základní principy posuzování adaptačních opaření prostorově distribuovaným hydrologickým modelem pro celé povodí řeky Dyje. Tento postup může být vhodný po celkové posouzení a identifikaci nejkritičtějších oblastí. Pro další postup zaměřený na konkrétní dílčí povodí je vhodné hydrologický model dále zpřesnit a případně do něj integrovat detailnější lokální data (např. data dálkového průzkum Země). Pro praxi, kde je často zapotřebí řešit lokální detaily, je tedy doporučeno postupovat iterativně.

Rozsah případové studie zároveň poukazuje na skutečnost, že podobným způsobem lze posuzovat adaptační opatření na všech předem vytipovaných povodích, kde je potřeba podobných analýz z důvodu zachování a udržitelnosti vodních zdrojů.

V ostatních povodích lze aplikovat i jednodušší bilanční přístup, pávě takový postup umožní vybrat taková povodí, kde je tato metodika s úspěchem aplikovatelná a efektivní.

Z případové studie je také patrné, že pro detailní simulace vodohospodářské bilance je nezbytné pořizovat a poskytovat data v časovém kroku, který odpovídá požadavkům na výstupy vodní bilance, tedy minimálně v denním kroku. Taková frekvence sběru dat nakládaní s vodami není dostupná, neboť státní správa vyžaduje jenom měsíční údaje o vypouštění a odběrech. Pro budoucí analýzy bude nezbytné znát i odběry a vypouštění i uživatelů s menšími objemy užití vod. Tedy poslední novela Vodního zákona, která upravila některé limity, je v tomto směru správným krokem, ale pro detailní analýzy, především za podmínek hydrologického sucha, stále nedostatečná.

Seznam použitých zkratek

AT – Rakousko

BVK – Brněnské Vodárny a Kanalizace, a.s.

CMIP6 – („*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*“), nejnovější fáze Projektu mezinárodního porovnání klimatických modelů

CLC (18) – CORINE land cover (z roku 2018), kód využití území

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

ČR – Česká republika

ČOV – Čistírna odpadních vod

ET_o – Referenční evapotranspirace

GCM – („*Global Climate Model*“), globální klimatický model

GIS – geografický informační systém

HM – hydrologický model

MIKE HYDRO – 1D hydraulický model od společnosti DHI (dříve MIKE 11)

MIKE SHE – plošně distribuovaný hydrologický model od společnosti DHI

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MZe – Ministerstvo zemědělství

MZP – Minimální zůstatkový průtok

MŽP – Ministerstvo životního prostředí

LAPV – Lokality pro akumulaci povrchových vod

NSE – “*Nash–Sutcliffe Efficiency”, statistická metoda pro hodnocení kvality simulovaných výstupů*

OPLR – Oblastní plán rozvoje lesů

PMo – Povodí Moravy s.p.

SSP – („*Shared Socioeconomic Pathways*“) scénáře popisující různé možné trajektorie společenského vývoje v budoucnosti v kontextu klimatických změn.

VAS – Vodárenská Akciová Společnost, a.s.

VD – vodní dílo

VZ – Zákon 254/2001 Sb., „Zákon o vodách a o změně některých zákonů“ – vodní zákon

Seznam publikací, které předcházely metodice

Beran A., Datel J.V., David V., Vizina A., Treml P., Kožín R., Tyl R., 2022. Metodický postup pro posouzení dopadů malých vodních nádrží na hydrologickou bilanci a vodní zdroje, VÚV TGM, Praha.

Beran A., Kašpárek L., Vizina A., Vyskoč P. et al., 2019. Metodika pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody, Certifikovaná metodika, VÚV TGM Praha.

Brázdil R., Zahradník P., Szabó P., Chromá K., Dobrovolný P., Dolák L., Trnka M., Řehoř J., Suchánková, S., 2022. Meteorological and climatological triggers of notable past and present bark beetle outbreaks in the Czech Republic. *Climate of the Past* 18, 2155–2180.

Crocetti L., Forkel M., Fischer M., Jurečka F., Grlj A., Salentinig A., Trnka M., Anderson M., Ng W.-T., Kokalj Ž., Bucur A., Dorigo W., 2020. Earth Observation for agricultural drought monitoring in the Pannonian Basin (southeastern Europe): current state and future directions. *Regional Environmental Change* 20, 123.

Dzuráková M., Osičková K., Uhrová J., Rozkošný M., Smelík L., Němejcová D., Zahrádková S., Štěpánková P., Macků, J., 2017. Potenciál aplikace přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a zlepšení ekologického stavu vodních útvarů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 59 (4), 25–32.

Dzuráková, M. et al., 2018. Vyhodnocení přírodě blízkých opatření, katalog opatření. Činnosti k podpoře výkonu státní správy v problematice SUCHO v roce 2017 – úkol 3702. Závěrečná zpráva. Brno: VÚV TGM, v. v. i., 35 s

Dzuráková M., Štěpánková P., Levitus V., 2018. Katalog přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině a jeho uplatnění ve webové mapové aplikaci pro veřejnost. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* 60.5, 6-11.

Fischer M., Pavlík P., Vizina A., Bernsteinová J., Parajka J., Anderson M., Řehoř J., Ivančicová J., Štěpánek P., Balek J., Hain C., Tachecí P., Hanel M., Lukeš P., Bláhová M., Dlabal J., Zahradníček P., Máca P., Komma J., Rapantová N., Feng S., Janál P., Zeman E., Žalud Z., Blöschl G., Trnka M., 2023. Attributing the drivers of runoff decline in the Thaya river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 48, 101436.

Fischer M., Trnka M., Kučera J., Deckmyn G., Orság M., Sedlák P., Žalud Z., Ceulemans R., 2013. Evapotranspiration of a high-density poplar stand in comparison with a reference grass cover in the Czech-Moravian Highlands. *Agricultural and Forest Meteorology* 181, 43–60.

Fischer M., Zenone T., Trnka M., Orság M., Montagnani L., Ward E.J., Tripathi A.M., Hlavinka P., Seufert G., Žalud Z., King J.S., Ceulemans R., 2018. Water requirements of short rotation poplar coppice: Experimental and modelling analyses across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 250–251, 343–360.

Ghisi T., Fischer M., Kowalska N., Jocher G., Orság M., Bláhová M., Nieto H., Homolová L., Žalud Z., Trnka M., 2023. Faster evapotranspiration recovery compared to canopy development post clearcutting in a floodplain forest. *Forest Ecology and Management* 532, 120828.

Hanel M., Kašpárek L., Mrkvičková M., Horáček S., Vizina A., Novický O., Fridrichová R., 2011. Odhad dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 108 s.

Hlavinka P., Trnka M., Balek J., Semeradova D., Hayes M., Svoboda M., Eitzinger J., Mozny M., Fischer M., Hunt E., Zalud Z., 2011. Development and evaluation of the SoilClim model for water balance and soil climate estimates. *Agricultural Water Management* 98, 1249–1261.

McGloin R., Šigut L., Fischer M., Foltýnová L., Chawla S., Trnka M., Pavelka M., Marek M.V., 2019. Available Energy Partitioning During Drought at Two Norway Spruce Forests and a European Beech Forest in Central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124, 3726–3742.

Mrkvičková M., Kožín R., Hanel M., Beran A., Brabec J., Novický O., Fridrichová R., 2012. Navrhování adaptačních opatření pro snižování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR, Vydal Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Praha.

Orság M., Fischer M., Trnka M., Brotan J., Pozníková G., Žalud Z., 2022. Trends in Air Temperature and Precipitation in Southeastern Czech Republic, 1961–2020, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 12.

Říha J., 2022. Zpracování konceptu vodohospodářského řešení vybraných nádrží. VÚT, Brno, 40 s.

Trnka M., Hlavinka P., Možný M., Semerádová D., Štěpánek P., Balek J., Bartošová L., Zahradníček P., Bláhová M., Skalák P., Farda A., Hayes M., Svoboda M., Wagner W., Eitzinger J., Fischer M., Žalud Z., 2020. Czech Drought Monitor System for monitoring and forecasting agricultural drought and drought impacts. *International Journal of Climatology* 40, 5941–5958.

Trnka M., Vizina A., Hanel M., Balek J., Fischer M., Hlavinka P., Semerádová D., Štěpánek P., Zahradníček P., Skalák P., Eitzinger J., Dubrovský M., Máca P., Bělínová M., Zeman E., Brázdil R., 2022. Increasing available water capacity as a factor for increasing drought resilience or potential conflict over water resources under present and future climate conditions. *Agricultural Water Management* 264, 107460.

Vizina A., Vyskoč P., Peláková M., Picek J., Beran A., Kožín R, 2021. Zabezpečenost odběrů vody z vodárenských nádrží v podmínkách klimatické změny. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, roč. 63, č. 3, str. 4–18.

Vizina Adam, Strouhal, L., Dzuráková M., Moravec V., Melišová E., 2018. Studie hodnocení účinku přírodě blízkých opatření v povodí Olešné u Pelhřimova pomocí modelů BILAN, HEC-HMS a HYPE, *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 60, 5, 12–20, VÚV TGM Praha.

Vyskoč P., Zeman V., 2008. Metodický postup zpracování vodohospodářské bilance současného a výhledového stavu množství povrchových vod. Praha: VÚV TGM, v. v. i.

Seznam použité literatury

Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J., 1986. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87:45-59.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56.

Bahrami B., Hildebrandt A., Thober S., Rebmann C., Fischer R., Samaniego L., Rakovec O., Kumar R., 2022. Developing a Parsimonious Canopy Model (PCM v1.0) to Predict Forest Gross Primary Productivity and Leaf Area Index. *Geoscientific Model Development Discussions* 2022, 1–40.

Brázdil R., Zahradník P., Szabó P., Chromá K., Dobrovolný P., Dolák L., Trnka M., Řehoř J., Suchánková S., 2022. Meteorological and climatological triggers of notable past and present bark beetle outbreaks in the Czech Republic. *Climate of the Past* 18, 2155–2180.

Fischer M., Pavlík P., Vizina A., Bernsteinová J., Parajka J., Anderson M., Řehoř J., Ivančicová J., Štěpánek P., Balek J., Hain C., Tachecí P., Hanel M., Lukeš P., Bláhová M., Dlabal, J., Zahradníček P., Máca P., Komma J., Rapantová N., Feng S., Janál P., Zeman E., Žalud Z., Blöschl G., Trnka M., 2023. Attributing the drivers of runoff decline in the Thaya river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 48, 101436.

Kukla P., 2022. Porovnání hydrologických charakteristik M-denních průtok referenčního období 1981–2010 a uvažovaného referenčního období 1991–2020, *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 64, 2, 43–47.

Ministerstvo Životního prostředí, 2011. Generel území chráněných pro akumulaci povrchových vod a základní zásady využití těchto území.

Neuhäuslová-Novotná Z., 1997. Mapa potenciální přirozené vegetace České republiky: textová část. Praha: Academia.

Novick K.A., Ficklin D.L., Stoy P.C., Williams C.A., Bohrer G., Oishi A.C., Papuga S.A., Blanken P.D., Noormets A., Sulman B.N., Scott R.L., Wang L., Phillips R.P., 2016. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nature Climate Change* 6, 1023–1027.

Říha J., 2022. Zpracování konceptu vodohospodářského řešení vybraných nádrží. VÚT, Brno, 40 s.

Trnka M., Vizina A., Hanel M., Balek J., Fischer M., Hlavinka P., Semerádová D., Štěpánek P., Zahradníček P., Skalák P., Eitzinger J., Dubrovský M., Máca P., Bělínová M., Zeman E., Brázdil R., 2022. Increasing available water capacity as a factor for increasing drought resilience or potential conflict over water resources under present and future climate conditions. *Agricultural Water Management* 264, 107460.

Xin Q., Dai Y., Li X., Liu X., Gong P., Richardson A.D., 2018. A steady-state approximation approach to simulate seasonal leaf dynamics of deciduous broadleaf forests via climate variables. *Agricultural and Forest Meteorology* 249, 44–56.

ISBN 978-80-87902-38-7

© Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.