Metodika pro stanovení hlavních poruch vodohospodářské bilance a optimalizace adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu

Brno 2023

Metodika pro stanovení hlavních poruch vodohospodářské bilance a optimalizace adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Milan Fischer[1], Evžen Zeman[1], Adam Vizina[2], Martin Hanel[3], Jana Bernsteinová[1], Pavel Tachecí[1], Petr Štěpánek[1], Petr Pavlík[2], Petr Máca[3], Tomáš Ghisi[1], Naďa Rapantová[4], Monika Bláhová[1], 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. Jan Špatka, Ph.D., DHI a.s., Na Vrších 1490, 100 00, Praha 10

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-65723/2023-15000

Osvědčení vydalo

Ministerstvo zemědělství, Sekce vodního hospodářství, dne 20.11.2023

ISBN 978-80-87902-37-0

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

Obsah

Úvod 2
1. METODIKA POSTUPU ŘEŠENÍ 3
A) Simulace vodní bilance pro referenční období a stav 5
A2) Příprava vstupních dat 5
A3) Sestavení hydrologického modelu vodní bilance 7
A4) Kalibrace hydrologického modelu 8
A5) Validace hydrologického modelu 8
A6) Finální referenční simulace vodní bilance 8
A7) Vyhodnocení simulace a tvorba cílových výstupů 9
B) Simulace vodní bilance pro scénáře klimatických a dalších změn 10
B1) Příprava klimatických scénářů 10
B2) Příprava scénářů předpokládaných změn v povodí 10
B3) Simulace vodní bilance pro podmínky budoucích změn 11
B4) Vyhodnocení simulací a tvorba cílových výstupů 11
C) Vyhodnocení výsledků a porovnání simulací vodní bilance 12
C1) Vymezení rizikových oblastí 12
C2) Návrh adaptačních opatření a posuzování jejich vlivu 12
2. PŘÍPADOVÁ STUDIE V POVODÍ ŘEKY DYJE 14
2.1 Charakteristika povodí řeky Dyje 14
2.2 Klimatická změna a její dopady 17
2.3 Hydrologické modelování 18
2.4 Příprava klimatických scénářů 20
2.5 Sestavení hydrologického modelu povodí 21
2.6 Posouzení dopadů klimatické změny na vodní bilanci povodí 33
2.7 Adaptační opatření a jejich optimalizace 41
2.8 Doporučení 45
2.9 Závěr 46
Seznam použitých zkratek 47
Seznam publikací, které předcházely metodice 48
Seznam použité literatury 50

Úvod

Voda představuje jeden z nejdůležitějších zdrojů pro většinu živých organismů, lidstva nevyjímaje. Dostatek kvalitní vody je základním předpokladem existence lidské civilizace. Česká republika (ČR) je někdy označována jako střecha Evropy. Důvodem tohoto onačení je skutečnost, že na území ČR žádný velký hlavní tok nepřitéká. Naopak většina vody dopadající v ČR formou srážek odtéká řekou Labe (úmoří Severního moře), řekou Odrou (úmoří Baltského moře) a řekou Moravou (úmoří Černého moře). Řeka Dyje představuje v tomto kontextu jednu z mála výjimek, protože pramení v Rakousku a jedná se tedy o tok, který do České republiky vodu přináší, nicméně většina povodí a přítoků se nachází na území ČR. Řeka Dyje je však z pohledu předkládané metodiky důležitá z jiného důvodu. Jedná se o povodí s nejmenším množstvím průměrných ročních srážek v poměru k výparu, a tedy o povodí s potenciálně nejnapjatější vodní bilancí. To je také jedním z důvodů existence rozsáhlé vodohospodářské soustavy, která plní z pohledu vodní bilance především funkci stabilizující. Díky vysoké objemové kapacitě dokáže vodohospodářská soustava minimalizovat dopady extrémních přívalových srážek, a minimalizovat tak riziko povodní, ale na druhou stranu dokáže zajistit zdroje pitné a užitkové vody a tzv. nadlepšovat průtoky řek s cílem zachování ekologických funkcí i v období sucha.

Probíhající klimatická změna přináší globální nárůst teploty vzduchu. To vede sice k akceleraci globálního hydrologického cyklu, a tedy i globálního nárůstu srážek, nicméně časoprostorová variabilita srážek je mnohem komplikovanější. Zatímco teplota v ČR vykazuje obdobně jako v okolních zemích a celé planetě konzistentně rostoucí trend, u srážek lze zjednodušeně konstatovat, že dlouhodobé průměry ročních úhrnů zůstávají a v nadcházejících dekádách pravděpodobně zůstanou velmi podobné. Rostoucí teplota vzduchu přináší neodmyslitelně zvýšený evaporační požadavek atmosféry a při stejných srážkách dochází k nižšímu poměru srážek a výparu, tedy klimatická vodní bilance vykazuje negativní trend.

Cílem předkládané metodiky je představit metody, jak kvantifikovat dopady předpokládané klimatické změny na vodní bilanci v podmínkách ČR na několik příštích dekád. Hlavním principem je využití hydrologických modelů, prostřednictvím nichž lze scénáře změny klimatu transformovat do časových řad hydrologických poměrů a kvantifikovat celkovou vodní bilanci povodí a její případné změny. Speciální důraz je kladen na hodnocení přítoků vodních nádrží a zajištěnost zdrojů povrchových vod. Rovněž jsou diskutována možná adaptační opatření a cesty, jak tato adaptační opatření navrhnout, případně kombinovat, aby byla tato opatření co nejvíce účinná a robustní s ohledem na předpokládanou variabilitu klimatu a nejistoty v simulovaných scénářích budoucího klimatu. Předkládaná metodika sestává ze dvou základních částí: (i) obecný metodický popis, jak kvantifikovat dopady změny klimatu na hydrologii povodí a vodohospodářský sektor; a (ii) příklad řešení v rámci případové studie v povodí řeky Dyje, přičemž principy a metody jsou obecně přenositelné na libovolné povodí. I když případová studie prezentuje některé z předběžných výsledků, účelem není poskytnout jednoznačné informace o vodní bilanci v 21. století, ale především představit koncept analýzy vodní bilance v uceleném povodí za podmínek klimatických změn.

Předkládaná metodika navazuje na Metodiku pro navrhování adaptačních opatření k eliminaci dopadů nedostatku vody (Beran et al., 2019). Tuto původní metodiku rozšiřuje zejména o kontext dopadů klimatické změny v budoucnosti. Ačkoliv konec 21. století může pro mnohé z nás znít jako vzdálená budoucnost, v rámci vodohospodářství je tento časový rámec klíčový. Vývoj postupů, které kvantifikují dopady klimatické změny na vodní bilanci s perspektivou několika dekád, je strategicky důležitý pro zajištění udržitelných vodních zdrojů pro budoucí generace.

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.

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.

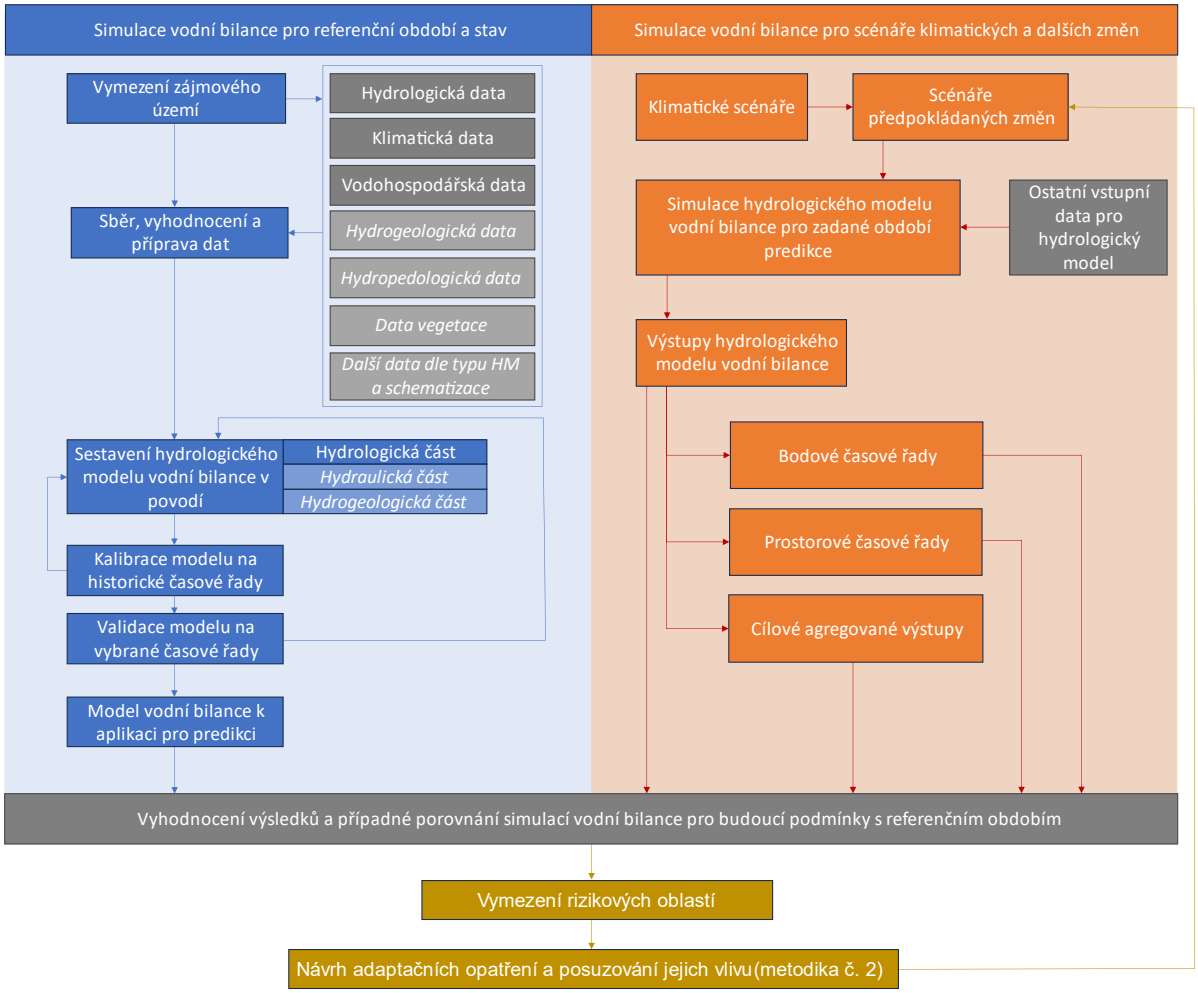
Samotný metodický postup se dělí do tří základních segmentů a několika dílčích kroků (Obr. 1):

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 scénáře klimatických a dalších změn
    1. Příprava klimatických scénářů
    2. Příprava scénářů předpokládaných změn v povodí
    3. Simulace vodní bilance pro podmínky budoucích změn
    4. Vyhodnocení simulací a tvorba cílových výstupů

C) Vyhodnocení výsledků a porovnání simulací vodní bilance
    1. Vymezení rizikových oblastí v zájmovém území
    2. Návrh adaptačních opatření a posuzování jejich vlivu

Navržený metodický postup je v souladu s hlavními dokumenty schválenými vládou ČR. Kromě VZ se jedná se 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.



Obr. 1 Schéma metodického postupu. Kurzívou jsou vyznačena vstupní data či procesy, které jsou zohledněny v HM v závislosti na míře detailu a typu schematizace. Označení "Metodika č. 2" odkazuje na následující dokument (od stejného autorského kolektivu) s názvem: „Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu“.

A) Simulace vodní bilance pro referenční období a stav

Termín "referenční období" se vztahuje k časovému úseku z relativně nedávné minulosti, jehož délka by měla být dostatečně dlouhá, aby odstranila vlivy krátkodobé variability v klimatických a hydrologických datech. Dle doporučení Světové meteorologické organizace (WMO) by toto období mělo mít ideálně alespoň 30 let. Běžnými příklady takových období jsou 1981–2010 či klimatický normál 1991–2020. Tato délka období je opodstatněná tím, že eliminuje přirozenou nízkofrekvenční variabilitu neboli cykličnost hydrologických a klimatických proměnných. Kratší období nemusí být v dlouhodobém kontextu dostatečně reprezentativní. "Referenční stav" pak označuje stav krajiny a způsob jejího využívání v době, pro kterou byl HM kalibrován a validován.

A1) Vymezení zájmového území

Zájmové území by mělo představovat hydrologické povodí, nebo dílčí povodí. Obecně lze doporučit, aby rozloha povodí byla minimálně 10 km^2, jelikož na menším povodí jsou omezené možnosti existence ucelené vodohospodářské soustavy. Horní hranice rozlohy není teoreticky stanovena.

Nejprve je zapotřebí určit geografické hranice povodí (zájmového území), které má být předmětem studie, a to pomocí:

a) Dostupných vektorových dat ve veřejných databázích či na vyžádání od správců povodí.
b) Odvození pomocí geografických informačních systémů (GIS) a digitálního modelu terénu, případně pomocí jiných GIS nástrojů[1].

Hranice povodí (zájmového území) by měla být ideálně určena povrchovou rozvodnicí, ale v některých komplikovanějších případech i hranicemi útvaru podzemních vod. Urbanizovaná povodí mohou být samozřejmě součástí vybraného zájmového území, ale je nezbytné upozornit na to, že urbanizovaná povodí mají specificky upravené jednotlivé procesy vodní bilance (jako systém odvodnění odpadních a dešťových vod, rozvody pitné vody, zpevněné povrchy, omezující prvky a specifické objekty infrastruktury – např. oddělovací komory aj.), a proto je potřeba postupovat k sestavování HM s urbanizovanými plochami velmi uvážlivě a se znalostí procesů vodní bilance v urbanizovaném povodí. Simulace vodní bilance HM se nedoporučuje pro zpracování zájmového území, které je zcela nebo převážně urbanizované. V takovém případě je nezbytné volit jiné typy simulačních modelů.

A2) Příprava vstupních dat

V závislosti na míře detailu zvoleného HM se odvíjí požadavky na vstupní data. Stanovení hydrologické a vodohospodářské bilance předpokládá analyzování minimálně 30letých časových řad v minimálně měsíčním časovém kroku. Daleko vhodnější je ovšem použití podrobnějšího ideálně denního či dokonce hodinového časového kroku.

Za **nezbytná data** lze považovat:

I. Hranice zájmového území
II. Digitální model terénu (DTM) s dostatečným prostorovým rozlišením (odvíjí se od možností HM)
III. Land use neboli mapa využití plochy či půdy

[1] Různé zdroje dat se liší svou přesností a volba zdroje dat je podmíněna dostupností (open access *vs*. proprietární databáze) a požadovanou přesností konkrétní úlohy (např. prostorovým rozlišením HM).

IV. Data pro hydrologickou bilanci:

a) Historická klimatická data zahrnující alespoň srážkové úhrny a teplotu vzduchu[2].
b) Průtoky, odtoky, M-denní průtoky[3], minimální zůstatkový průtok ve vybraných[4] profilech vodních toků a vodohospodářských soustav.

V. Data pro vodohospodářskou bilanci:

a) Základní charakteristiky vodních děl a objektů vodohospodářské infrastruktury. Mezi hlavní údaje patří:
   - velikost zásobního prostoru[5], rozdělení prostoru (velikost objemů) ve vodní nádrži
   - čára zatopených ploch / čára zatopených objemů[6]
b) Data o realizovaných odběrech a vypouštění vod v rámci existujících povolení k nakládání s vodami dle VZ 254/2001 Hl. II v dotčeném období bilance, tj.:
   - časové řady hodnot odběrů povrchových a podzemních vod,
   - časové řady hodnot vypouštění do povrchových a podzemních vod,
   - požadavky na režim hladin/průtoků (energie, plavba, rekreace apod.).
c) Manipulační řády a provozní řády vodních děl, vodohospodářských objektů a vodohospodářských soustav včetně případných změn a aktualizací těchto řádů.
d) Kapacity a znalosti převodů vody v rámci či mezi povodími.
e) Časové řady přítoku a odtoku do/z nádrže – pro jednoleté či víceleté řízení nádrží – dlouhodobé možnosti využití zásob vody ve vodní nádrži dle specifikace jejího použití.
f) Časové řady výšky hladiny (objemu vody) v nádrži

Za **doplňující data** lze považovat (nezbytnost využití se odvíjí od volby HM) např.:

a) hydropedologická data zahrnující půdní typ a fyzikální vlastností půd (např. zrnitostní složení a obsah organické hmoty, půdní hydrolimity, retenční kapacita půdy parametry pedotransferových funkcí, nasycená hydraulická vodivost apod.),
b) hydrogeologická data (např. hydrogeologické rajóny, mocnost hlubinných kolektorů, čerpání podzemní vody či přítomnost pramenů),
c) síť vodních toků a jejich geometrie včetně popisu objektů vodohospodářské infrastruktury,
d) dynamické vegetační parametry jako index listové plochy a hloubka kořenů,
e) data dálkového průzkumu Země[7] popisující např. aktuální evapotranspiraci, sněhovou pokrývku či půdní vlhkost

---

[2] Zpravidla se jedná o průměrnou, ale případně také maximální a minimální teplotu vzduchu za dané časové období. Některé HM mohou jako vstup vyžadovat i další klimatické proměnné jako globální radiace, vlhkost vzduchu a rychlost větru, z nichž se počítá potenciální evapotranspirace či vstupem může být přímo již vypočtená potenciální nebo referenční evapotranspirace. Uvedená klimatická data mohou být do modelů zadávána jako časové řady pro konkrétní stanice - např. stanice českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), či jako prostorová data vzniklá interpolací mezi stanicemi.

[3] Průměrný denní průtok, který je dosažen nebo překročen během M dní v roce. Udává se buď pro konkrétní rok, nebo pro dlouhodobé průměrné denní či měsíční průtoky.

[4] Průtok, který je nutno ponechat ve vodním toku v daném profilu nebo úseku pro udržení jeho ekologických funkcí a umožnění obecného nakládání s povrchovými vodami.

[5] Objem vody, který je možné využít jako zdroj vody pro uspokojení potřeb obyvatelstva. Zahrnuje vodu pro pitné účely, užitkovou vodu i jinou.

[6] Průběh závislosti plochy hladiny/objemu vody v nádrži na výšce hladiny v nádrži (hloubce vody).

[7] Data obecně vhodná pro validaci HM.

A3) Sestavení hydrologického modelu vodní bilance

Pro posouzení dostupnosti vodních zdrojů je v Česku využíván princip kontinua – tedy vodní bilance, konkrétně hydrologické a vodohospodářské bilance množství povrchových a podzemních vod. Obsah a způsob sestavení vodní bilance určuje vyhláška č. 431/2001 Sb., postup zpracování vodohospodářské bilance dále podrobněji specifikuje příslušný metodický pokyn (MZe, 2002). Výstupem vodohospodářské bilance povrchových vod je vyhodnocení bilančních stavů a potažmo identifikace lokalit, které jsou nebo v budoucnu mohou být z hlediska zajištění potřeb užívání vody problémové (nacházejí se v pasivním nebo napjatém bilančním stavu).

Samotné sestavení HM závisí na zvolené míře komplexity procesů[8] zahrnutých do modelu. Tuto míru je zapotřebí stanovit na základě požadavků na vyhodnocení a podrobnosti potřebných výstupů. Na základě výše uvedeného je vybrán vhodný hydrologický model, který musí splňovat následující podmínky:

I. Model počítá hydrologickou chronologickou bilanci minimálně v měsíčním časovém kroku.
II. Vstupem do modelu jsou dříve definovaná nezbytná klimatická data.
III. Model je možné kalibrovat a validovat pro referenční období, a pak lze použít jeho parametry pro simulace budoucích podmínek.
IV. Model zahrnuje:
    a) hydrologickou bilanci,
    b) vodohospodářskou bilanci včetně výparu z vodních ploch.

Princip modelu vodohospodářské bilance (simulačního modelu zásobní funkce vodohospodářské soustavy) lze s určitou mírou zjednodušení popsat takto (Vyskoč, Zeman, 2008):

I. Na reálném povodí je vymezena vodohospodářská soustava povrchové vody, sestávající z prvků, které charakterizují chování soustavy z hlediska množství povrchových vod.

   Jedná se o prvky/profily:
   a) plnící funkci regulace odtoku (vodní nádrže a převody vody),
   b) s vlivem/požadavkem na zdroje vody (odběry a vypouštění vody, zajištění minimálních průtoků, hladin a dalších aktivit),
   c) plnící kontrolní funkci (hodnocení vlivu užívání vody na průtokový režim v bilančních profilech).

II. Simulační model simuluje chování soustavy v diskrétních časových krocích na základě znalosti časových řad přirozených průtoků (tj. neovlivněných užíváním vody a regulací průtoku), požadavků užívání vody, technických parametrů prvků soustavy a do modelu zavedených pravidlech hospodaření na vodních dílech.

Struktura prvků soustavy a nároků na užívání vody jsou v simulačním modelu považovány za konstantní a chování takto fixované soustavy je v rámci hydrologického podkladu prošetřeno v různých hydrologických situacích. K rozdělování vody ze zdrojů mezi uživatele dochází v každém časovém kroku podle manipulačních pravidel.

[8] Obecně se pro detailní studie využívá větší podrobnost vstupních dat a větší komplexita zahrnutých procesů, což umožňuje očekávat detailní výstupy.

A4) Kalibrace hydrologického modelu

Kalibrace modelu[9] zahrnuje proces srovnávání výsledků simulace s pozorovanými daty. Je zapotřebí zvolit reprezentativní období, v rámci kterého se prověří celé spektrum klimatických událostí a také řada objektivních kritérií, které slouží k posuzování úspěšnosti jednotlivých simulací. Pro bilanční HM je vhodné zvolit kritéria popisující dlouhodobou bilanci povodí, jako jsou průměrné hodnoty základních hydrologických charakteristik (průměrný průtok, popřípadě objem vody ve vodohospodářských objektech či vybrané kvantily popisující distribuci simulovaných hodnot). Rovněž lze doporučit standardní hydrologické statistické ukazatele spolehlivosti modelu jako např. Nash-Sutcliffe efektivita (NSE) či Kling-Gupta efektivita (KGE).

A5) Validace hydrologického modelu

Aby byl sestavený HM akceptovatelný, je nutné ho validovat což je opět srovnávání výsledků simulace s pozorovanými daty ovšem pro jiné časové období, než se použilo pro kalibraci modelu. Je vhodné, aby rozdíl mezi průměrnými hodnotami proměnných (např. průtok) pozorovaných a modelovaných v rámci validace byl co nejnižší a vycházel z dosažitelné přesnosti základních bilančních proměnných z monitoringu podzemních a povrchových vod ČHMÚ. Současně je však vhodné hodnotit í sezónní chod těchto ukazatelů například srovnáním měsíčních průtoků v průměrném roce. Pro tyto účely lze použít statistické ukazatele popsané v předchozí sekci. V případě, že není dosaženo dobré shody, je model nezbytné překalibrovat, ověřit vstupní data[10], doplnit vstupní data či zvolit jiný HM.

A6) Finální referenční simulace vodní bilance

Nakalibrovaný model lze použít pro simulace kontinuální časové řady pro alespoň 30leté referenční období. Tato simulace je následně využita jako reference pro porovnání se scénářovými (klimatické či jiné změny) simulacemi. Je nutné zdůraznit, že jakékoliv další simulace cílící na kvantifikaci změn v důsledku změny klimatu či jiných změn v krajině (land use, adaptační opatření atd.) musí být porovnávány s touto referenční simulací, a nikoliv s pozorovanými daty. Tedy platí pravidlo, že „porovnáváme simulace se simulacemi“. Důvodem jsou inherentní nejistoty v jakémkoliv modelu, které by se při porovnání scénáře simulace vůči pozorovaným datům mylně připisovaly vlivu změny v rámci scénáře. Vzhledem k tomu, že řada hydrologických procesů je ovlivněna počátečními podmínkami, je důležité prověřit citlivost konkrétního HM na nastavení počátečních podmínek a popřípadě učinit náležité opatření. Tím může být nastavení co nejreprezentativnějších počátečních podmínek či použití tzv. „*warm-up*“[11] simulace. Výsledky z této fáze nejsou využity pro další analýzy ani pro následné vyhodnocení simulací.

---

[9] Při kalibračním procesu je měněn set neznámých parametrů řídících rovnic tak, aby byla dosažena nejvyšší možná shoda simulovaných a měřených dat. Tato optimalizace parametrů může být řešena krokově uživatelem či automatizovaně pomocí iterativních procedur.

[10] Při práci se vstupními daty je třeba si uvědomit, že srážky představují klíčový vstup do vodní bilance. Zároveň je jejich prostorová interpolace mezi sítí měřicích stanic velmi komplikovaná. Často může být měření srážek podhodnoceno o několik jednotek až desítek procent. Z tohoto důvodu některé studie doporučují upravit data o srážkách na základě typu srážkoměru, rychlosti větru a také specifikace typu srážek, ať už dešťové, smíšené či sněhové. Horská povodí jsou zvláště postižena tímto systematickým podhodnocením, zejména kvůli vlivu rychlosti větru a vyššímu podílu sněhových srážek, které jsou obecně podhodnocovány nejvíce.

[11] Simulační období, během níž se modelový systém stabilizuje a vytvoří stabilní a reprezentativní podmínky pro start požadované simulace.

A7) Vyhodnocení simulace a tvorba cílových výstupů

Simulace HM je potřeba vyhodnotit dle následujícího bodu I. případně bodu II.:

I. Vyhodnocení zabezpečenosti požadavků na zdroje*:* modelem vytvořené časové řady je nutné statisticky vyhodnotit, tj. např. určit pravděpodobnost zabezpečení požadavků na užívání vody a minimálních průtoků, pravděpodobnosti překročení hladin vody v nádržích, čáry překročení průměrných měsíčních průtoků apod. Pro posouzení míry zajištění požadavků na užívání vody (odběrů, minimálních průtoků) a následné určení bilančních stavů lze aplikovat charakteristiky a kritéria uvedená v ČSN 75 2405, tj. jako určující charakteristiku vyhodnotit simulovanou zabezpečenost podle trvání a porovnat ji s požadovanou hodnotou určenou podle významnosti požadavku na užívání.

II. Zajištění minimálních zůstatkových průtoků a stupeň ovlivnění hydrologického režimu*:* Užívání vod ovlivňuje, resp. je limitováno, požadavky na zachování ekologické funkce vod a obecného nakládání s vodami, tj. požadavky na zachování minimálních zůstatkových průtoků ve vodních tocích a hladin podzemních vod a obecněji potom požadavky na zachování či dosažení dobrého ekologického stavu nebo potenciálu povrchových vod a dobrého kvantitativního stavu podzemních vod (Směrnice 2000/60/ES). Součástí vyhodnocení dostupnosti vodních zdrojů by proto mělo být i posouzení zabezpečeností minimálních zůstatkových průtoků (vyhodnocení zabezpečenosti podle trvání) a vyhodnocení dopadu užívání vod na přirozený hydrologický režim.

Hlavní výstupy by měly zahrnovat tabulkové hodnoty časových sérií vybraných proměnných a jejich statistik. Velmi užitečné je rovněž vizualizace výstupů do GIS mapových výstupů.

B) Simulace vodní bilance pro scénáře klimatických a dalších změn

Stejně jako v případě referenčního období, validovaný HM lze následně použít pro simulace budoucích scénářů změny klimatu, ale např. i scénářů změny využití krajiny či důsledků změn socioekonomického vývoje vedoucí např. ke změně nároků na vodní zdroje. Může se jednat i o hypotetické scénáře odlesnění části povodí v důsledku velkoplošné kalamity či poškození vodního zdroje s následnou potřebou zvýšit odběr z jiného zdroje.

B1) Příprava klimatických scénářů

V současnosti jsou dostupné nejnovější klimatické scénáře vycházejících z CMIP 6 simulací a zahrnující kromě simulací ve vysokém rozlišení (50 km) data až do konce 21. století. Dřívější zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) používaly termín emisní scénář (RCP), kdežto poslední šestá hodnotící zpráva IPCC (AR6) zavedla pojem scénářů socioekonomického vývoje (SSP). Jako scénář se středními emisemi lze označit RCP4.5 či SSP2-45. V rámci simulací CMIP jsou k dispozici globální klimatické modely (GCM) a v případě dynamického downscalingu tyto modely řídi regionální klimatické modely (RCM). I když regionální klimatické modely poskytují prostorově explicitnější informace, mezi oběma skupinami modelů v oblasti střední Evropy dochází k poměrně rozporuplným výsledkům, které jsou stále předmětem vědecké diskuse. Dosavadní zkušenosti autorů této předkládané metodiky vedou k preferenci statisticky downscalovaných GCM oproti RCM. Důvodem jsou zejména systematické chyby (vlhčí a chladnější klima během kontrolního historického běhu RCM) a také skutečnost, že zatímco u GCM máme k disposici simulace z poslední generace klimatických modelů CMIP6 (použité v rámci poslední, AR6, zprávy IPCC), tak u RCM jsou pro Evropu k dispozici Euro-CORDEX simulace, řízené starší generací globálních klimatických modelů – CMIP5 (tedy modely z předešlé zprávy IPCC). To znamená, že RCM nezohledňují nejnovější vědecké poznatky. Pro dosažení prostorového měřítka odpovídajícího HM lze využít metody dynamického (viz zmíněné RCM) či statistického downscalingu, jako je např. přírůstková metoda, v rámci které lze pracovat přímo s výstupy z GCM. Další možností je využití generátorů počasí, např. vícerozměrný stochastický meteorologický generátor SPAGETTA, který může být využit samostatně nebo rovněž v kombinaci s výše uvedenými postupy (RCM nebo GCM), kdy může některé jejich analýzy vhodně doplnit.

V rámci metodického postupu je vhodné použít klimatické scénáře s výhledem na alespoň několik následujících desetiletí. Délka zvoleného období by rovněž měla souviset s délkou životnosti případného adapčního opatření. Při přípravě klimatických scénářů lze doporučit:

I. Volbu sady tzv. emisních scénářů či scénářů socioekonomického vývoje zahrnující alespoň střední a vyšší emise.
II. Volbu sady alespoň tří klimatických modelů zahrnující tzv. střední model a modely reprezentujících vlhčí a sušší podmínky.
III. Aplikaci metod tzv. downscalingu, tj. zvýšení prostorového rozlišení pro potřeby HM.

B2) Příprava scénářů předpokládaných změn v povodí

Kromě klimatických změn je třeba brát v úvahu i další možné změny v budoucnosti. Ty mohou být odvozeny např. z projekcí MZe či MŽP, ale i vědeckých studií či odůvodněného předpokladu zadavatele. Mezi tyto změny patří např. předpokládána změna dřevinné skladby ve prospěch smíšených a listnatých lesů, změny osevních postupů s narůstajícím podílem meziplodin, pokračující degradace zemědělných půd či naopak zlepšující se stav, či jiné změny land use jako např. stále zvyšující se podíl zastavěné plochy. I kdybychom pominuli změny land use, je nutné uvažovat, že i existující ekosystémy se v podmínkách změny klimatu budou měnit. Jedná se o změny fenologie (např. dřívější nástup vegetace na jaře, změny termínů sklizně), dále o změny

způsobené přímo vyšší koncentrací atmosférického CO_2 ovlivňující transpiraci, avšak i změny způsobené extrémními vlnami veder či suchými periodami potenciálně vedoucí až ke kolapsům některých ekosystémů (např. smrkové monokultury). Všechny výše zmíněné změny mohou potenciálně ovlivňovat hydrologické poměry v krajině a následně celkovou vodní bilanci. Specificky vodohospodářská bilance pak může být ovlivněna rostoucí populací či demografickými změnami, které mohou vést ke změnám nároků na vodní zdroje a nutnosti změny manipulačních řádů, či posilování existujících zdrojů převody vody mezi povodími či přímo zakládáním nových zdrojů. Výčet těchto změn není vyčerpávající a poskytuje jen několik konkrétních příkladů. Je nezbytné zdůraznit, že uvažované změny mohou být do HM zavedeny v čase, a některé mohou mít i náběhovou nebo útlumovou funkci v čase (trendy v odběrech vod, změny dřevinné skladby v lesích aj.) Tyto případné změny by vedle klimatické změny však měly být brány v potaz při posuzování vodohospodářské zajištěnosti existujících či plánovaných vodních zdrojů a změny potřeb vody pro jednotlivé uživatele vod. Posouzení těchto změn musí být založeno na kvantitativních pokladech. Pro tyto účely je nezbytné, aby byl použit HM, který splňuje alespoň první dva z následujících tří bodů:

I. Zavedení změn v odběrech a vypouštěních a zavedení změn manipulačního řádu.
II. Zavedení změn v povodí formou modelových parametrů.
III. Zavedení změn v povodí přímo formou vstupních dat popisujících dané změny proměnných v čase a prostoru.

Adaptacím a plošným změnám v krajině se detailně věnuje navazující metodika č. 2.

B3) Simulace vodní bilance pro podmínky budoucích změn

Simulace pro budoucí období podléhá principiálně stejným požadavkům jako simulace pro období referenční. Tedy HM nakalibrovaný pro referenční období je použit rovněž pro alespoň 30leté období budoucí, přičemž je rovněž potřeba přijmout stejnou strategii počátečních podmínek simulace. Hlavním rozdílem oproti simulaci referenčního období je změna okrajových podmínek, reprezentovaných klimatickými časovými řadami, nebo upravení parametrů a vstupních dat pro reflektování jiných očekávaných změn. Doporučuje se postupovat systematicky:

I. Začít se změnou vstupních dat do modelu (určených na základě jednotlivých klimatických modelů).
II. Postupně analyzovat jednotlivé změny v samostatných simulacích a vyhodnocovat dopad změny samostatně v celé doméně řešení – v zájmovém území za vybrané simulační období.
III. Kombinovat jednotlivé změny tak, abych jejich vzájemný vliv přinesl optimální vodní bilanci a případně potlačil negativní vlivy změn jejich vzájemnou eliminací.

Tento přístup často vyžaduje komplexní pracovní postup s mnoha simulacemi, což může vyžadovat automatizaci. Klíčovými kroky jsou příprava vstupních dat, nastavení modelů a provádění samotných simulací.

B4) Vyhodnocení simulací a tvorba cílových výstupů

Uvedený postup tvorby výstupů a vyhodnocení simulací vodní bilance lze použít identicky i pro budoucí klimatické podmínky ovlivňující hydrologické poměry a předpokládané budoucí potřeby využívání vod. Analýza může zahrnovat také posouzení dopadů různých opatření, jako jsou změny ve využití vodních zdrojů, úpravy pravidel pro manipulaci s vodou, zvýšení kapacity zadržování vody atd., zejména na místech, kde existuje nedostatek vody nebo kde je vodní bilance napjatá. Mimo tyto změny lze vyhodnocovat i např. dopady změny land use. Forma výstupů simulací by měla být v souladu s formou výstupů pro referenční období, což usnadní jejich vzájemné srovnání.

C) Vyhodnocení výsledků a porovnání simulací vodní bilance

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.

C1) Vymezení rizikových oblastí

Charakteristika jednotlivých vodních zdrojů by se měla vždy zaměřit na dvě časové roviny, a sice na charakterizování:

I. Současného stavu – zhodnocení stavu během posledních 30 let či jiného referenčního 30letého období se zaměřením na případné časové trendy (postupné systematické posuny na pozadí přirozené variability).
II. Výhledových období – na základě klimatických scénářů a z nich vycházejících simulací vodní bilance.

Nasimulované časové řady průtoků pro libovolně zvolený bod na toku a pro tyto časové série vybrané průtokové charakteristiky (průměrný průtok, M-denní průtoky, minimální průtoky apod.) umožní porovnáním s referenční simulací identifikovat oblasti, které jsou nejvíce vystaveny riziku v důsledku klimatické změny či změny land use. Pomocí nasimulovaných přítoků či přímo výšky hladin existujících vodních nádrží lze identifikovat jejich potenciální poruchovost pro budoucí podmínky a celé spektrum klimatických scénářů. Důraz se většinou klade na tzv. střední scénář, nicméně nelze opomíjet ani tzv. krajní (extrémní) scénáře, které také mohou s určitou pravděpodobností nastat. Zpracováním celé sady (ensemblu) scénářů změny klimatu lze rovněž určit minimální klimatickou změnu, kterou lze chápat mj. tak, že přijatá adaptační opatření nebudou zbytečná (finanční prostředky nebudou vynaloženy bezúčelně), nicméně budou s ohledem na současnou úroveň vědeckého poznání spíše nedostatečná. Mimo simulované průtoky je samozřejmě vhodné analyzovat i další proměnné představující výstupy HM. V závislosti na komplexnosti modelu se jedná především o přímý (povrchový a podpovrchový) a základní odtok, efektivní infiltraci, aktuální evapotranspiraci, zásobu vody v mělké a hlubinné zvodni včetně dynamiky půdní vlhkosti a vodní hodnotě sněhové pokrývky. Zohlednění těchto proměnných umožní komplexní procesní porozumění dopadů klimatických změn či změn využití krajiny na hydrologické poměry.

C2) Návrh adaptačních opatření a posuzování jejich vlivu

Vymezování rizikových oblastí s ohledem na udržitelnost a zajištěnost vodních zdrojů je klíčovým krokem k určení cílených adaptačních opatření. Tato opatření mohou mít různou podobu v závislosti na konkrétních rizicích a potřebách dané oblasti.

I. Změny manipulačního řádu: Revize a optimalizace pravidel pro využívání vodních zdrojů (manipulační řád) může napomoci k lepšímu rozdělení dostupných zásob vody v průběhu roku a minimalizaci dopadů sucha.
II. Posílení vodního zdroje: Například prostřednictvím převodů mezi povodími či technologiemi, jako je umělá infiltrace nebo recyklace vody.

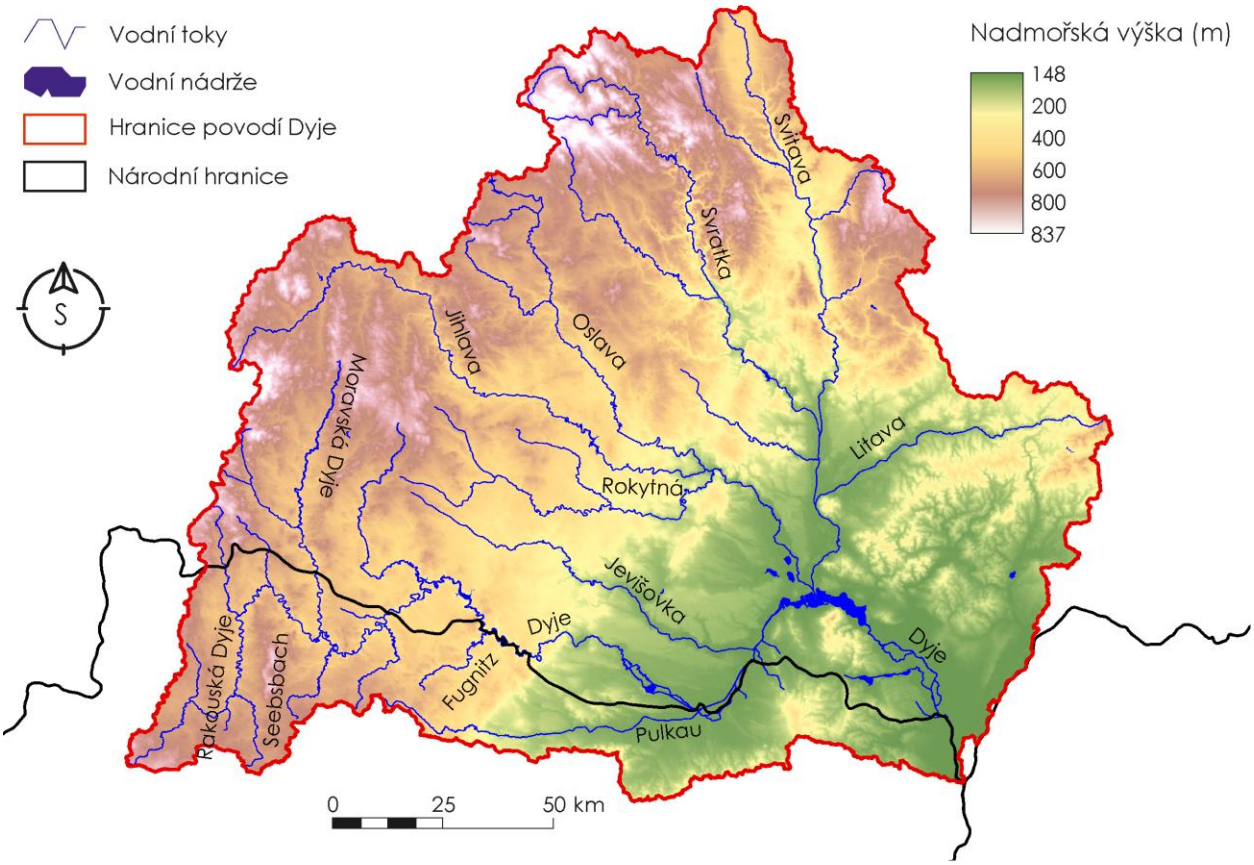
III. Nové vodohospodářské stavby: Výstavba nových přehrad, nádrží či jiných vodních staveb, které by pomohly regulovat průtok a zajišťovaly by stabilní zásobu vody.
IV. Úpravy v zemědělské krajině: Implementace technik šetrných k vodě, zlepšení půdní struktury, pěstování plodin s nižší potřebou vody, komplexní úpravy se zaměřením na zlepšení hospodaření s vodou v krajině.
V. Inovace v lesnictví: Například zavádění druhů dřevin odolnějších vůči suchu nebo změněné lesnické techniky, které optimalizují zadržení vody v krajině.

Využití HM je esenciální pro ověřování efektivnosti navrhovaných adaptačních opatření. Tyto modely umožňují simulovat, jak jednotlivá opatření ovlivňují vodní bilanci v dané oblasti. Díky tomu lze analyzovat a poté upravit nebo přeformulovat navrhované strategie pro co nejúčinnější řešení detekovaných rizik. Neocenitelnou hodnotou HM je schopnost kvantifikovat dopady a nabídnout možnost kombinování různých adaptačních opatření. Komplexním přístupem k této problematice se detailně věnuje Metodika č. 2.

2. PŘÍPADOVÁ STUDIE V POVODÍ ŘEKY DYJE

2.1 Charakteristika povodí řeky Dyje

Celková plocha povrchové rozvodnice povodí Dyje tvoří 13 419 km², z čehož 11 164,7 km² je na území ČR. Z hlediska správního členění ČR spadá povodí Dyje do celkem 6 krajů, kde dominuje kraj Jihomoravský (55,2 %) a Kraj Vysočina (34,3 %). Řeka Dyje vzniká soutokem Rakouské a Moravské Dyje v Dolním Rakousku a představuje nejdelší přítok řeky Moravy (povodí Dunaje). Prameny obou ramen leží v pohořích v nadmořské výšce 676 m n. m. (AT) a 635 m n. m. (ČR). Hlavní přítoky se nacházejí v moravské části povodí a směřují převážně severozápadním až jihovýchodním směrem (Obr. 2). Řeka Jihlava protéká stejnojmenným městem a řeka Svratka spolu s řekou Svitava protékají Brnem, druhým největším městem České republiky, které se nachází v těsné blízkosti soutoku řek.



Obr. 2 Digitální model terénu a zjednodušená říční síť povodí řeky Dyje.

Horní části řeky jsou utvořeny na krystalických horninách, zatímco dolní části se skládají z kvartérních usazenin. Rozšíření půdních typů v oblasti povodí Dyje je úzce spjato s geomorfologickým členěním území české i rakouské části povodí. V české 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. Střední a dolní část toku řeky Dyje je charakterizována antropogenními úpravami, včetně velkých nádrží postavených pro zásobování vodou nebo účely zavlažování.

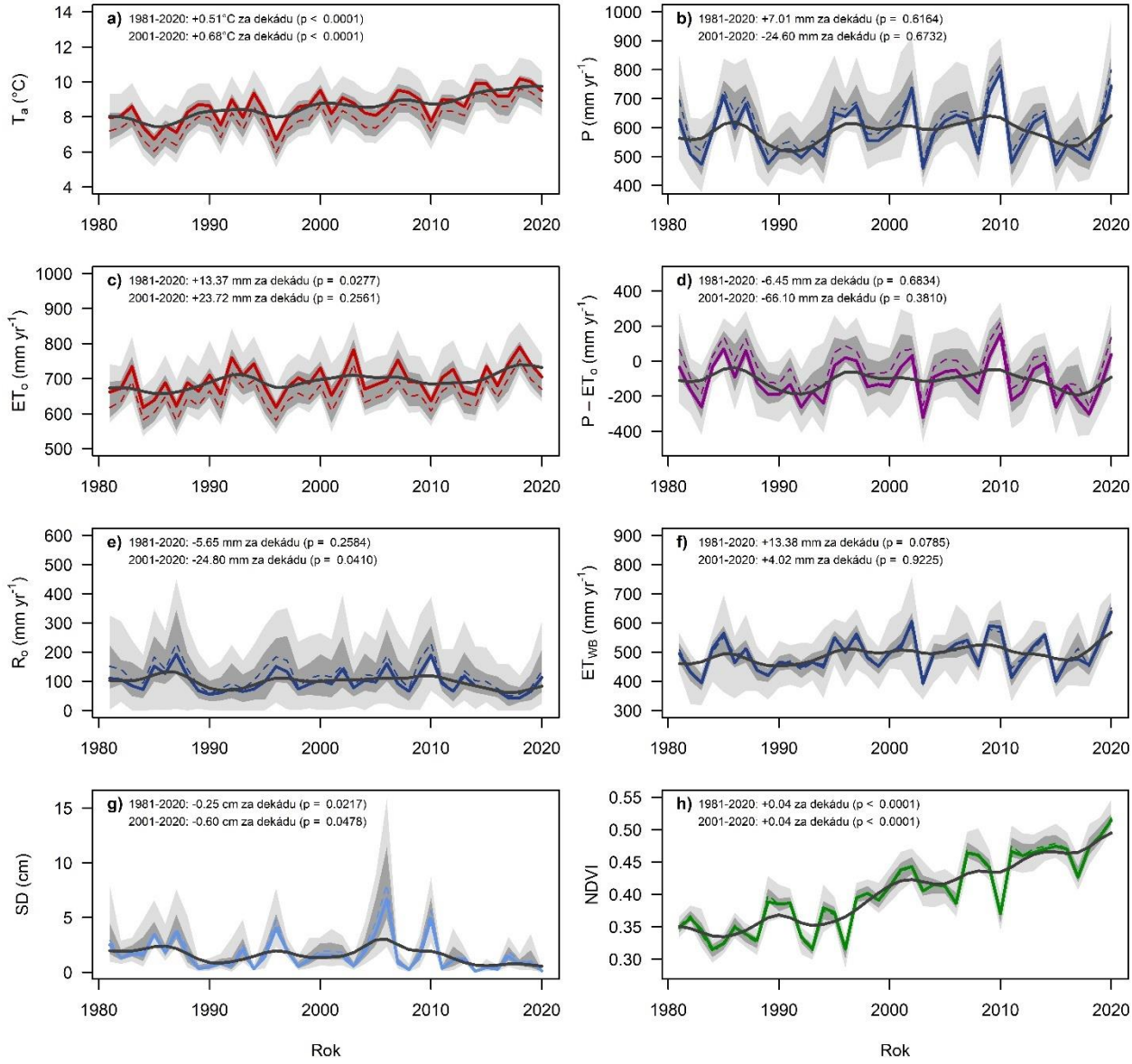
Dlouhodobý průměr (1981–2010) průměrné roční teploty vzduchu v povodí Dyje činí 8,3 °C (Obr. 3). Území s nadmořskou výškou do 300 m jsou mírně teplejší (9,4 °C), naopak oblasti s nadmořskou výškou nad 300 m chladnější (7,6 °C). Nejteplejším měsícem je červenec (18,6 °C) a nejchladnějším je leden (-2,1 °C). Od poloviny 80 let 20. století lze pozorovat nárůst teploty vzduchu. Nejteplejší roky byly 2018 (10,3 °C), 2019 (10,1 °C) a shodně 2014, 2015 (9,9 °C), tedy lze konstatovat, že poslední pětiletí i desetiletí byly nejteplejší od roku 1981. Trendy jsou pro všechny sezóny významně rostoucí ($p=0,05$). 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 (Obr. 3). 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). Největší rozdíl srážkových úhrnů mezi nadmořskými výškami je v zimních měsících, kdy v polohách nad 300 m n. m., spadne o 40 % více srážek než v nižších polohách. Naopak nejmenší rozdíl jen na podzim a v létě (15 resp. 18 %). Nejvíce srážek (v průměru 79,6 mm) spadne v červenci a nejméně v únoru (32,1 mm). Nejdeštivějším rokem v povodí Dyje byl rok 2010 (791,7 mm) a nejsušší byl rok 2015 (472,7 mm). Úhrny srážek jsou velice variabilní, a proto jsou všechny vypočtené trendy statisticky nevýznamné. 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 pozorujeme mírný rostoucí trend, naopak ve vyšších naopak pokles. Je ale nutné zdůraznit, že změny jsou malé a srážky jsou velmi variabilní a trendy statisticky nevýznamné.

Referenční evapotranspirace (ET_o) představuje evapotranspiraci hypotetického travního porostu nelimitovaného vodou ani živinami (Allen et al., 1998). Tento hypotetický porost má konstantní albedo, listovou plochu, stomatální vodivost a výšku, díky čemuž je ET_o čistě funkcí klimatických podmínek. Průměrná hodnota roční ET_o v letech 1981–2010 byla v povodí Dyje 688,1 mm (Obr. 3). S ohledem na skutečnost, že srážky nevykazují žádné dlouhodobé trendy, ale ET_o statisticky významně narůstá, lze hovořit o zvyšování aridity dané oblasti.

Dlouhodobý roční úhrn srážek v hornaté části povodí řeky Dyje přesahuje 650 mm, a roční koeficient odtoku (podíl srážek a odtoku) se pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,3, s průměrným ročním odtokem 187 mm. Nicméně nížinný region s nižším ročním úhrnem srážek kombinovaným s vysokým ET_o výrazně snižuje koeficient odtoku (0,1–0,15) kvůli průměrnému ročnímu odtoku téměř 60 mm. Průměrná hodnota roční hodnota odtoku v letech 1981–2010 byla v povodí řeky Dyje 105,2 mm. Relativně omezené vodní zdroje těžko uspokojí potřeby domácností, průmyslu, energetiky a zemědělství. Zejména v suchých letech dosahuje celkový odběr vody až 1/3 průtoku řeky. Například během suchého období 2014–2019 byly ohroženy dodávky pitné vody z přehrady Vranov kvůli nízké hladině vody, a musela být zavedena omezení. Nedostatek vody je částečně řešen akumulací vody ve 21 povrchových vodních nádržích umístěných na řece Dyji nebo jejích přítocích. Nížinné charakteristiky společně s mírným a teplým klimatem činí zemědělskou krajinu v povodí řeky Dyje úrodnou. Orná půda zabírá 66 %, zatímco lesy 28 % (16 % jehličnaté, 6 %

smíšené a 6 % listnaté) povodí. Jehličnaté lesy čelí bezprecedentnímu výskytu lýkožrouta smrkového, podmíněného vysokými teplotami a obdobím výrazného sucha v letech 2014–2019 (Brázdil et al., 2022). Tato kalamita způsobila významný úbytek jehličnatých lesů, což vyžadovalo radikální zvýšení sanační těžby, která na konci roku 2020 představovala asi 30 % celkové plochy jehličnatých porostů v povodí ve srovnání s rokem 2012.



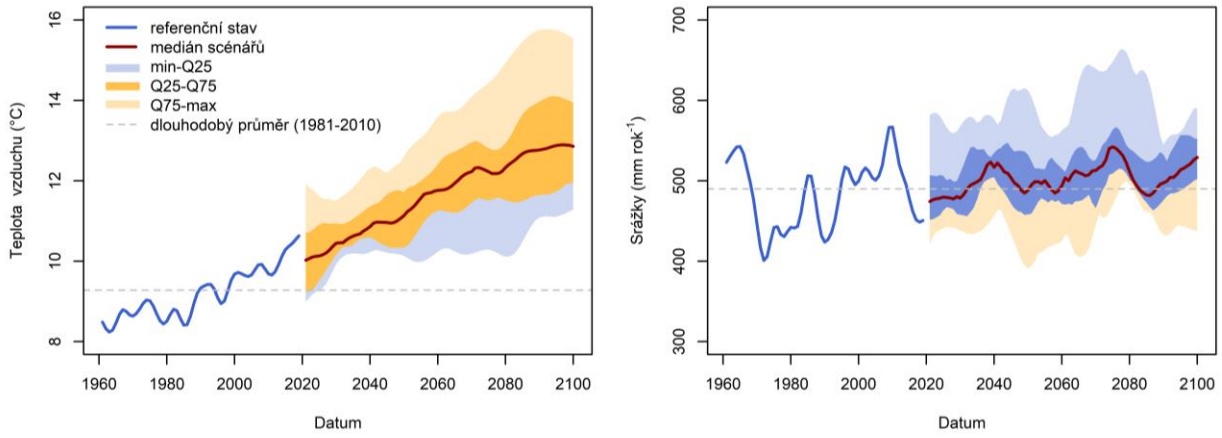
Obr. 3 Vývoj průměrné roční teploty (a), průměrných ročních úhrnů *srážek (b), průměrných úhrnů tzv. referenční evapotranspirace (c), průměrných úhrnů klimatické vodní bilance, tj. rozdíl mezi srážkami a referenční evapotranspirací (d), průměrným odtokem (e), průměrnou bilančně stanovenou aktuální evapotranspirací (f), průměrnou výškou sněhové pokrývky (g) a průměrným normalizovaným diferenčním vegetačním indexem (h). Barevné souvislé linie znázorňují průměr pro celé povodí řeky Dyje, barevné čerchované linie medián z celkem 42 dílčích povodí a šedé pásy 5, 25, 75 a 95 % kvantil ze všech dílčích povodí. Černá linie představuje časovou řadu vyhlazenou Gaussovským filtrem s 10letým oknem. Součástí grafu jsou rovněž trendy pro období 1981–2020 a období 2001–2020 (dle Fischer et al., 2023).*

2.2 Klimatická změna a její dopady

Jako globální změnu klimatu označujeme bezprecedentní změny v klimatickém systému Země, způsobené rychlým zvyšováním koncentrací skleníkových plynů v atmosféře způsobené převážně lidskou činností. Přítomnost skleníkových plynů je zásadní pro tzv. skleníkový jev, díky němuž je atmosféra schopna zachytávat a absorbovat dlouhovlnné záření emitované zemským povrchem a vyzařovat jej zpět. Jedná se o přirozený proces, který umožňuje stabilní teplotní podmínky na Zemi, nicméně činností člověka dochází k nepřirozenému zvyšování koncentrace skleníkových plynů v atmosféře a výraznému umocnění skleníkového efektu, což vede k dodatečné akumulaci tepla.

Tyto změny jsou způsobeny především spalováním fosilních paliv a další činností člověka. V globální perspektivě řadíme mezi jedny z hlavních dopadů klimatické změny nárůst teploty (vč. nárůstu extrémů jako např. frekvence a délka horkých vln) a změnu srážkového režimu (při zachování stejných srážkových úhrnů zaznamenáváme delší a častější epizody sucha a zároveň extrémnější srážkové události – s vyššími úhrny během kratší doby). Míra těchto dopadů se nicméně regionálně liší a pro každou oblast působí tyto dopady s jinou intenzitou.

V ČR jsou projevy klimatické změny charakterizovány především nárůstem teploty (Obr. 3 a Obr. 4). U srážek není dokumentován ani predikován dlouhodobý trend (Obr. 3 a Obr. 4), nicméně lze předpokládat změny jejich časové a prostorové distribuce (Obr. 4) a častější konvektivní charakter, způsobený kombinací vyšších teplot a vyššího výparu. Tyto změny jsou potvrzeny dlouhodobými záznamy ze sítě měřících stanic (Brázdil et al., 2021; Fischer et al., 2023; Zahradníček et al., 2021) a mohou mít zásadní vliv na charakteristiku hydrologických procesů, jako změny v odtoku a evapotranspiraci (Obr. 3). Mezi další důsledky těchto změn můžeme zahrnout např. snížení zastoupení sněhových srážek v celkových srážkových úhrnech (v zimním období srážky, vlivem zvýšené teploty, častěji vypadávají ve formě deště) a tím i změny v zásobení půdy vodou v jarních měsících.



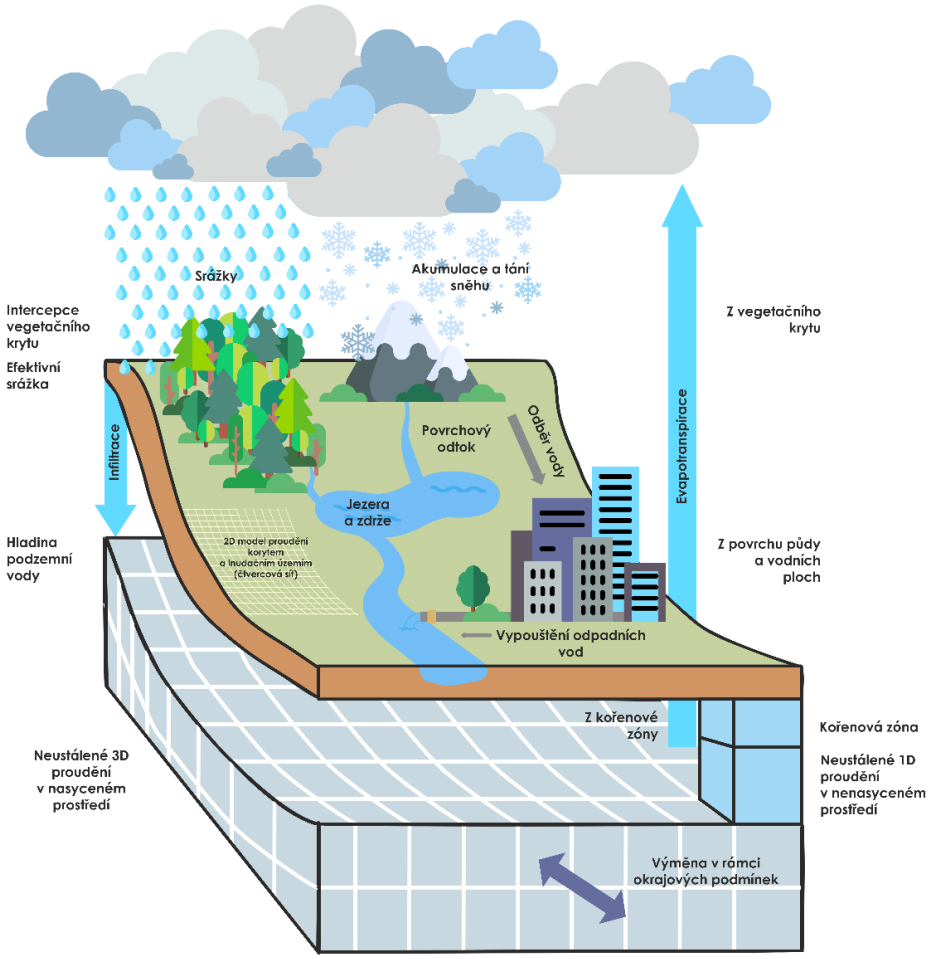
Obr. 4 Ukázka dokumentovaného a předpokládaného vývoje průměrné roční teploty vzduchu (vlevo) a průměrných ročních úhrnů srážek (vpravo) pro lokalitu Vranov nad Dyjí v letech 1961 až 2100.

Tyto výše nastíněné změny s sebou přinášejí konkrétní dopady téměř ve všech sektorech lidské činnosti. V podmínkách Evropy se v posledních dekádách setkáváme se sníženou dostupností pitné vody, zaváděním regulačních opatření jak pro spotřebu vody domácností, tak průmyslu, omezením možnosti splavnosti páteřních vodních toků či přepravy standardního množství nákladu, nedostupnou vodou pro zemědělské závlahové systémy, sníženými výnosy

zemědělských plodin, špatnou kondicí lesních ekosystémů vedoucí až k jejich rozpadu (např. nedávná kůrovcová kalamita) a zvýšeným výskytem přírodních požárů (Naumann et al., 2021).

2.3 Hydrologické modelování

Hydrologický model (HM) je matematický popis hydrologického cyklu. Tento popis může mít podobu jednoduché transformační funkce (např. lineární nádrž, jednovrstvá neuronová síť se zpětnou propagací chyby), složitější soustavy navzájem propojených stavových a tokových veličin v soustavě obyčejných diferenciálních rovnic, nebo numerického řešení komplexního fyzikálního popisu procesního modelu pomocí soustavy parciálních diferenciálních rovnic. HM obecně představuje zjednodušení reálných procesů v krajině s cílem kvantifikovat procesy spojené s koloběhem vody a nakládání s vodními zdroji (Obr. 5).



Obr. 5 Schéma integrovaného, fyzikálně založeného plošně distribuovaného 3D hydrologického modelu.

HM umožňují simulovat procesy vodní (hydrologické) bilance jako např. tání sněhu, intercepci, infiltraci do půdního profilu, evapotranspiraci, časoprostorovou variabilitu půdní vlhkosti, toky vody v nenasycené a nasycené zóně, povrchový, podpovrchový a základní odtok, průtoky v korytech

řek, akumulaci vod aj. HM lze dělit dle řady kritérií – základní dvě skupiny tvoří modely statistické a deterministické. V rámci řešené studie se využívaly převážně modely deterministické, které se obecně dále dělí dle míry popisu fyzikálních procesů na modely empirické, modely konceptuální a modely částečně či plně fyzikálně založené (Willems, 2000). Prostorově distribuovaný plně fyzikálně založený model je takový, u něhož lze všechny parametry měřit v terénu a simulované procesy zachycují reálnou prostorovou a časovou variabilitu (Abbott et al., 1986). Oproti tomu model empirický pouze matematicky popisuje vztah mezi vstupem a výstupem bez nutné znalosti fyzikálních procesů.

Dle míry komplexnosti lze HM dělit následovně:

a) schematizované bilanční modely se zjednodušenými procesy i velkou mírou prostorové integrace (např. celé povodí, vodní útvar atd.);
b) konceptuální modely se schematizovaným popisem všech významných procesů a jejich částečnou prostorovou distribucí v řádu jednotek kilometrů;
c) fyzikálně založený integrovaný systém se schematizovanou nenasycenou a nasycenou podpovrchovou zónou a prostorovou distribucí v řádu stovek metrů až jednotek kilometrů;
d) fyzikálně založený detailní trojrozměrný (3D) integrovaný hydrologický model povrchové a podzemní zóny se zjednodušeným zohledněním procesů v hluboké zvodni formou okrajových podmínek a prostorovou distribucí v řádu desítek metrů;
e) fyzikálně založený komplexní integrovaný hydrologický a hydrogeologický model s detailní 3D distribucí hluboké i mělké zvodně a horninových kolektorů a prostorovou distribucí v řádu desítek metrů.

Z pohledu prostorového pojetí:

a) Celistvé konceptuální modely (např. Bilan, GR4J) řeší hydrologickou jednotku jako jeden celek, bez prostorového rozlišení proměnných uvnitř této jednotky.
b) Semidistribuované modely (např. Topmodel, mHM) pracují s prostorovou doménou rozdělenou na jednotlivé funkční (relativně velké) celky, nebo rozdělenou statisticky, přičemž obvykle ne všechny procesy hydrologického cyklu jsou součástí integrovaného řešení.
c) Distribuované modely (např. HEC-HMS, WaSiM, Mike SHE) pracují s doménou rozdělenou na jednotlivé výpočetní elementy (čtverce, uzly, polygony), přičemž zahrnuté procesy hydrologického cyklu (například proudění v říční síti či proudění podzemní vody ve zvodních) jsou schematizovány ve srovnatelném prostorovém rozlišení.
d) Integrované či propojené modely (např. Mike SHE + FEFLOW, modely proudění v říční síti + MODFLOW atd.) popisují hydrologickou bilanci včetně vodohospodářského modelu a zohlednění procesů v mělkých i hlubinných zvodních holisticky v jednom integrovaném celku včetně zvýšené podrobnosti řešení ve vybraných oblastech (např. variabilní velikost prvků výpočetní sítě modelů proudění podzemní vody MODFLOW a FEFLOW).

2.4 Příprava klimatických scénářů

Výstupy klimatických modelů nelze přímo použít pro simulaci hydrologické bilance. Tyto výstupy je nutné nejprve korigovat za účelem odstranění systematické chyby nebo transformovat pozorované řady tak, aby změny mezi pozorovanou a transformovanou řadou odpovídaly změnám v simulaci klimatických modelů. Druhý uvedený přístup se označuje jako "přírůstková metoda" nebo "přímá modifikace" a je v ČR tradičně používán pro modelování dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci, jelikož je modelovaná hydrologická bilance robustnější ve srovnání s využitím korigovaných simulací. Pro využití v denním kroku je vhodné aplikovat transformace, které uvažují nejen změny průměrů ale i variability. To umožňuje například pokročilá přírůstková (*"Advanced Delta Change"* – ADC) metoda. ADC metoda umožňuje zahrnout do transformace i změnu variability. To zjednodušeně znamená, že extrémy se mohou měnit jinak než průměr (což správně reflektuje situaci, jak ji zaznamenáváme ve skutečném světě). Při odvození změn srážek z klimatického modelu ADC metoda uvažuje i systematické chyby simulace, které nemusí být lineární. Další podrobnosti lze nalézt v práci van Pelt et al. (2012). Srážky jsou transformovány pomocí vztahu

$$P^* = \begin{cases} a\,P^b & \text{pro } P \leq P_{90} \\ \frac{E^F}{E^C}(P - P_{90}) + a(P_{90})^b & \text{pro } P > P_{90} \end{cases},$$

kde P^* jsou transformované srážky, P pozorované srážky, P_{90} je 90% kvantil srážek, indexy C a F indikují pozorovaná data, simulovaná data pro kontrolní období a simulovaná data pro scénářové období. Parametry a a b jsou transformační parametry, které jsou odvozeny pro 7denní bloky, což zaručuje sezónní variabilitu změn. Lineární transformace pro hodnoty nad P_{90} zabraňuje výskytu nerealisticky vysokých hodnot, které jsou relativně často výsledkem nelineární transformace pro $P > P_{90}$ a $b > 1$. Pro srážky vyšší než 90% kvantil srážek v daném měsíci je vypočtena nadprahová hodnota $E = P - P_{90}$. Průměrné nadprahové hodnoty v simulaci klimatického modelu pro kontrolní a scénářové období jsou vypočteny dle

$$\bar{E}^C = \frac{\sum P^C - P_{90}^C}{n^C} \text{ a } \bar{E}^F = \frac{\sum P^F - P_{90}^F}{n^F}$$

kde n^C a n^F je počet nadprahových hodnot v kontrolním a scénářovém období. Transformační parametry a a b jsou odvozeny z hodnot 60 % (P_{60}) a 90 % (P_{90}) kvantilu srážek dle

$$b = \frac{\log\left[g_2 \frac{P_{90}^F}{(g_1\, P_{60}^F)}\right]}{\log\left[g_2 \frac{P_{90}^C}{(g_1\, P_{60}^C)}\right]},\ a = \frac{P_{90}^F}{(P_{90}^C)^b\, g_1^{1-b}}$$

kde g_1 a g_2 jsou korekční faktory vyjadřující systematické chyby v P_{60} a P_{90} v simulaci klimatického modelu pro kontrolní období dle

$$g_1 = \frac{P_{60}}{P_{60}^C} \text{ a } g_2 = \frac{P_{90}}{P_{90}^C}.$$

Jelikož hodnoty P_{60}, P_{90}, E_C a E_F jsou časově relativně variabilní, jsou průměrné týdenní hodnoty těchto veličin vyhlazeny prostřednictvím Gaussovského filtru.

Transformace teploty vzduchu je v ADC metodě prováděna následovně

$$T^* = \frac{\sigma^F}{\sigma^C}(T - \bar{T}) + \bar{T} + \bar{T}^F - \bar{T}^C,$$

kde T^* je transformovaná teplota, $\bar{T}$ pozorovaná průměrná teplota, $\bar{T}^C$ a $\bar{T}^F$ je průměrná teplota pro kontrolní simulaci klimatického modelu a scénářovou simulaci klimatického modelu a s^C a s^F jsou směrodatné odchylky denní teploty pro kontrolní a scénářové období v simulaci klimatického modelu. Hodnoty jsou opět stanoveny v týdenním kroku, aby byl zachován jejich ročních chod a podobně jako u srážek je provedeno vyhlazení parametrů transformace. Teplota vzduchu je na rozdíl od srážek transformována lineárně. Další meteorologické proměnné (globální záření, relativní vlhkost a rychlost větru) jsou modifikovány vynásobením poměrem průměrů za období kontrolního běhu a období scénářových simulací. Parametry transformace jsou opět vyhlazeny. Vstupní data staničních měření jsou aplikována ve formě technických řad, tj. časové řady bez chyb, homogenizované a s doplněnými mezerami v měření (Štěpánek et al., 2011, 2013). Data ze stanic jsou před aplikací metody ADC interpolována, stejně jako data z klimatických modelů, a tak jsou ve formě map poskytovány i informace o budoucích klimatických změnách. V tomto případě byly připraveny mapy v prostorovém rozlišení 500 m a denním časovém kroku pro všechny potřebné meteorologické proměnné.

S ohledem na interpretaci výsledků je potřeba si uvědomit, že vedle referenčního období 1981–2010 pracujeme s 30tiletými časovými okny pro budoucí klima: 2015–2044 (označováno jako “2030”), 2035–2064 (“2050”), 2055–2084 (“2070”) a 2070–2099 (“2085”). Období se navzájem překrývají. V rámci těchto časových oken lze vyhodnocovat statistické charakteristiky (vč. extrémů) za dané období. Obdobně jako u simulací klimatických modelů zde nedává smysl analyzovat a prezentovat jednotlivé dny nebo roky, ale pouze statistiky za celé období. Dlouhodobé trendy pak lze vyhodnocovat tak, že se na sebe napojí jednotlivá (klouzavá) období v budoucím klimatu.

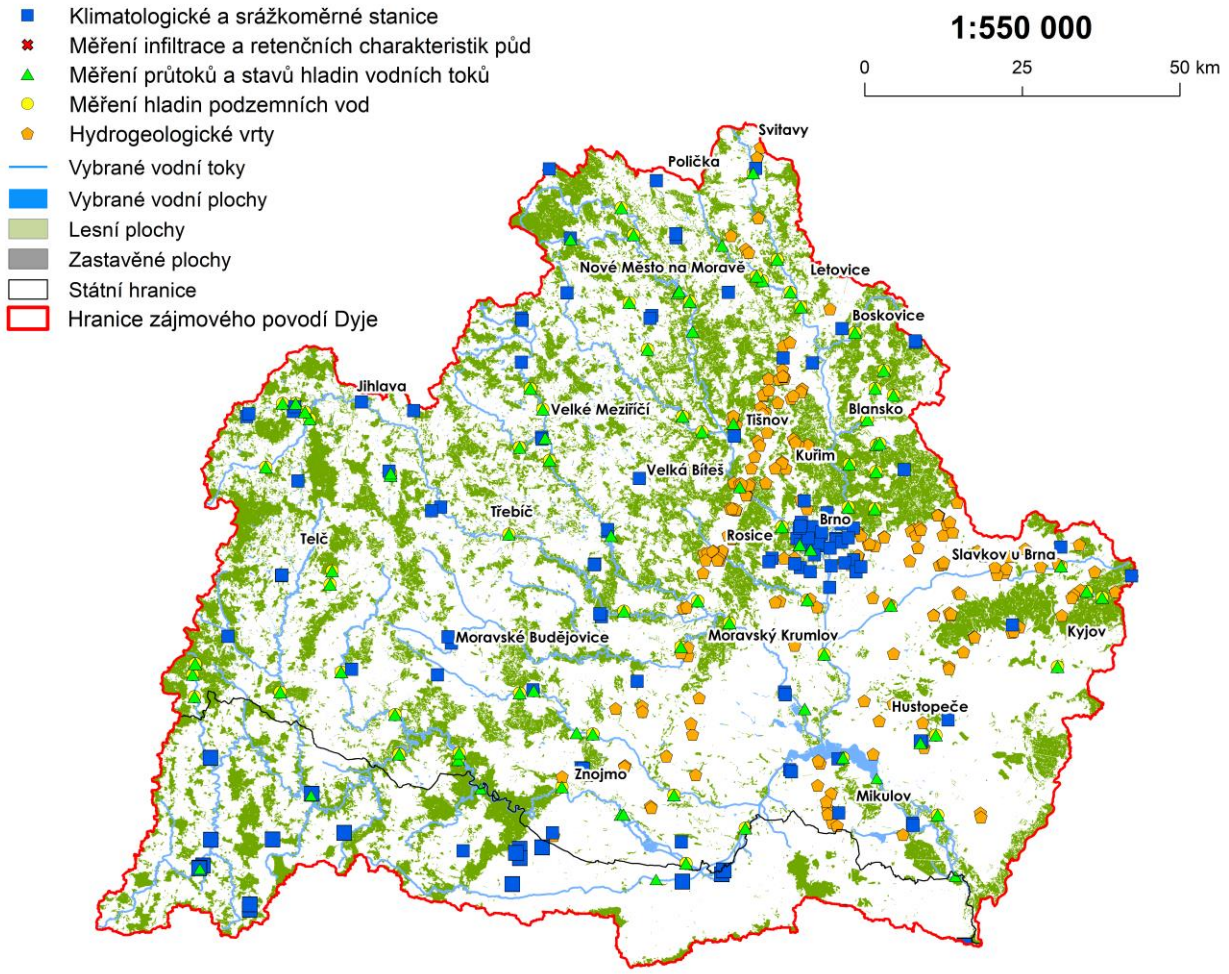
2.5 Sestavení hydrologického modelu povodí

V případové studii byl použit integrovaný HM MIKE SHE umožňující simulovat ucelenou bilanci povodí – tedy hydrologickou a vodohospodářskou bilanci. Jedná se o plošně distribuovaný fyzikálně založený HM, který umožňuje zahrnutí všech klíčových procesů hydrologického cyklu. Míru detailu popisu jednotlivých procesů je možné uzpůsobit datovým možnostem a požadovaným výstupům. Simulační nástroj distribuovaný v prostoru je zaměřený na integrovaný výpočet bilance objemu vody plošně v jednotlivých diskrétních částech území (ve zvoleném rozlišení čtvercové výpočetní sítě). Nástroj zahrnuje moduly pro výpočet tání sněhu, intercepci, infiltraci, výpar z půdy, transpiraci, vertikální proudění v nenasycené zóně (infiltrace/vzlínání) včetně proudění systémem makropórů, odběr vody kořeny, 3D pohyb podzemní vody v nasycené zóně, dotaci z podzemní vody do povrchových toků a do půdy. Integrovaný hydraulický model proudění v korytech MIKE HYDRO využívá schematizaci 1D aproximacemi pohybových rovnic a byl použit i pro schematizaci manipulace na nádržích. Jednotlivé segmenty systému MIKE jsou přímo integrovány vnitřními formáty. Přímé spřažení hydrologického a hydraulického modulu umožňuje integraci procesů a zachování jejich zpětnovazebních mechanismů.

Výsledný HM povodí Dyje byl postaven na základech rozsáhlé databáze (Obr. 6). Datová základna zahrnula jak volně dostupná data (např. WMS zdroje), data od správců toků, institucí a dotčených organizací a také data vlastního terénního šetření (např. půdní průzkum). Shromáždění databáze s důvěryhodným a ověřeným souborem místně specifických informací

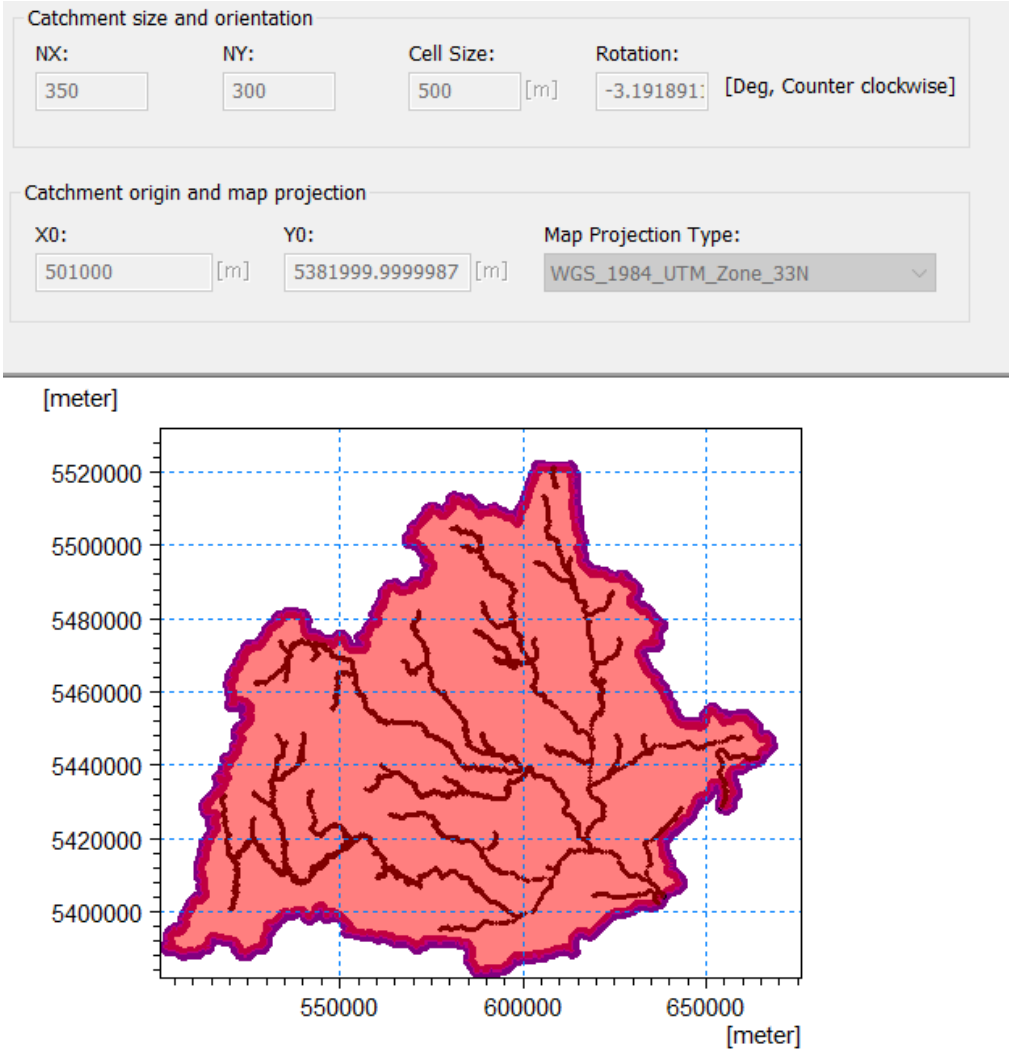
bylo základním předpokladem pro stavbu věrohodného modelu. Hydrologický bilanční model zahrnuje informace jak o přírodních procesech v povodí, tak o antropogenním ovlivnění. Proto bylo zapotřebí neopomenout při sběru dat a informací všechny důležité subjekty.

Pro účely sestavení HM povodí řeky Dyje, který má za účel simulovat veškeré pohyby povrchové vody a podzemní vody s mělkým oběhem v povodí, byl zvolen softwarový nástroj MIKE SHE, verze 2021 (DHI). Nástroj umožňuje simulovat hydrologické procesy na základě numerických řešení diferenciálních rovnic s fyzikálně založenými parametry. Výhodou zvoleného nástroje je možnost využití prostorové a časové diskretizace vstupních mapových podkladů, díky čemuž byla zajištěna nejvyšší možná míra reálnosti popisu území ve zvoleném měřítku. Další výhodou je přímé propojení s hydraulickým modelem MIKE HYDRO, ve kterém byl simulován odtok vody v detailní síti říčních toků včetně inundačních území. Tato síť byla vytvořena na základě geodeticky zaměřených profilů (tam, kde byly k dispozici) a významných vzdouvacích objektů na toku. Do říční sítě byly přímo napojeny časové řady kvantity odběrů a vypouštění podle evidence uživatelů (zdroj PMo).



Obr. 6 Přehledová mapa povodí Dyje a podkladní databáze bodových měření a prostorových dat.

Model povodí řeky Dyje byl sestaven v jednotné ortogonální výpočetní síti v prostorovém rozlišení 500 m (výpočetní buňka 500 x 500 m) a jednotlivé datové vstupy pokryly celé simulované území. Celková plocha modelovaného území činí 12 739 km^2, z toho asi 2 135 km^2 je na území Rakouska. Jelikož je uživatelské rozhraní modelu založeno na interním prostředí GIS, bylo zapotřebí použít jednotný geografický referenční systém. V případě modelu povodí řeky Dyje byl využit geografický referenční systém EPSG: 32633 (WGS 84 UTM 33N).

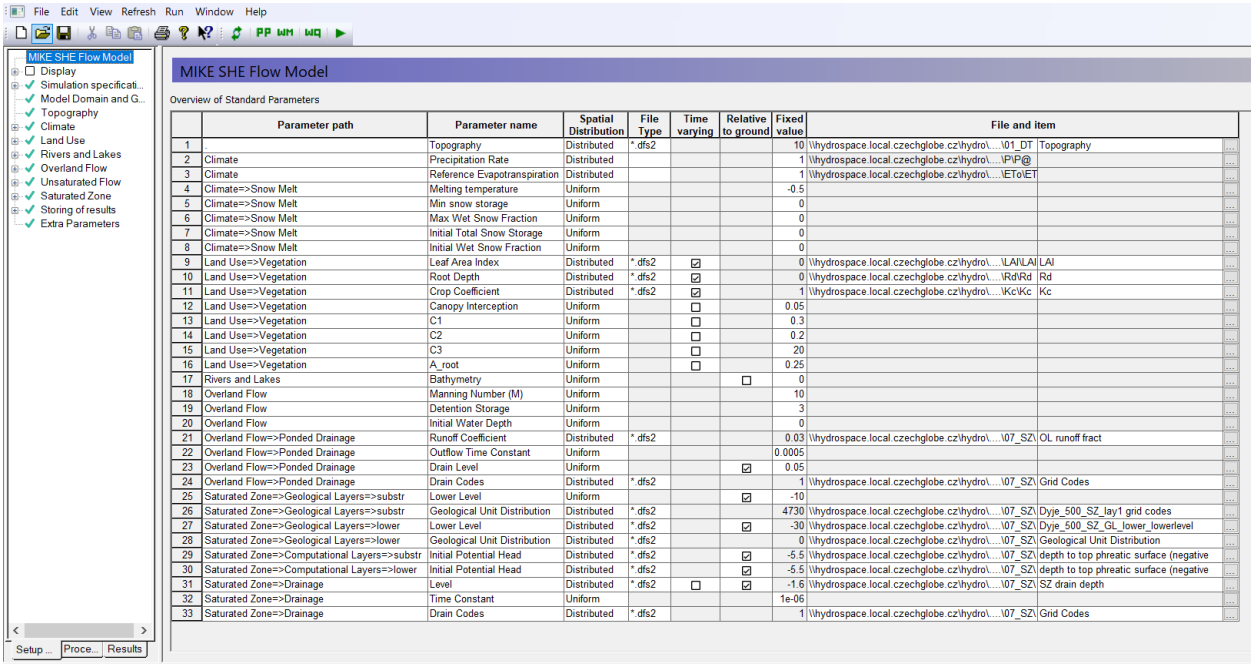


Obr. 7 Vymezení území povodí řeky Dyje a zahrnuté vodní toky v hydrologickém modelu MIKE SHE.

Základní časový krok výpočtu byl zvolen 1 den, i když jednotlivé submoduly využívají obvykle (dynamicky se měnící) kratší interní výpočetní časové kroky (např. hydraulický model proudění v korytech).

Modelovací nástroj oboustranně propojuje 5 základních modulů (sněhový modul, povrchový odtok, koncentrovaný odtok v korytě, proudění v nesaturované zóně, proudění v saturované zóně). K přenosu mezi jednotlivými moduly dochází v každém výpočetním kroku. Parametry

řídících rovnic jsou zadány prostorově distribuovaně formou časově proměnlivých mapových vstupů (Obr. 8).



	Parameter path	Parameter name	Spatial Distribution	File Type	Time varying	Relative to ground	Fixed value	File and item	
1	.	Topography	Distributed	*.dfs2			10	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\01_DT	Topography
2	Climate	Precipitation Rate	Distributed				1	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\P\P@	
3	Climate	Reference Evapotranspiration	Distributed				1	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\ETo\ET	
4	Climate=>Snow Melt	Melting temperature	Uniform				-0.5		
5	Climate=>Snow Melt	Min snow storage	Uniform				0		
6	Climate=>Snow Melt	Max Wet Snow Fraction	Uniform				0		
7	Climate=>Snow Melt	Initial Total Snow Storage	Uniform				0		
8	Climate=>Snow Melt	Initial Wet Snow Fraction	Uniform				0		
9	Land Use=>Vegetation	Leaf Area Index	Distributed	*.dfs2	☑		0	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\LAI\LAI	LAI
10	Land Use=>Vegetation	Root Depth	Distributed	*.dfs2	☑		0	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\Rd\Rd	Rd
11	Land Use=>Vegetation	Crop Coefficient	Distributed	*.dfs2	☑		1	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\Kc\Kc	Kc
12	Land Use=>Vegetation	Canopy Interception	Uniform		☐		0.05		
13	Land Use=>Vegetation	C1	Uniform		☐		0.3		
14	Land Use=>Vegetation	C2	Uniform		☐		0.2		
15	Land Use=>Vegetation	C3	Uniform		☐		20		
16	Land Use=>Vegetation	A_root	Uniform		☐		0.25		
17	Rivers and Lakes	Bathymetry	Uniform			☐	0		
18	Overland Flow	Manning Number (M)	Uniform				10		
19	Overland Flow	Detention Storage	Uniform				3		
20	Overland Flow	Initial Water Depth	Uniform				0		
21	Overland Flow=>Ponded Drainage	Runoff Coefficient	Distributed	*.dfs2			0.03	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	OL runoff fract
22	Overland Flow=>Ponded Drainage	Outflow Time Constant	Uniform				0.0005		
23	Overland Flow=>Ponded Drainage	Drain Level	Uniform			☑	0.05		
24	Overland Flow=>Ponded Drainage	Drain Codes	Distributed	*.dfs2			1	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	Grid Codes
25	Saturated Zone=>Geological Layers=>substr	Lower Level	Uniform			☑	-10		
26	Saturated Zone=>Geological Layers=>substr	Geological Unit Distribution	Distributed	*.dfs2			4730	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	Dyje_500_SZ_lay1 grid codes
27	Saturated Zone=>Geological Layers=>lower	Lower Level	Distributed	*.dfs2		☑	-30	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	Dyje_500_SZ_GL_lower_lowerlevel
28	Saturated Zone=>Geological Layers=>lower	Geological Unit Distribution	Distributed	*.dfs2			0	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	Geological Unit Distribution
29	Saturated Zone=>Computational Layers=>substr	Initial Potential Head	Distributed	*.dfs2		☑	-5.5	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	depth to top phreatic surface (negative
30	Saturated Zone=>Computational Layers=>lower	Initial Potential Head	Distributed	*.dfs2		☑	-5.5	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	depth to top phreatic surface (negative
31	Saturated Zone=>Drainage	Level	Distributed	*.dfs2	☐	☑	-1.6	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	SZ drain depth
32	Saturated Zone=>Drainage	Time Constant	Uniform				1e-06		
33	Saturated Zone=>Drainage	Drain Codes	Distributed	*.dfs2			1	\\hydrospace.local.czechglobe.cz\hydro\....\07_SZ\	Grid Codes

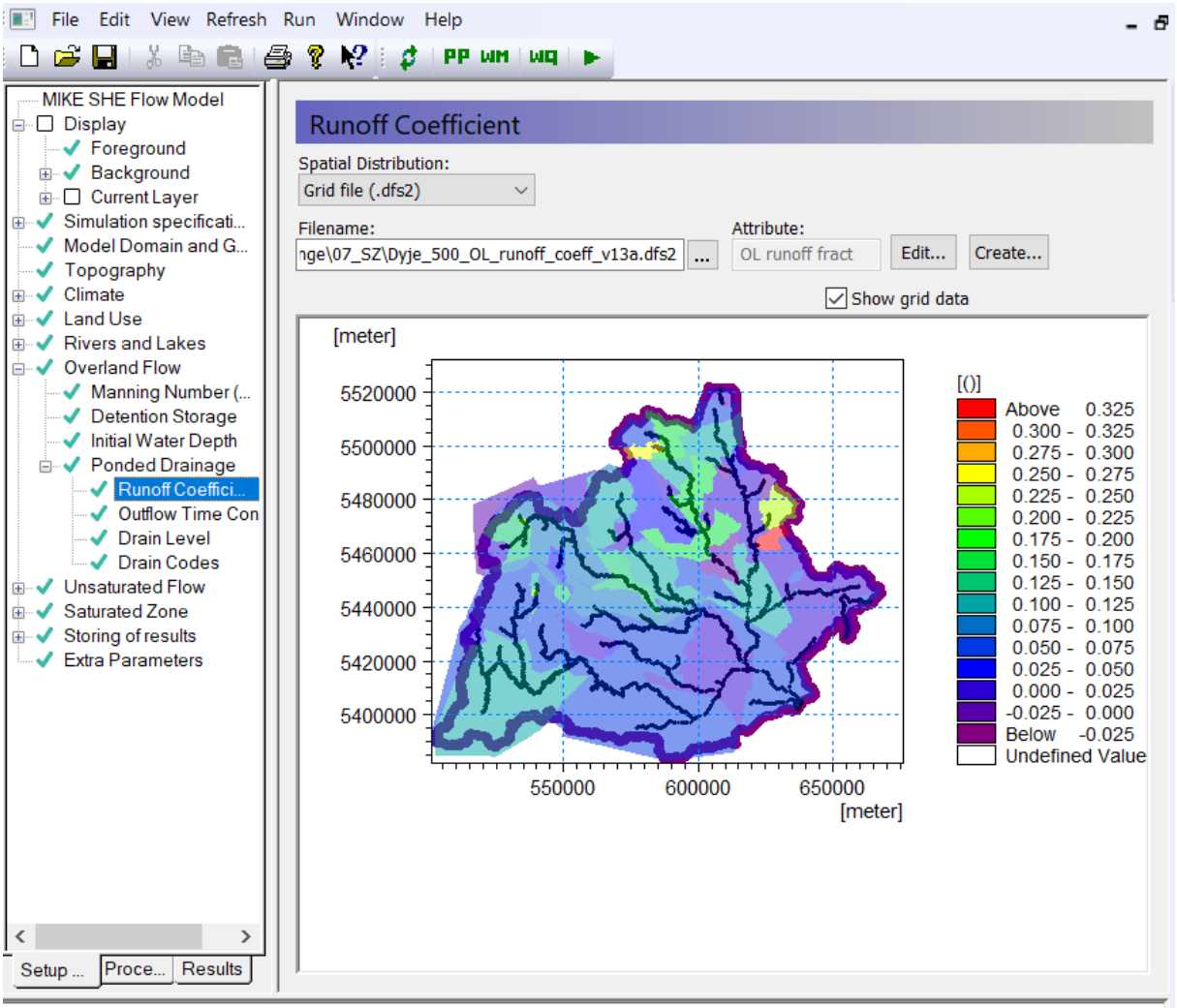
Obr. 8 Přehled základních parametrů hydrologického modelu MIKE SHE. Podle "Spatial Distribution" lze rozdělit datové vstupy na plně distribuované (Distributed) a jednotně zadané konstantou (Uniform).

Příprava plně distribuovaných mapových vstupů je časově náročná a neobejde se bez automatizace pracovního postupu. V této případové studii byl k automatizaci použit programovací jazyk a prostředí R. Pro čtení a zápis interních souborů byly využity knihovny MIKE IO (https://github.com/DHI/mikeio) a MIKE IO 1D (https://github.com/DHI/mikeio1d).

Model detailně popisuje 47 významných říčních toků (Obr. 7) o celkové délce 1 470 km. Ostatní, nepopsané vodní toky, byly zohledněny nastavením parametrů povrchového a rychlého podpovrchového odtoku v ploše. V rámci řešení vodních toků byly schematizované významné objekty, které mají vliv na charakter proudění a dobu zdržení ve vodním toku, a tudíž jsou důležité pro vodní bilanci. Mezi nejvýznamnější objekty patří 18 vodních děl, jejichž funkce byla algoritmizována do zjednodušených pravidel vycházejících z manipulačního řádu (MIKE HYDRO Control Structures). Správný popis manipulací byl ověřen porovnáním simulovaných a měřených hladin. Propojení mezi prostředím MIKE SHE a MIKE HYDRO bylo realizováno v příčných profilech, do kterých byl podle místně specifických či manuálně definovaných podmínek sveden odtok z modulu povrchového odtoku (formou zaústění povrchové drenáže a přetokem přes břehy koryt) a ze saturované zóny (formou mělké podpovrchové drenáže a základního odtoku vycházejícího z 3D modelu proudění).

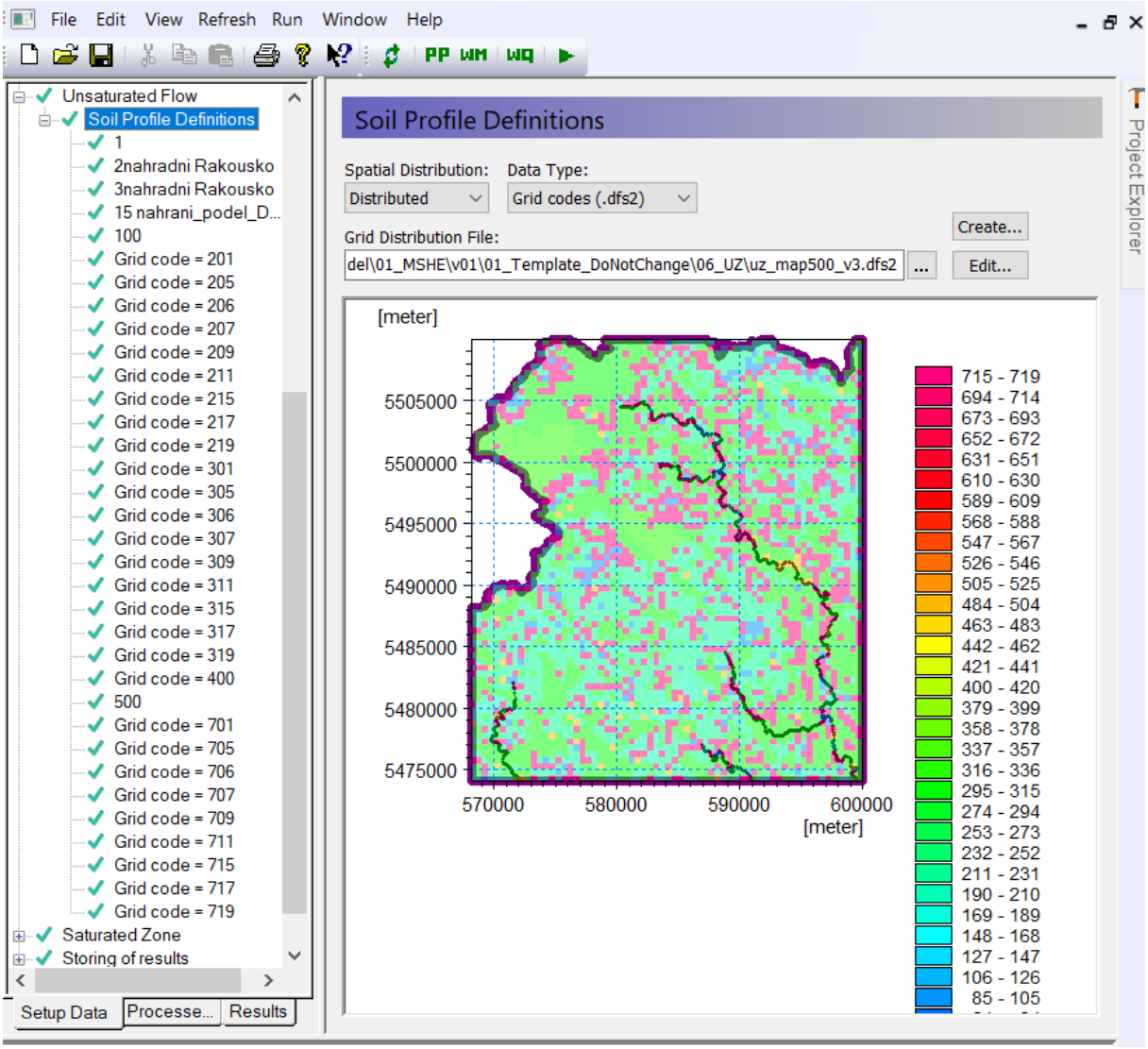
Modul povrchového odtoku (Obr. 9) byl schematizován především na základě povrchových rozvodnic dílčích povodí a s přihlédnutím k rozsahu drenážních ploch, jejichž prostorové vymezení a parametry odtoku byly zadány podle dat o melioracích. Kromě této schematizace

bylo v modelu simulováno 2D proudění po povrchu na základě numerického řešení Saint–Venantových rovnic. Z tohoto modulu je generováno v měřítku celého povodí přibližně 40 % z celkového odtoku povodí řeky Dyje (model referenčního stavu 1981–2010). Hodnota je však místně proměnlivá a závisí na specifických podmínkách dané lokality.



Obr. 9 Distribuce povrchového odtoku svedeného formou soustředěného odtoku do přiřazeného vodního toku. Jedná se o podíl efektivní srážky vstupující do rychlého povrchového odtoku.

Na modul povrchového proudění navazuje modul nesaturované zóny, kde byly vymezeny půdy podle mapy půdních typů a podle využití území v dané lokalitě. Pro vymezených 34 tříd byly definovány parametry popisující proudění nesaturovanou zónou na základě Van Genuchtenovy rovnice. Parametry pro tvorbu retenčních křivek a nasycené hydraulické vodivosti pro vybrané půdní typy a kategorie land use byly laboratorně odvozeny na základě měření a odebraných půdních vzorků v 15 vybraných lokalitách.

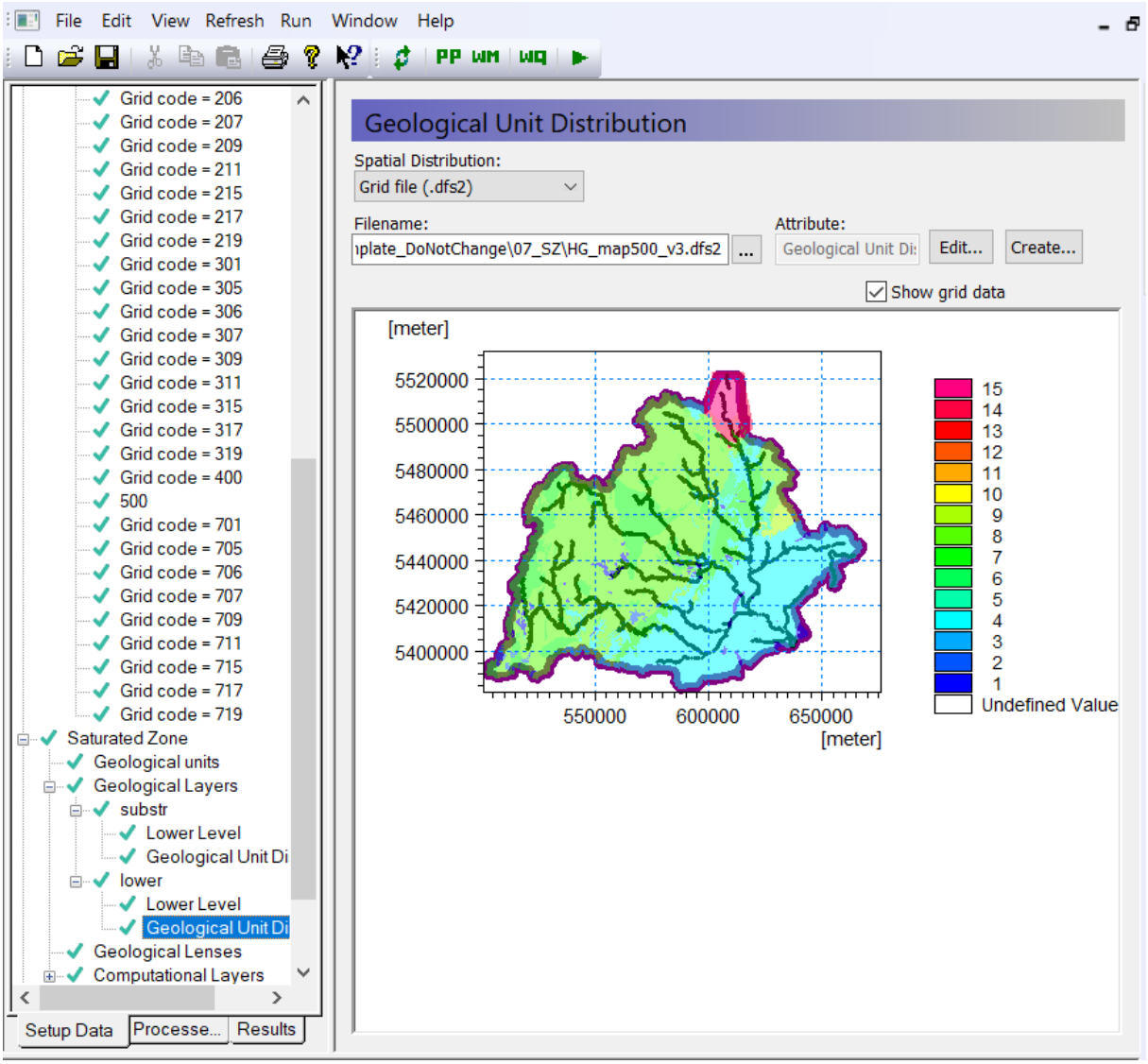


Obr. 10 Distribuce popisu půdních profilů. Půdy byly agregovány do 34 tříd vymezených identifikátorem "Grid code".

Dále se pro každou třídu definoval podíl vody, která je rychle odváděna k hladině podzemní vody systémem makropórů. Tato hodnota vyšla ze zrnitostního složení daného půdního profilu. Simulované proudění vody v nesaturované zóně má 1D charakter a pouze vertikální směr. Voda je touto zónou převáděna do zóny saturované a ovlivňuje tak výšku hladiny podzemní vody. Směr proudění je oboustranný, to znamená, že voda může vzlínat ze saturované zóny kapilárním zdvihem do nesaturovaného profilu a tím ho sytit. Do vodního toku se z tohoto modulu však přímo žádná voda nedostává.

Jak již bylo popsáno, modul nesaturované zóny je úzce spjatý s modulem zóny saturované. Hranice mezi nimi je proměnlivá a definuje hladinu podzemní vody (hodnota tlakové výšky je rovna nule). Hlavními parametry saturované zóny je transmisivita zadaná pomocí hloubky zvodně (plošně distribuovaná) a hydraulická vodivost ve vertikálním a horizontálním směru (plošně distribuovaná). Byly vymezeny 2 vertikální zóny – substrát, který reprezentuje půdní profil (Obr.

10) a podloží, které reprezentuje hydrogeologické struktury (Obr. 11) pod půdním horizontem. Mocnost jednotlivých vrstev je prostorově distribuovaná na základě místně specifických podmínek.



Obr. 11 Příklad distribuce hydrogeologických parametrů. Jednotlivé třídy (1-15) zahrnuly horniny se stejnými parametry popisu podloží.

Odtok ze saturované zóny je odváděn přímo do napojeného vodního toku, a to dvěma způsoby. Největší podíl odtoku připadá na hypodermický odtok („*Saturated Drainage*“), který je realizován v oblasti s mělkou hladinou podzemní vody a reprezentuje mělký, relativně rychlý podpovrchový odtok, který přispívá do odtokového hydrogramu jednotlivých srážkoodtokových epizod. Na tento typ odtoku připadá v měřítku celého povodí cca 46 % odtoku ve vodních tocích povodí řeky Dyje (model referenčního stavu 1981–2010). Hodnota je však místně proměnlivá a závisí na specifických podmínkách dané lokality. Druhou cestou proudění je oboustranná komunikace

vodního toku se saturovanou zónou, která v modelu reprezentuje základní odtok, průchod vody přes stěny koryta vodního toku. V tomto měřítku modelu (500 × 500 m) však nebylo možné reálně simulovat veškerý základní odtok, protože rozdíl mezi popisem koryta a hrubým popisem terénu je příliš velký. Na tento typ odtoku připadá v měřítku celého povodí cca 9 % objemu odtoku.

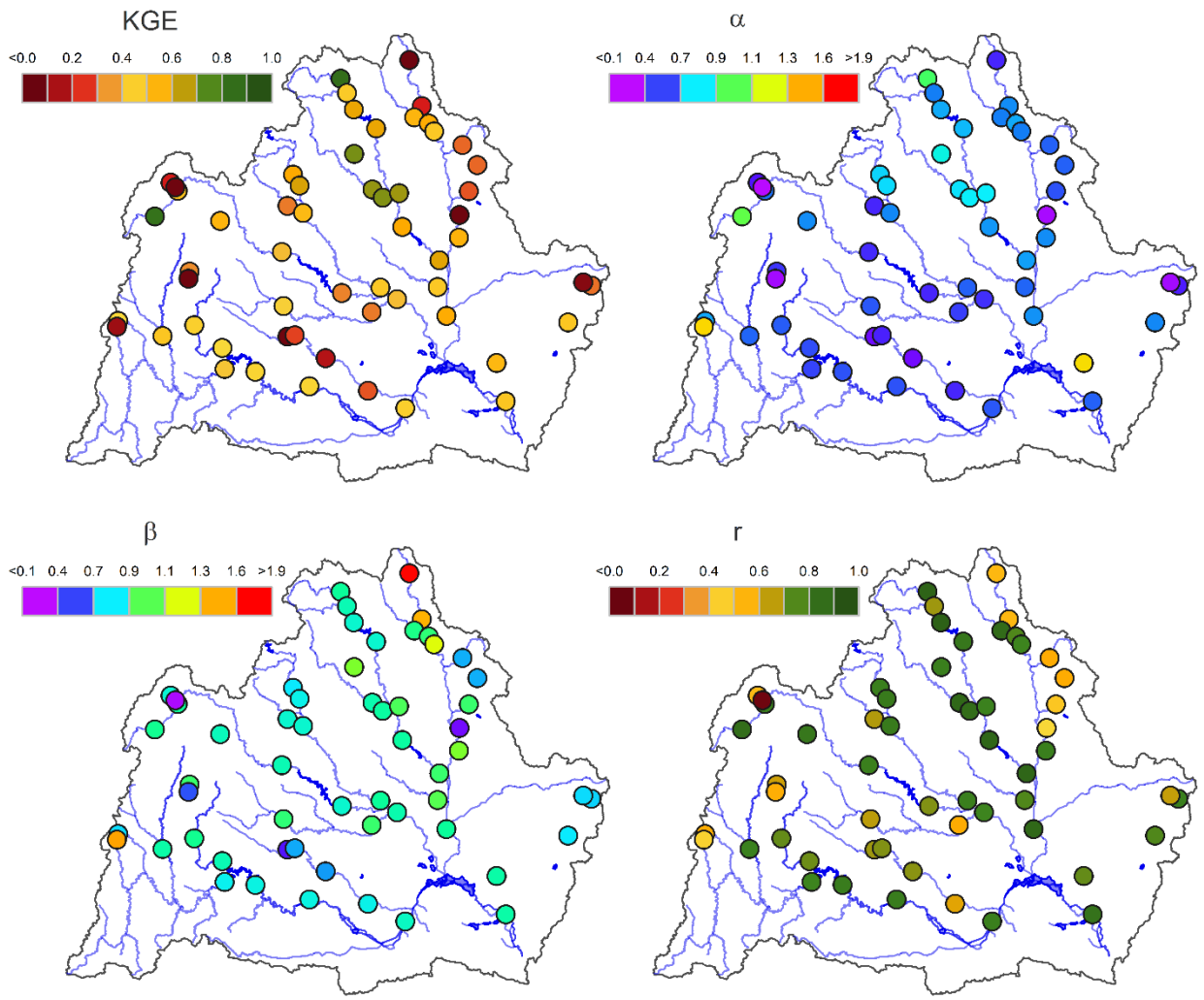
Sestavený model byl nejprve detailně prověřen z hlediska stability a robustnosti numerického řešení a hodnoty residuálního zbytku (výsledku iterací propojení jednotlivých modulů) a dále byl parametrizován v procesu kalibrace na pozorovaných časových řadách průtoků, hladin nádrží a hladin podzemní vody. Datová sada použitá pro kalibraci modelu byla vymezena obdobím 1.11.1999–31.10.2010.

K validaci podle principu „*cross-validation*“ byla použita odlišná datová sada, než na které byl model kalibrován, vymezena následujícím obdobím 1.11.2010–31.10.2020. Toto období zahrnuje extrémní sucho 2015–2018 a tak byl model prověřen i na zcela unikátních hydrologických podmínkách, které jsou svým charakterem reprezentativní pro řadu klimatických projekcí. Obecně se k validaci HM používá sada metrik, která vyhodnocuje kvalitu simulací na základě porovnání s měřenými daty. Tato tzv. “kalibrační/validační kritéria” jsou založena na statistickém vyhodnocení blízkosti časových řad, indexů nebo statistik mezi simulovanými a měřenými daty. Jedním z kritérií, které se v hydrologii často používá, je „*Kling–Gupta Efficiency*“ (KGE) a bylo použito i k vyhodnocení modelu v případové studii. Jedná se o kompozitní metriku výkonnosti; KGE je lineární kombinací tři komponent, z nichž každá sleduje odlišnou charakteristiku míry shody. Tato metrika je alternativou k *Nash–Sutcliffe* efektivitě (NSE), která je rovněž často používána k hodnocení modelů vodních toků. KGE je definován jako

$$KGE = \sqrt{a(\alpha - 1)^2 + b(\beta - 1)^2 + c(r - 1)^2},$$

kde první člen poměřuje shodu ve variabilitě obou řad, druhý člen poměrem průměrných hodnot posuzuje systematickou chybu a poslední člen r - Pearsonův korelační koeficient, shodu v časové odezvě. Parametry a, b, c jsou pak váhy jednotlivých členů v rovnici. Ideální hodnota KGE je 1 (stejně jako u NSE), což značí dokonalou shodu mezi modelovanými a pozorovanými daty. Hodnoty menší než 1 ukazují horší shodu, kde hodnoty pod 0 obvykle značí model zcela nepřijatelné přesnosti.

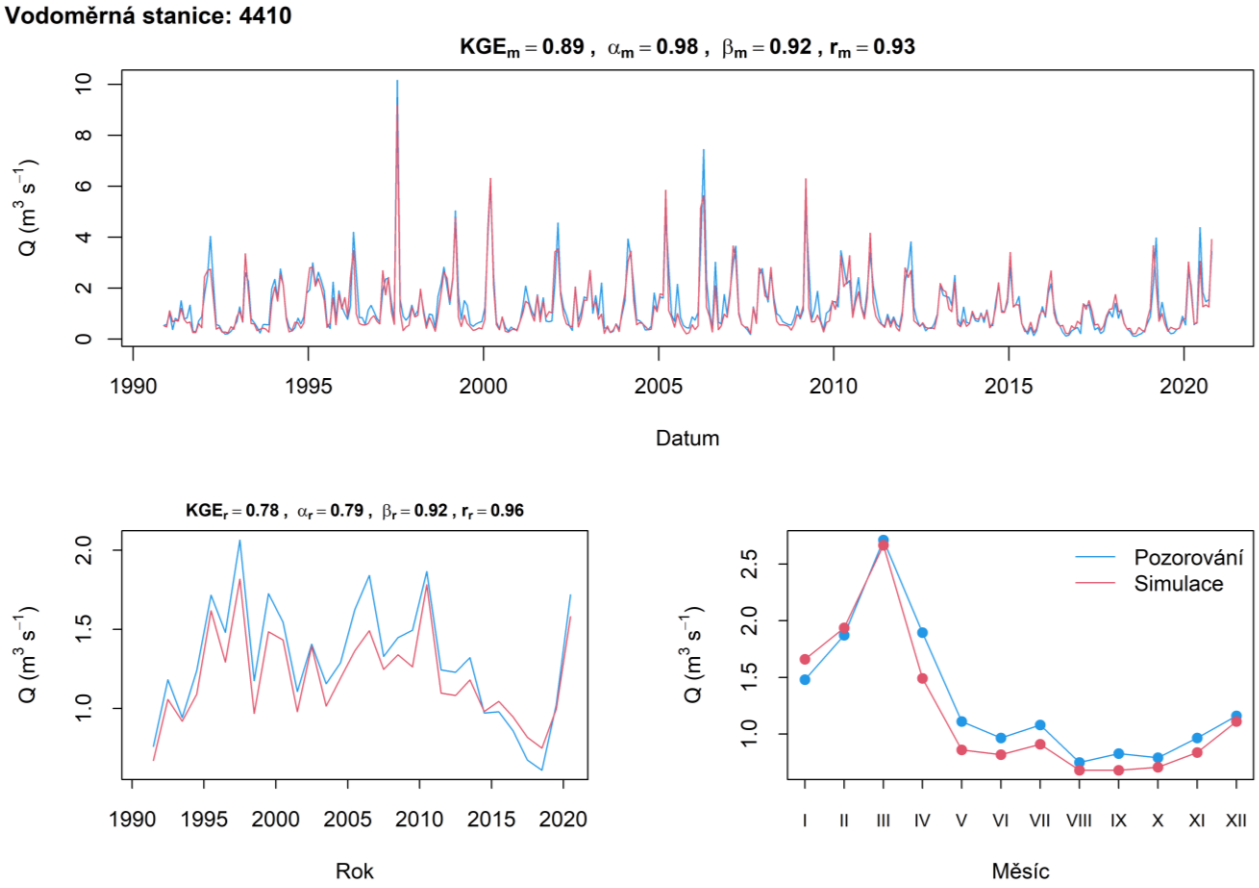
Z analýzy KGE napříč povodím (*Obr.* 12) je patrné, že na většině vodoměrných stanic je potenciál ke zlepšení v rámci budoucích kalibrací a integrace nových datových zdrojů. Nejslabší výkonost modelu lze spatřovat v podhodnocení variability (α) oproti pozorovaným datům. Jeden z důvodů podhodnocení variability lze spatřovat ve skutečnosti, že data o odběrech a vypouštěních jsou momentálně dostupná pouze v měsíčním kroku a je potřeba je distribuovat do denního kroku, aby mohla být do modelu zavedena adekvátně ostatním časovým řadám.



Obr. 12 Ukázka kvality simulovaných průtoků na vodoměrných stanicích ČHMÚ v povodí řeky Dyje. Souhrnným ukazatelem kvality shody je Kling–Gupta efektivita (KGE) nabývající v ideálním případě hodnoty 1. Parametr α hodnotí shodu ve variabilitě, β systematickou chybu a r shodu v časové odezvě.

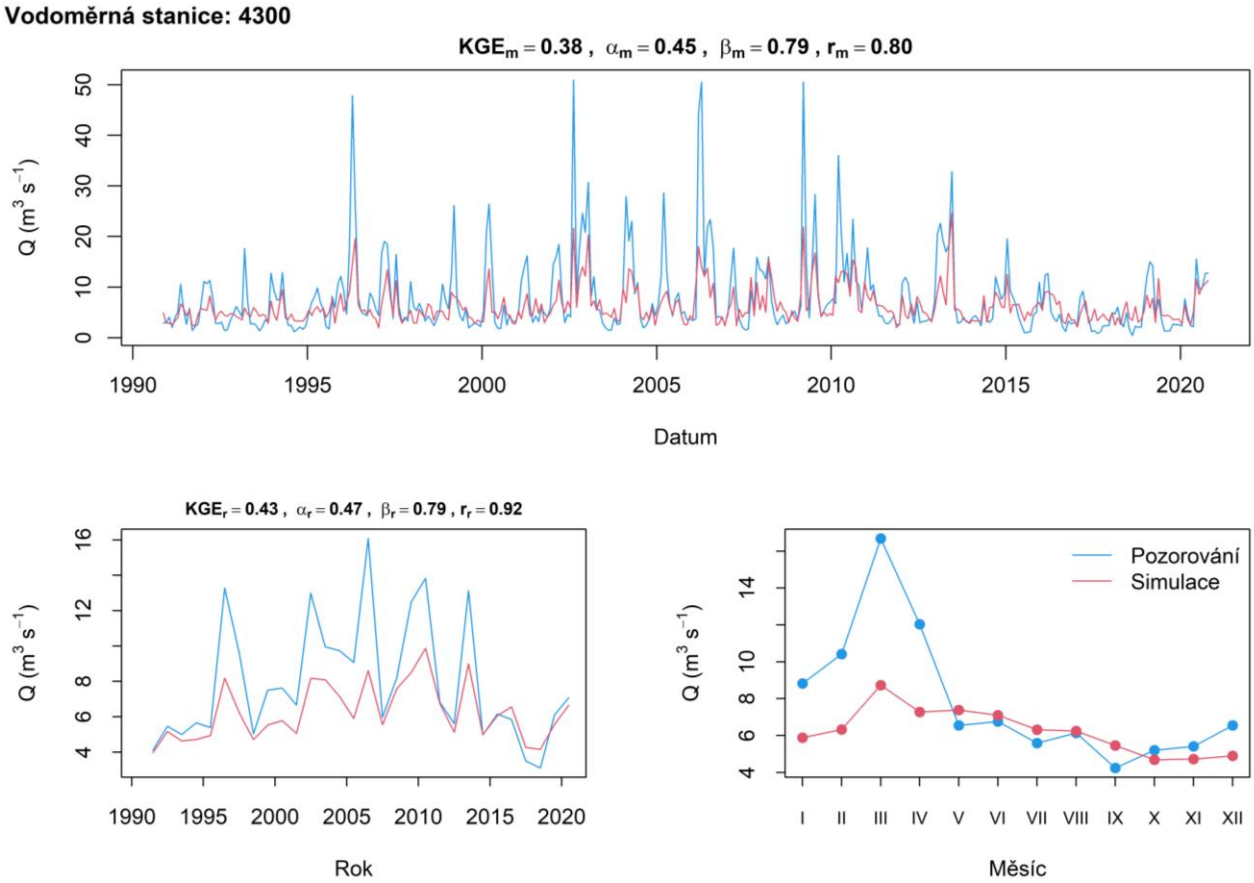
Výběr stanic pro kalibraci HM modelu byl proveden na základě kompletnosti měřených dat, délky měření a pokryvnosti území. Jako objektivní kritérium úspěšnosti modelu bylo využito statistického vyhodnocení KGE, RMSE, korelační koeficient a případně další relevantní ukazatele (Willmott, 1982). Vedle průtoků byly porovnávány hladiny podzemních vod ve vybraných vrtech a evapotranspirace pomocí metod DPZ v prostorovém rozlišení 500 m.

Mimo celkový pohled na míru spolehlivosti simulovaných průtoků (*Obr.* 12) bylo vhodné analyzovat konkrétní lokality. Mezi vodoměrné stanice s nejvyšší mírou shody mezi modelovanými a pozorovanými průtoky se řadí lokalita Borovnice, profil 4410, řeka Svratka (*Obr.* 13). Hodnoty KGE 0,89 pro měsíční hodnoty indikují, že v dané oblasti je možné model využít pro další testování adaptačních opatření.



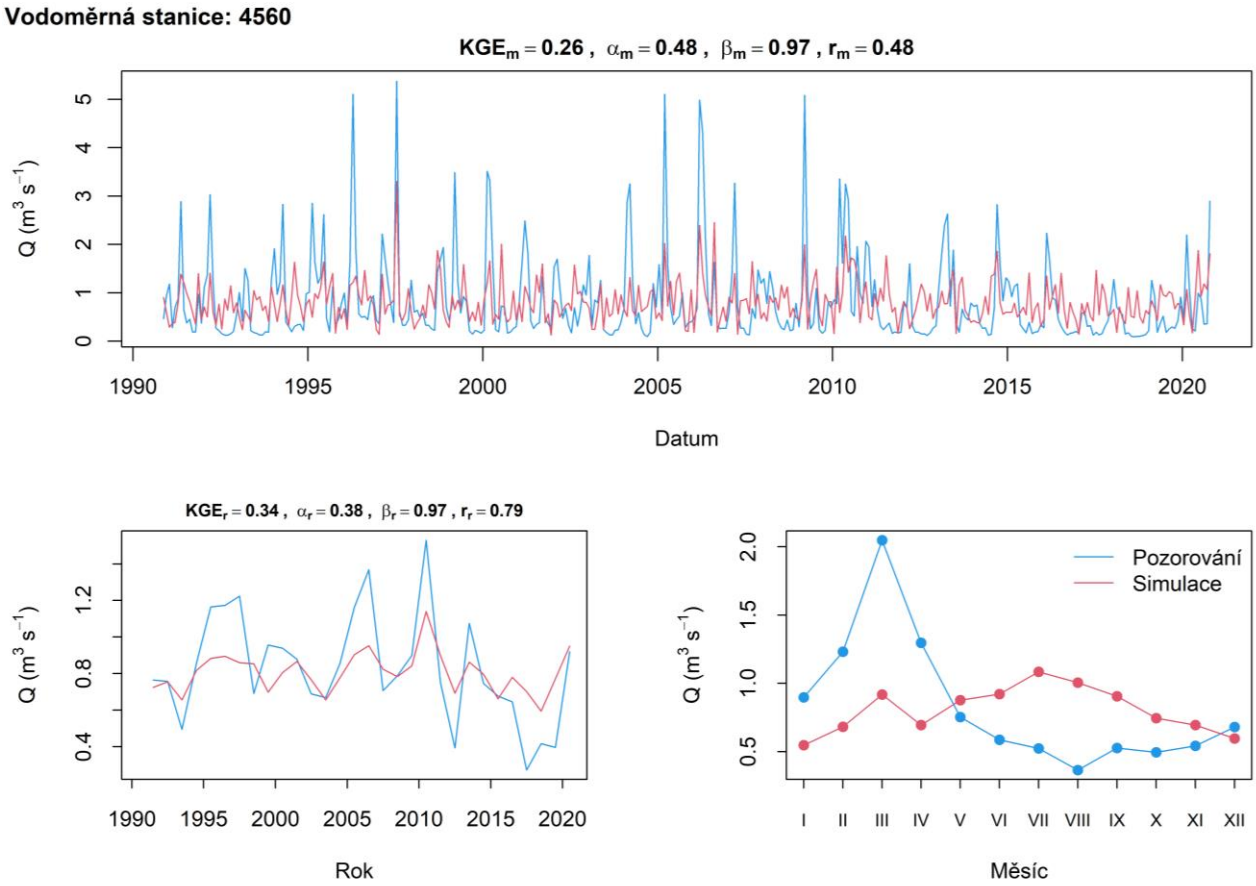
Obr. 13 *Ukázka velmi dobré shody mezi modelovaným a simulovaným průtokem na vodoměrné stanici Borovnice na horním toku řeky Svratky. Souhrnným ukazatelem kvality shody je Kling–Gupta efektivita (KGE) nabývající v ideálním případě hodnoty 1. Parametr* α *hodnotí shodu ve variabilitě,* β *systematickou chybu a* r *shodu v časové odezvě.*

Průměrné hodnoty KGE napříč všemi stanicemi se pohybovaly okolo 0,4. Střední hodnotu spolehlivosti reprezentuje např. lokalita Podhradí nad Dyjí, profil 4300, řeka Dyje (*Obr.* 14). Tato míra shody již není bez dalších zásahů vhodná pro testování adaptačních opatření a detailní analýzy vodohospodářské bilance, nicméně model je stále vhodný pro testování klimatických scénářů a posouzení relativních změn.



Obr. 14 *Ukázka průměrné shody mezi modelovaným a simulovaným průtokem na vodoměrné stanici Podhradí nad Dyjí, řeka Dyje. Souhrnným ukazatelem kvality shody je Kling–Gupta efektivita (KGE) nabývající v ideálním případě hodnoty 1. Parametr* α *hodnotí shodu ve variabilitě,* β *systematickou chybu a* r *shodu v časové odezvě.*

Hodnoty KGE pod 0,3 lze považovat jako nedostačující a vyžadující další šetření či rekalibraci. Jako příklad lze uvést např. lokalitu Skalní Mlýn, řeka Punkva, profil 4530 (*Obr.* 15). Za povšimnutí stojí poměrně nízký simulovaný průtok. Podle zkušeností z případové studie jsou toky s průměrným průtokem pod 1 m^3 s^{-1} obecněji hůře kalibrovatelné. Za zmínku stojí i relativní složitost lokality Skalní Mlýn a ponorné řeky Punkvy.

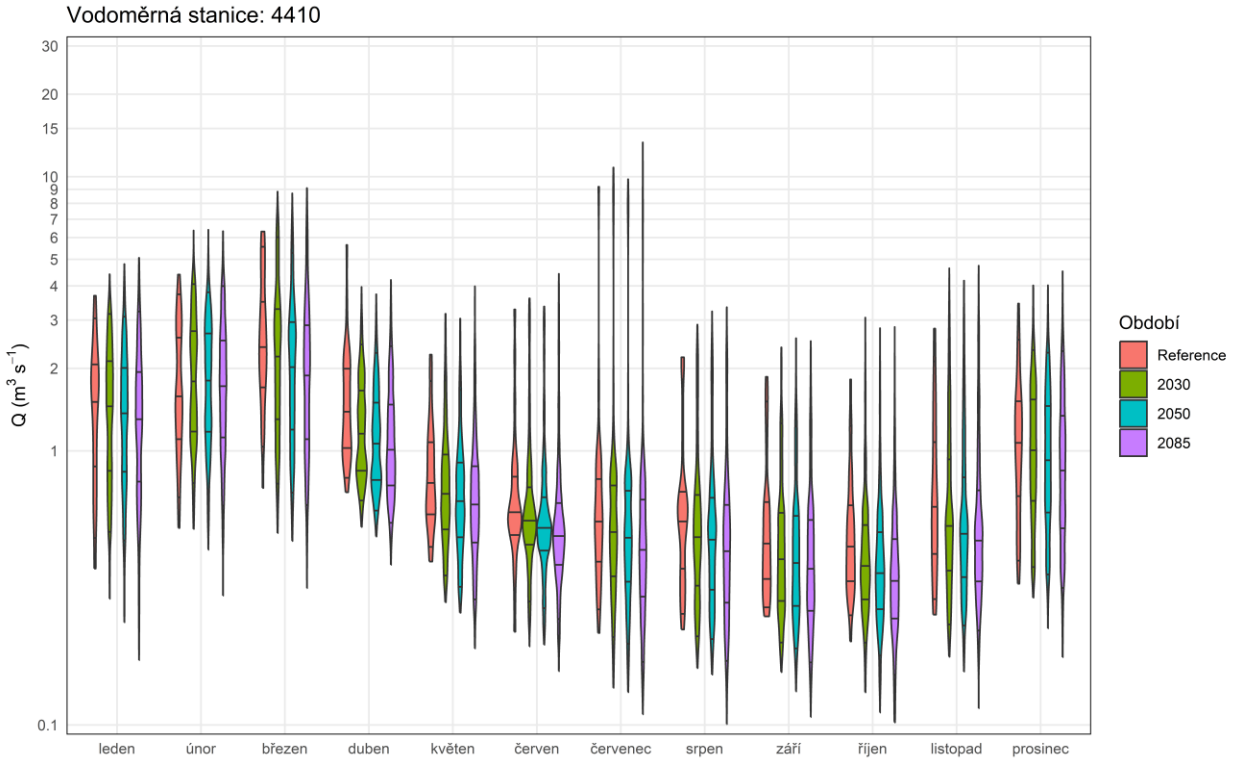


Obr. 15 *Ukázka nedostatečná úspěšnosti kalibrace na vodoměrné stanici Skalní Mlýn, řeka Punkva. Souhrnným ukazatelem kvality shody je Kling–Gupta efektivita (KGE) nabývající v ideálním případě hodnoty 1. Parametr* α *hodnotí shodu ve variabilitě,* β *systematickou chybu a* r *shodu v časové odezvě.*

Vedle samotných nedostatků parametrizace mohly hrát roli i vyšší relativní chyby v měření, ale i takové detaily jako např. vysoká transpirace pobřežních porostů, kterou nelze v modelu o prostorovém rozlišení v řádu stovek metrů zohlednit. Mezi další zdroje nejistot a odchylek patří rovněž měsíční krok odběrů a vypouštění a zároveň neregistrované odběry a vypouštění vod (závlahy zahrádek atd.). V případě přítomnosti vodních nádrží pak velkou roli hrají mimořádné manipulace.

2.6 Posouzení dopadů klimatické změny na vodní bilanci povodí

Zkalibrovaný HM lze aplikovat na posouzení vlivu klimatické změny na vodní bilanci. V rámci případové studie bylo připraveno celkem 26 klimatických scénářů (7 klimatických modelů a 4 SSP, přičemž některé klimatické modely nebyly dostupné pro všechny SSP) pro celkem čtyři 30leté periody 2030, 2050, 2070 a 2085 představené v sekci B). Celkem se tedy jedná až o 104 simulací pro scénář s referenčním natavením parametrů a dalších okrajových podmínek (např. land use, manipulační řád atd.). Z důvodu vysokého počtu simulací bylo nutné proces jejich správy, stejně jako i jejich přípravy, automatizovat prostřednictvím vlastních skriptů v programovacím jazyku R (R Core Team, 2023). Obdobná strategie byla aplikovaná pro zpracování následných výstupů, které z pohledu objemu dat dosahovaly desítek TB. I když sestavený model umožňuje tvorbu velkého množství různých výstupů, v rámci předkládané metodiky a této případové studie byly analyzovány primárně časové série průtoků a hladin, respektive objemů vodních nádrží.

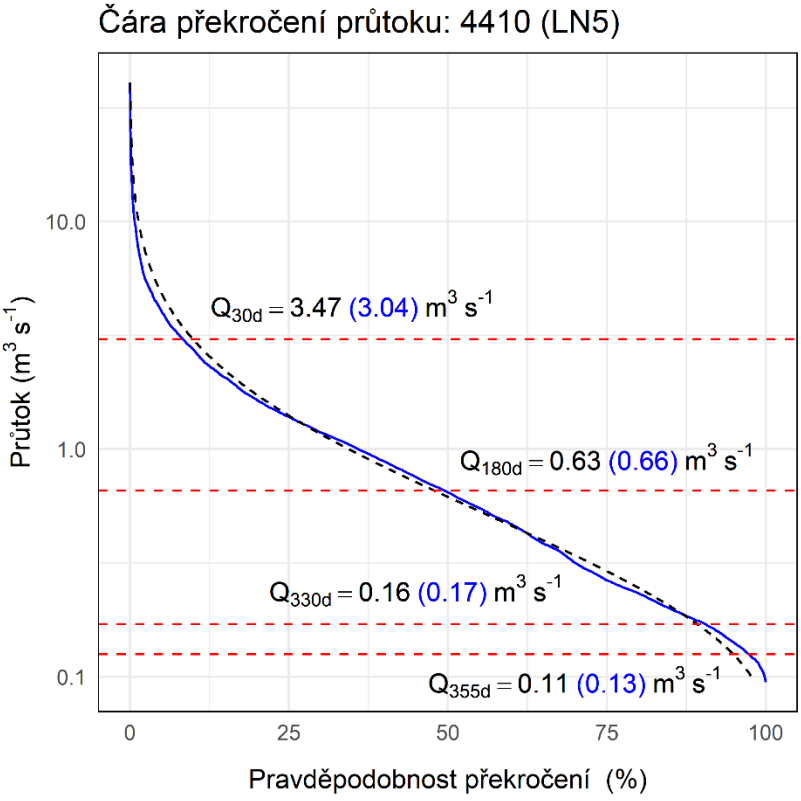


Obr. 16 Distribuce průměrných měsíčních průtoků na vodoměrné stanici 4410 – Borovnice pro referenční období 1981–2010 a sadu klimatických scénářů pro 30leté období okolo roků 2030, 2050 a 2085. Jednotlivé úsečky reprezentují 10, 25, 50, 75 a 90% kvantily.

Typickým dopadem změny klimatu na průtoky v povodí řeky Dyje je zvýšená variabilita. Např. na vodoměrné stanici Svratka – Borovnice lze napříč klimatickými scénáři pozorovat nižší průměrné průtoky a minimální průtoky, ale paradoxně i vyšší maximální průtoky (Obr. 16). To je obecně spojeno s charakterem klimatické změny, která se v našich podmínkách bude pravděpodobně manifestovat častějšími obdobími sucha, ale i obdobími s intenzivnějšími srážkami a vyššími vodními stavy v tocích. Za povšimnutí stojí vyšší průtoky v měsíci únor spojené buď s dřívějším táním sněhu či jeho absencí. Pokud se nebude voda ze zimních srážek (které budou v budoucnu

spíše dešťové) akumulovat do sněhu, lze logicky předpokládat, že v zimě, kdy je zpravidla půdní profil dobře nasycen, se většina srážek bude transformovat do odtoku. Počínaje březnem lze pozorovat nižší jarní průtoky. Nejvyšší variabilitu pak vykazuje měsíc červenec, kdy lze pozorovat jak nejnižší, tak nejvyšší možné simulované průtoky.

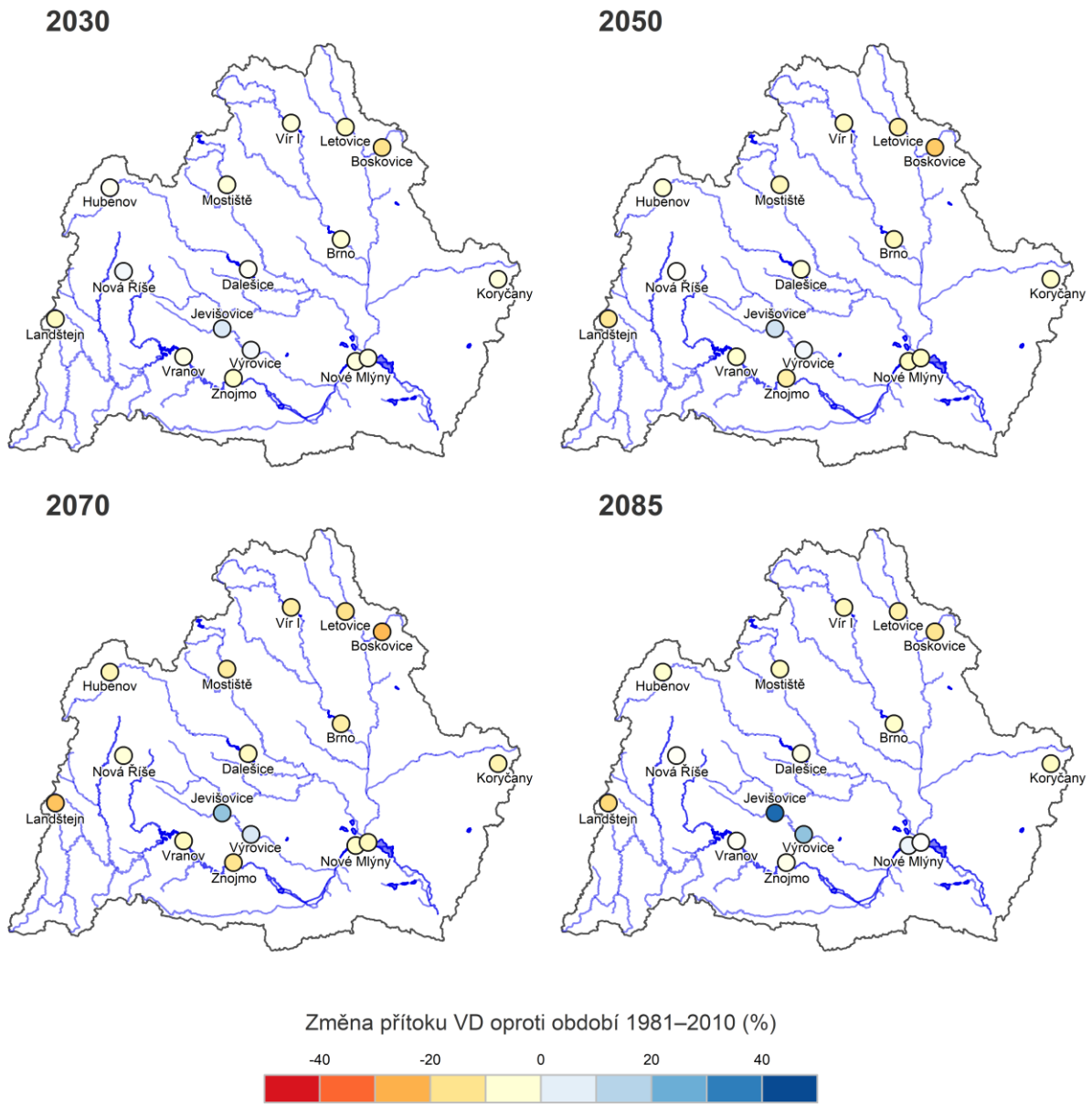
Pro další posouzení dopadů klimatické změny na vodní bilanci byly analyzovány přítoky vybraných vodních nádrží. Tato analýza byla zaměřena na hodnocení vybraných M-denních průtoků a zejména pak jejich relativních změn oproti referenčnímu období. Výběr M-denních průtoků původně zahrnoval Q30d, Q180d, Q330d a Q355d. Avšak vzhledem k tomu, že nejnižší průtoky Q355d jsou zatížené největší relativní chybou (simulované i měřené), byl nakonec tento ukazatel z analýz vyřazen. Pro stanovení M-denních průtoků byl využit přímočarý empirický přístup namísto prokládání teoretickou křivkou. Ukázka rozdílu M-denních průtoků stanovených empiricky a proložených pětiparametrickou log-normální funkcí je na Obr. 17.



Obr. 17 Ukázka stanovení M-denních průtoků pro vodoměrnou stanici 4410 – Borovnice na řece Svratka ze simulovaných dat pro období 1981–2010. Černá čísla reprezentují M-denní průtoky určené proložením křivkou pěti-parametrického log-normálního rozdělení (LN5), modrá čísla v závorce jsou určena empiricky. Pro indikativní srovnání, dle oficiálních veřejně dostupných dat ČHMÚ pro období 1991–2020 jsou M-denní průtoky pro vybrané pravděpodobnosti následující: Q_{30d}=3.00 $m^3 s^{-1}$, Q_{180d}=0.810 $m^3 s^{-1}$, Q_{330d}=0.29 $m^3 s^{-1}$, Q_{355d}=0.17 $m^3 s^{-1}$.

Změny M-denních průtoků Q30d v simulacích klimatického vývoje oproti referenčnímu stavu 1981–2010 vykazují pokles přítoku vodních nádrží do 10 %, přičemž v poslední třicetileté periodě je u některých vodních nádrží (Jevišovice a Výrovice) pozorován naopak nárůst (*Obr.* 18). Nutno

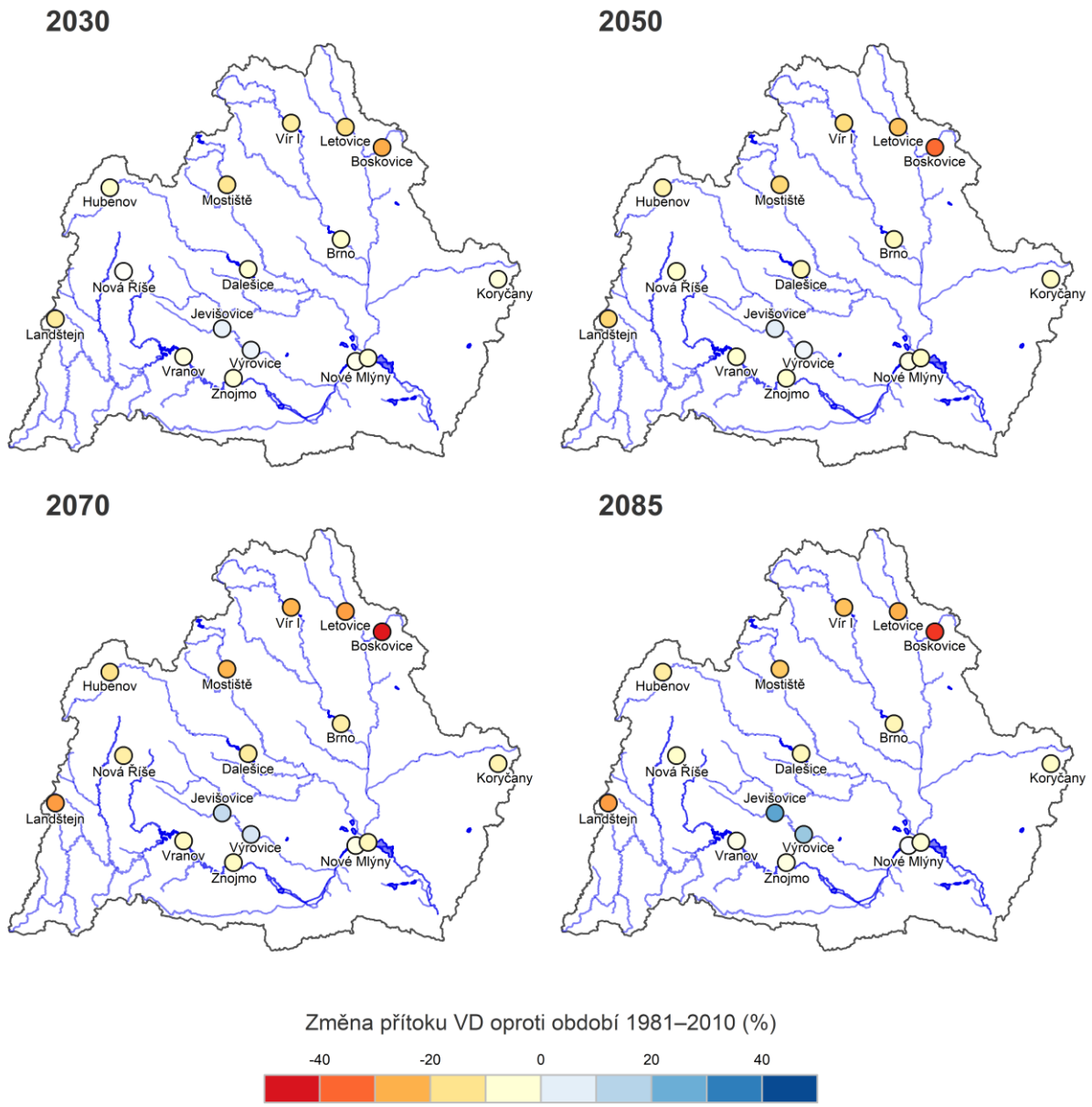
podoktnout, že Jevišovice představují z hlediska zásobního objemu nejmenší z analyzovaných vodních nádrží.



Obr. 18 *Změny M-denního průtoku Q30d oproti referenčnímu období 1981–2010 pro střední klimatický scénář (medián ze všech simulací) během různých třicetiletých period pro vybrané vodní nádrže v povodí řeky Dyje. Záporné hodnoty indikují snížení přítoku do VD, kladné hodnot naopak zvýšení.*

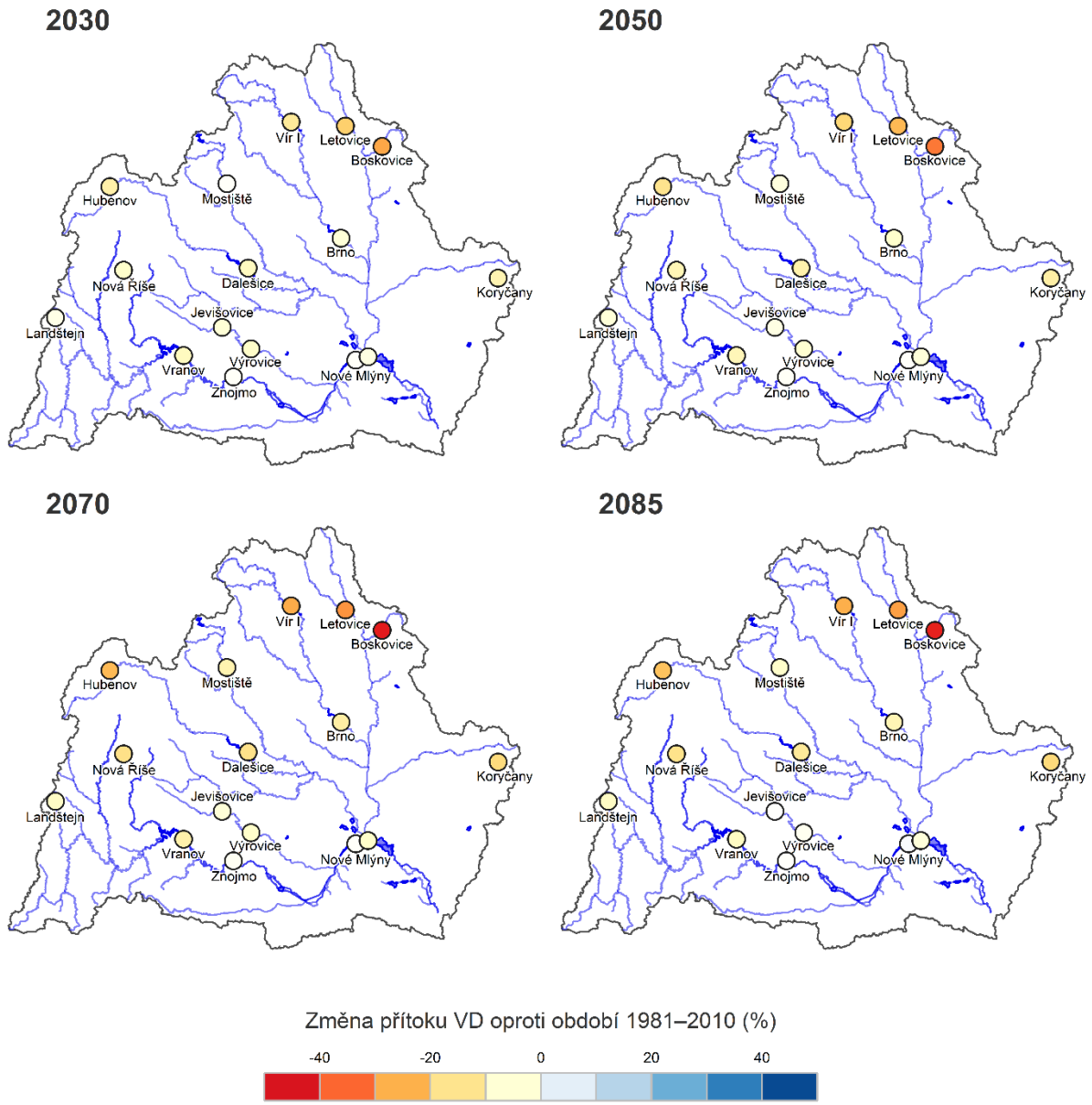
U hodnot Q180d jsou poklesy poněkud výraznější a dosahují 30 až 40 % (Obr. 19). Nejvyšší poklesy lze pozorovat u vodní nádrže Boskovice. Za zmínku stojí rovněž strategicky důležitý vodní zdroj Vír I, kde lze pozorovat poklesy až okolo 20–30 % ve druhé polovině 21. století. U dříve

zmíněných vodních nádrží Jevišovice a Výrovice je opět pozorován nárust přítoků, který je ale v tomto případě nižší než u Q30d.



Obr. 19 *Změny M-denního průtoku Q180d oproti referenčnímu období 1981–2010 pro střední klimatický scénář (medián ze všech simulací) během různých třicetiletých period pro vybrané vodní nádrže v povodí řeky Dyje. Záporné hodnoty indikují snížení přítoku do VD, kladné hodnot naopak zvýšení.*

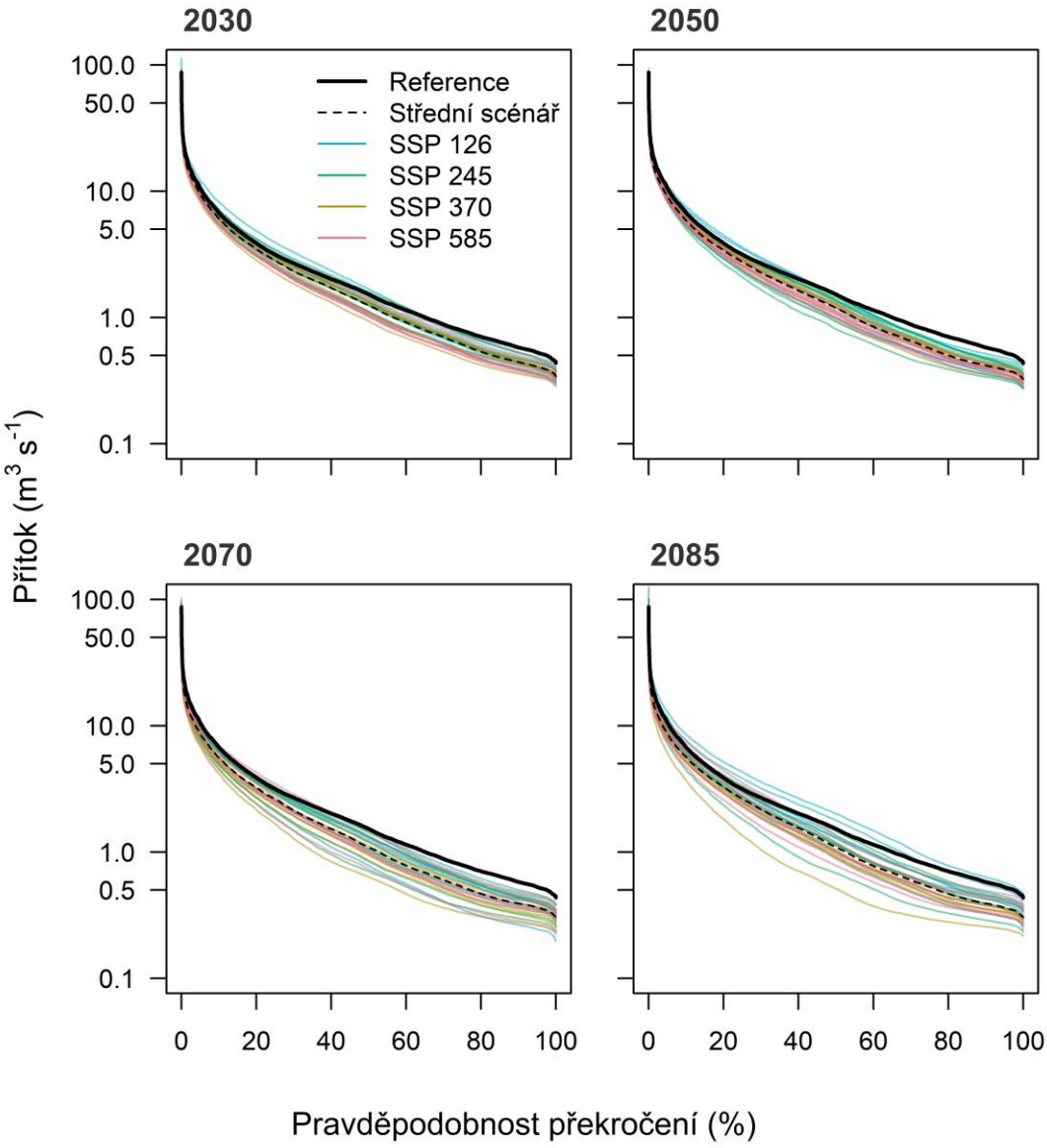
U hodnot Q330d je prognóza ještě poněkud horší a poklesy přítoků v jednotkách až desítkách procent lze pozorovat na všech zkoumaných vodních nádržích (*Obr.* 20).



Obr. 20 *Změny M-denního průtoku Q330d oproti referenčnímu období 1981–2010 pro střední klimatický scénář (medián ze všech simulací) během různých třicetiletých period pro vybrané vodní nádrže v povodí řeky Dyje. Záporné hodnoty indikují snížení přítoku do VD, kladné hodnot naopak zvýšení.*

Nutno zdůraznit, že výstupy prezentované v předchozích třech mapových výstupech (Obr. 18, Obr. 19 a Obr. 20) reprezentovaly medián ze simulací pro všech 26 kombinací klimatických modelů a SSP. Pokud se podíváme na čáry překročení pro simulace reprezentující jednotlivé klimatické scénáře na příkladu vodní nádrže Vír I (Obr. 21), lze konstatovat následující: (i) všechny scénáře vykazují nižší přítoky oproti referenční simulaci; (ii) rozdíly mezi scénáři se

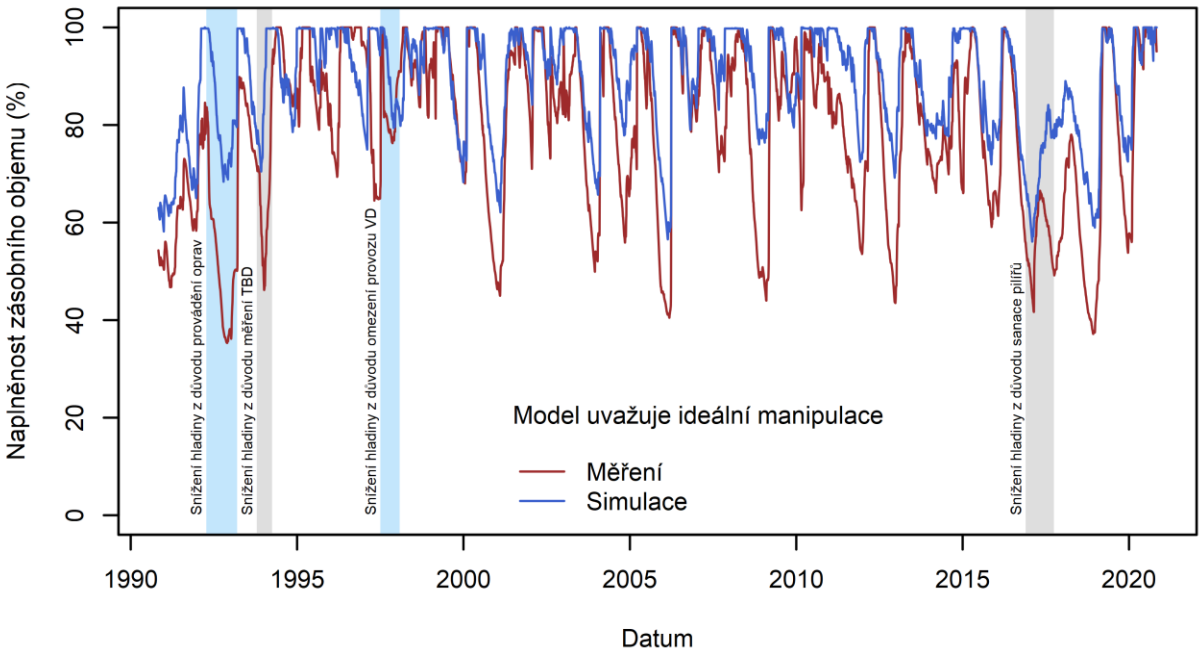
mohou lišit poměrně výrazně a s uvážením skutečnosti, že nejhorší scénáře nelze jednoduše vyloučit, vycházet ze středního scénáře může vést případně k optimistickým prognózám.



Obr. 21 Ukázka čar překročení pro celkový přítok vodní nádrže Vír I. Reference znázorňuje simulaci historického období 1981–2010, jednotlivé barvené linie reprezentují konkrétní klimatické modely sady CMIP6, přičemž skupiny barev scénáře socioekonomického vývoje (SSP). Přerušovaná černá linie představuje medián (střed) ze všech klimatických scénářů. Cílem není identifikovat jednotlivé scénáře, ale ukázat celkový rozptyl simulací a simulovanou nejistotu při použití středního scénáře.

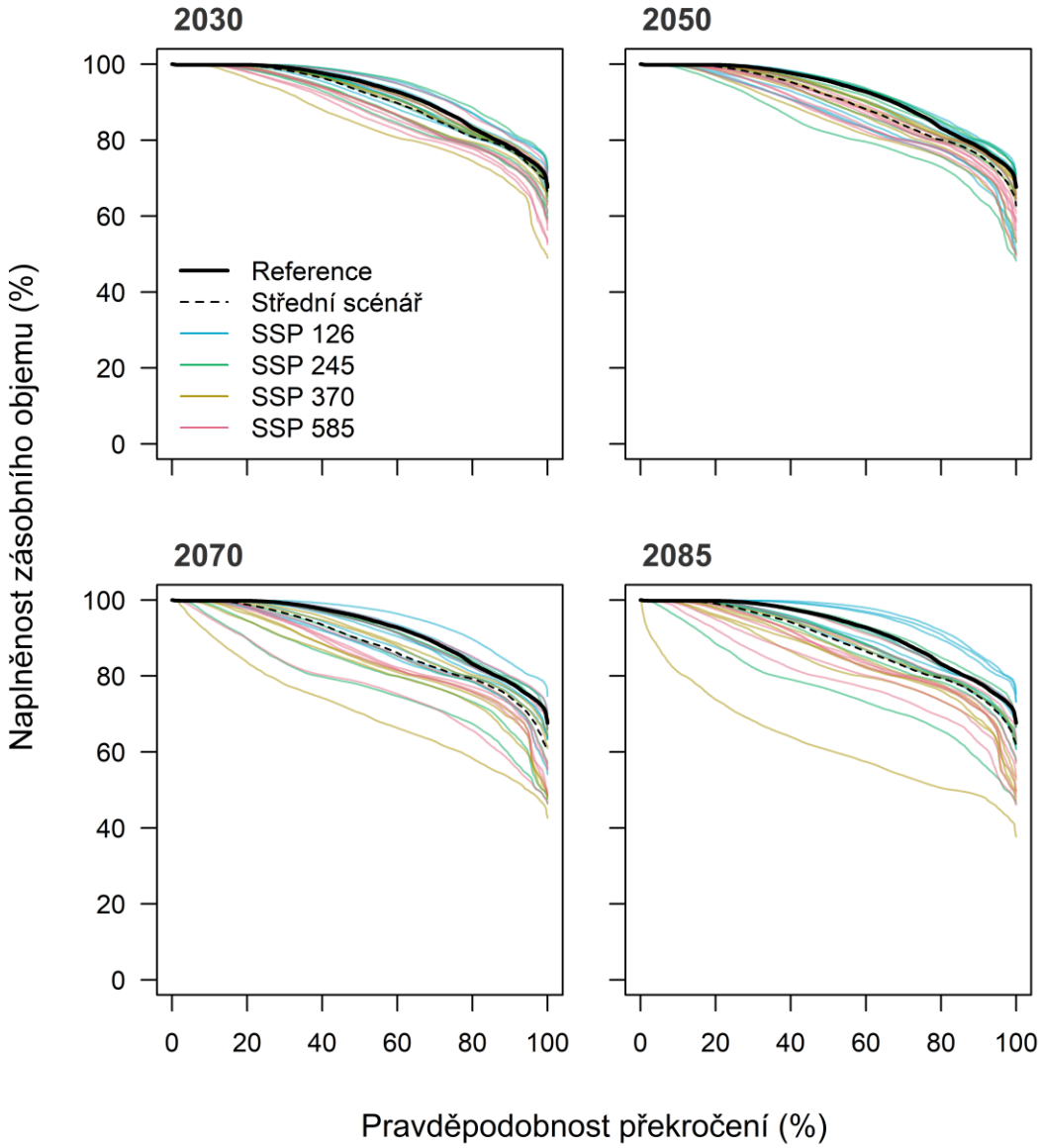
Pro posouzení samotné zajištěnosti vodního zdroje je vhodné analyzovat naplněnost vodní nádrže. Opět je jako příklad uvedena vodní nádrž Vír I. Pro přepočet výšky hladiny na objem byla využita čára zatopených objemů (zdroj PMo). Simulace naplněnosti vodní nádrže Vír I a porovnání s pozorovanými daty jsou zobrazeny na Obr. 22. I když mezi simulací a pozorováním

lze pozorovat určitý nesoulad, je nutné zmínit, že simulace vychází z nejaktuálnější verze manipulačního řádu, který je platný až od roku 2019. Tento manipulační řad byl zvolen, protože hlavním smyslem sestaveného modelu je simulovat budoucí podmínky a posoudit dopady klimatické změny. Rozdílnost manipulačních řadů je tedy jedním z důvodů neshody mezi pozorovanými a simulovanými hodnotami naplněnosti. Mezi další významné faktory patří rovněž mimořádné manipulace, které model nezohledňuje (kvůli nemožnosti algoritmizace), a nakonec i systematické a nesystematické chyby samotného modelu. Přesto je důležité zmínit, že simulace nevykazují jakýkoliv trend (postupné plnění či vyprazdňování) a lze je tedy považovat za obecně validní a užitečné pro další analýzy.



Obr. 22 Ukázka simulace naplněnosti zásobního objemu vodní nádrže Vír I v porovnání s měřenými daty. Svislé barvené pruhy indikují mimořádné manipulace, které model řídící se dle aktuálního manipulačního řadů (z roku 2019) nezohledňuje.

Následující Obr. 23 ukazuje čáry překročení naplněnosti zásobního objemu vodní nádrže Vír I pro jednotlivé klimatické scénáře. Vodohospodářská porucha je u této vodní nádrže stanovena jako dosažení 0% naplněnosti zásobního objemu, k čemuž nedošlo v případě žádného klimatického scénáře 21. století (při daných odběrech a následování aktuálního manipulačního řádu).



Obr. 23 Ukázka čar překročení pro naplněnost zásobního objemu vodní nádrže Vír I. Reference znázorňuje simulaci pro historické období 1981–2010, jednotlivé barvené linie reprezentují konkrétní klimatické modely sady CMIP6, přičemž skupiny barev scénáře socioekonomického vývoje (SSP). Přerušovaná černá linie představuje medián (střed) ze všech klimatických scénářů. Cílem není identifikovat jednotlivé scénáře, ale ukázat celkový rozptyl simulací a simulovanou nejistotu při použití středního scénáře.

2.7 Adaptační opatření a jejich optimalizace

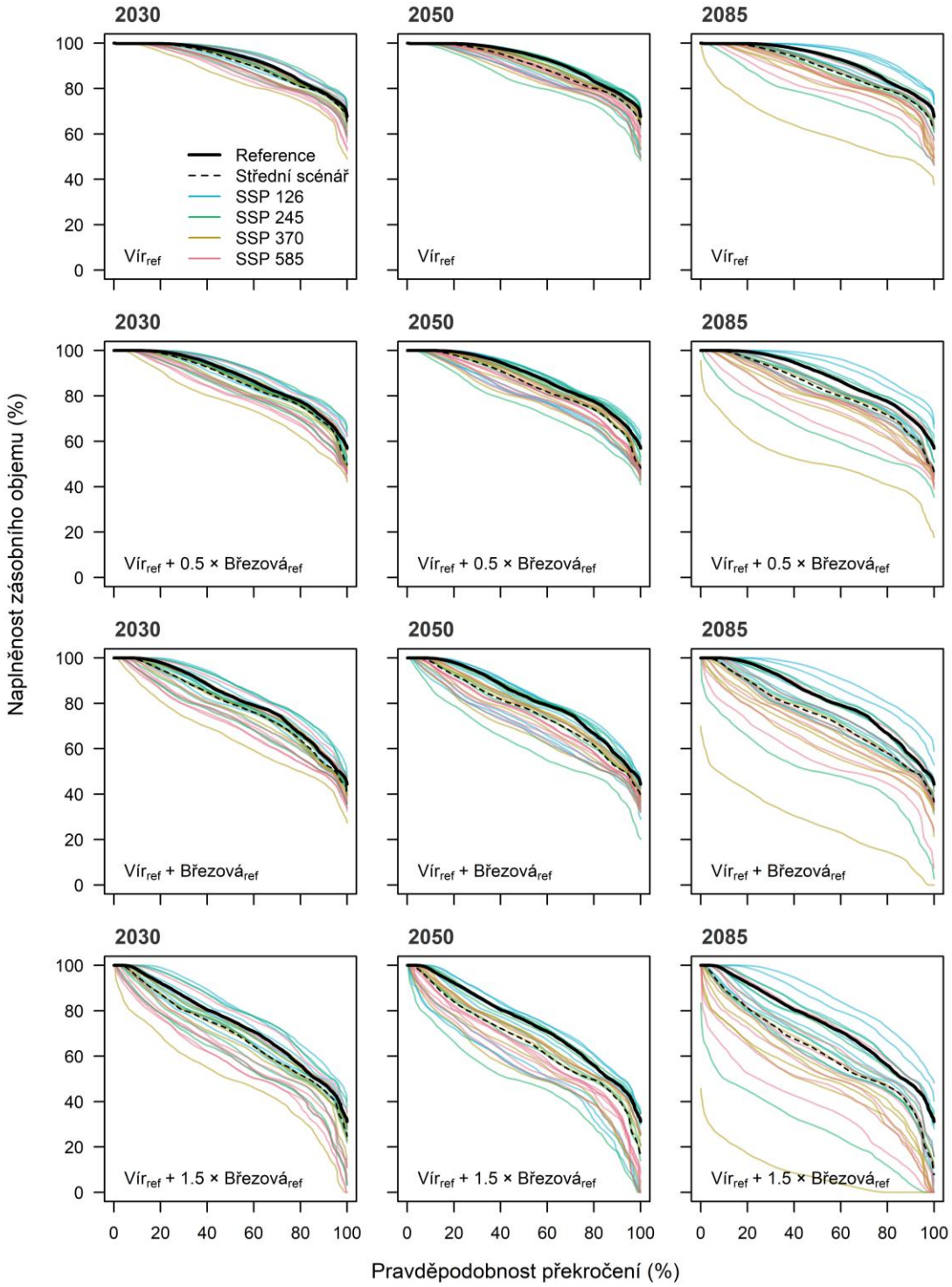
Výstavba vodní nádrže je považována za technické adaptační opatření s potenciálním dlouhodobým pozitivním vlivem na udržitelnost vodních zdrojů v daném regionu. Přestože realizace takového projektu vyžaduje rozsáhlé investice a promyšlené plánování, může zabezpečit stabilní zásobování vodou na mnoho desetiletí. To pomáhá zajistit vodní potřeby pro budoucí generace a řeší problémy spojené s klimatickými změnami a růstem populace. Pro hodnocení dlouhodobé spolehlivosti zamýšleného vodního zdroje, zejména v kontextu klimatických změn, je nezbytné aplikovat HM vodní bilance a hodnotit potenciální změny v přítocích. Důležité je také zohlednit možné změny v odběrech vody, které mohou být spojeny s demografickými trendy, rozvojem průmyslu, technickým pokrokem či změnami v krajině, jako jsou zemědělské a lesnické aktivity. Podle rozsahu a komplexnosti očekávaných změn je vhodné vybrat odpovídající typ HM. Tento model by měl také umožnit provedení citlivostní analýzy, aby bylo možné vyhodnotit odolnost existujícího nebo plánovaného vodního zdroje vůči předpokládaným podmínkám.

V návaznosti na analýzy dopadů klimatické změny na zajištěnost VD Vír I (Obr. 23) byla posouzena naplněnost vodní nádrže Vír I pro čtyři různé (hypotetické) scénáře odběrů (*Obr.* 24). Pro zjednodušení byly analyzovány pouze tři budoucí periody s označením 2030, 2050 a 2085.

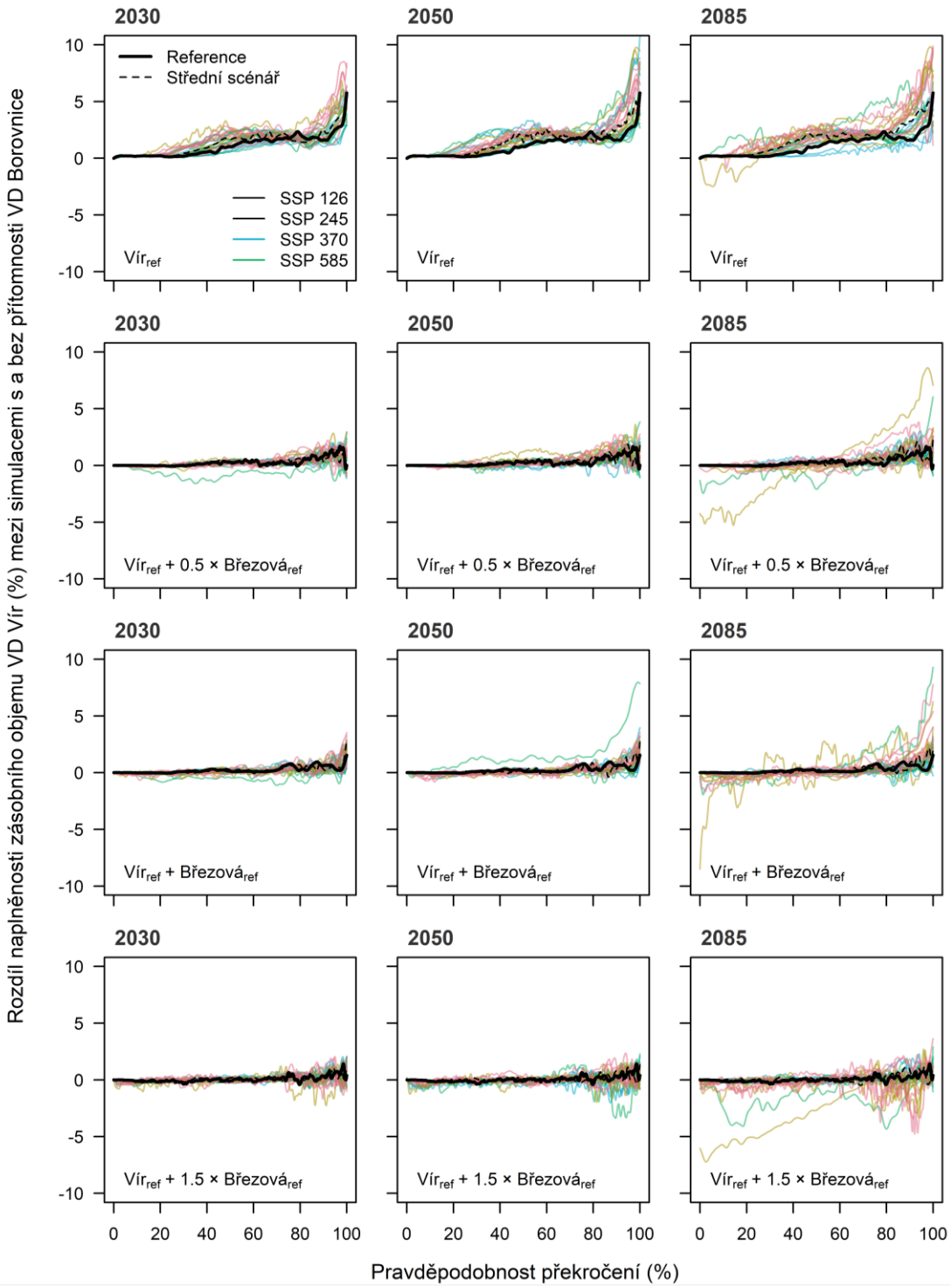
I. Scénář odpovídající horní obálce současných odběrů (je totožný s Obr. 23).
II. Hypotetický scénář předpokládající nutnost částečně šetřit podzemní zdroj Březová a převedení poloviny tohoto odběru na VD Vír I.
III. Hypotetický scénář předpokládající plné omezení odběrů z podzemního zdroje Březová a převedení plné výše tohoto odběru na VD Vír I.
IV. Hypotetický scénář předpokládající, že VD Vír musí poskytovat 150 % současných odběrů z podzemního zdroje Březová (např. nahrazení zdroje Březová a převody do dalších povodí či výrazně vyšší požadavky v budoucnosti).

Všechny tyto scénáře jsou prezentovány pro současné referenční období 1981–2010 a celou sadu 26 klimatických scénářů (*Obr.* 24). Z pohledu vodohospodářských poruch lze konstatovat, že vodní bilance VD Vír I je natolik robustní, že v případě středního klimatického scénáře by byly zajištěny všechny čtyři (hypotetické) scénáře odběrů. Nicméně, simulace rovněž ukazují, že naplněnost při plném zastoupení podzemního zdroje Březová by často klesala k 50 % a při dalším navyšování odběru až k 20 % i níže. Jak již bylo dříve zmíněno, střední scénář je statisticky nejpravděpodobnější, nicméně horší scénáře nelze vyloučit. V rámci principu předběžné opatrnosti je vhodné zohledňovat i extrémní varianty klimatických scénářů. U těch se ukazuje, že vodohospodářské poruchy by mohly na VD Vír I nastávat v budoucnu již při převedení významné či celé části odběrů z Březové.

Výstavba VD Borovnice je jedno z uvažovaných technických opatření pro zajištění minimálních zůstatkových průtoků na horním toku Svratky a k podpoře vodního zdroje VD Vír I. V návaznosti na scénáře odběrů z VD Vír I byla analýza zopakována s přítomností VD Borovnice. Návrh VD Borovnice byl koncipován dle podkladů zpracovaných odborným týmem VUT pod vedením prof. Říhy (Zpracování konceptu vodohospodářského řešení vybraných nádrží (VÚT, Brno, 2022). V navrhovaném konceptu bylo uvažováno, že minimální zůstatkový průtok VD Borovnice by byl 0.286 $m^3 s^{-1}$ a zásobní objem VD Borovnice byl navržen na 6.11 mil. m^3, což představuje necelých 14 % zásobního objemu VD Vír I (44 mil. m^3).

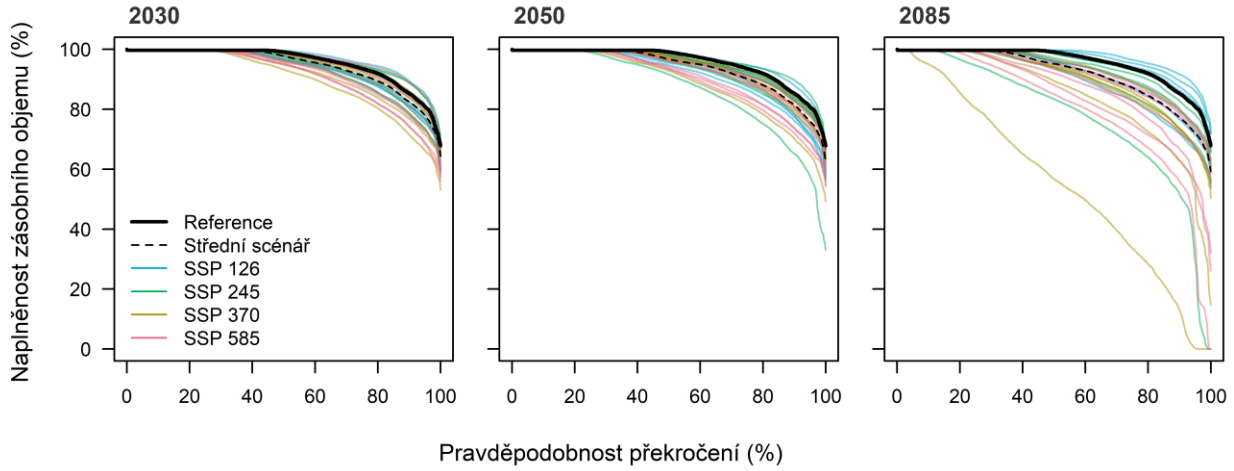


Obr. 24 Ukázka čar překročení naplněnosti zásobního objemu vodní nádrže Vír I pro různé hypotetické scénáře odběrů. Vír$_{ref}$ indikuje současné odběry z VD Vír I, zatímco Březová$_{ref}$ současné odběry z podzemního zdroje Březová nad Svitavou. Reference znázorňuje simulaci pro historické období 1981–2010, jednotlivé barvené linie reprezentují konkrétní klimatické modely sady CMIP6, přičemž skupiny barev scénáře socioekonomického vývoje (SSP). Čárkovaná černá linie představuje medián (střed) ze všech klimatických scénářů. Cílem není identifikovat jednotlivé scénáře, ale ukázat celkový rozptyl simulací a simulovanou nejistotu při použití středního scénáře.



*Obr. 25 Rozdíl v naplněnosti zásobního objemu vodní nádrže Vír I mezi scénářem s VD Borovnicí a bez VD Borovnice. Pozitivní hodnoty ukazují nadlepšení naplněnosti VD Vír I oproti stavu bez VD Borovnice (*Obr. 23*). Reference znázorňuje simulaci pro historické období 1981–2010, jednotlivé barvené linie reprezentují konkrétní klimatické modely sady CMIP6, přičemž skupiny barev scénáře socioekonomického vývoje (SSP). Čárkovaná linie představuje medián (střed) ze všech klimatických scénářů. Cílem není identifikovat jednotlivé scénáře, ale ukázat celkový rozptyl simulací a simulovanou nejistotu při použití středního scénáře.*

Provedené analýzy jasně indikují, že při současných hodnotách odběrů by VD Borovnice dokázala efektivně podporovat naplněnost VD Vír I pro většinu klimatických scénářů (*Obr.* 25). Nicméně, pro scénáře s vyššími odběry z VD Vír I by bylo zapotřebí zvýšit minimální zůstatkový průtok VD Borovnice či změnit manipulační řad a celkovou strategii této soustavy. Následující *Obr. 26* ukazuje čáry překročení pro naplněnost zásobního objemu vodní nádrže Borovnice pro jednotlivé klimatické scénáře. Jako vodohospodářská porucha je u této vodní nádrže stanoveno dosažení 0% naplněnosti zásobního objemu, k čemuž může dojít ve výjimečných případech některých scénářů v druhé polovině 21. století. *Obr. 26* dále ukazuje, že VD Borovnice dokáže zajistit vyšší minimální zůstatkový průtok, a tedy více dotovat VD Vír I v případě potřeby jako u výše nastíněných scénářů odběrů (*Obr.* 24 a *Obr.* 25).



Obr. 26 Ukázka čar překročení pro naplněnost zásobního objemu vodní nádrže Borovnice. Reference znázorňuje simulaci pro historické období 1981–2010, jednotlivé barvené linie reprezentují konkrétní klimatické modely sady CMIP6, přičemž skupiny barev scénáře socioekonomického vývoje (SSP). Přerušovaná černá linie představuje medián (střed) ze všech klimatických scénářů. Cílem není identifikovat jednotlivé scénáře, ale ukázat celkový rozptyl simulací a simulovanou nejistotu při použití středního scénáře.

2.8 Doporučení

Na základě zkušeností z řešení případové studie v povodí řeky Dyje lze konstatovat a doporučit:

- Volba hydrologického modelu (HM) je závislá na míře komplexnosti zadané úlohy a rozsahu zamýšlených změn v povodí, které je zapotřebí testovat.
  - ✓ Pro testování dopadů klimatických scénářů na hydrologické poměry lze použít celistvý HM.
  - ✓ Pro testování vodohospodářské zajištěnosti v podmínkách změny klimatu je nezbytné použít HM s integrovaným vodohospodářským modelem.
  - ✓ Pro testování dalších změn v krajině je nezbytné aplikovat distribuovaný fyzikálně založený model.
- Pro posuzování hydrologické bilance, ale i úspěšnosti jednotlivých adaptačních opatření, je zapotřebí model správně parametrizovat při zohlednění celého spektra hydrologických situací, která mohou v povodí nastat.
- Pro posouzení dopadů klimatické změny je vhodné pracovat s širším souborem klimatických modelů a analyzovat nejen střední, ale rozsáhlejší množinu scénářů, aby bylo možné nejistotu dopadu změn vyhodnotit statisticky.
- Pro komplexní řešení změn v povodích s využitím plně časoprostorově distribuovaných vstupů je zapotřebí:
  - ✓ Specializovaný tým v počtu několika pracovníků.
  - ✓ Potřebná historická data v čase a prostoru pro vybrané povodí.
  - ✓ Výstupy klimatických modelů v odpovídajícím prostorovém měřítku.
  - ✓ Představy o navrhovaných opatřeních v povodí stran vodních zdrojů.
  - ✓ Dostatečnou vybavenost z pohledu software a hardware (stovky GB RAM, vyšší desítky CPU, dostatečný úložný prostor – během řešení projektu bylo vyprodukováno přibližně 115 TB výsledných souborů).
  - ✓ Programování – možnost automatizace prací spojených s pre- a post-processingem a s celkovou správou simulací.
  - ✓ Multidisciplinarita – spolupráce napříč institucemi a týmy z různých vědních oborů.

2.9 Závěr

Z analýz realizovaných na příkladu povodí řeky Dyje, nicméně s možnou přenositelností i na mnohé další povodí v podmínkách střední Evropy, lze konstatovat následující:

- Klimatická změna charakterizovaná rostoucí teplotou vzduchu a nevýznamně se měnícími dlouhodobými průměry srážek negativně ovlivňuje hydrologické poměry v povodí, což se projevuje v oblastech nelimitovaných vodou (převážně horská povodí) zvýšením evapotranspirace a celkovým snížením průtoků.
- Vzhledem k tomu, že zhruba 50 % vodních zdrojů tvoří povrchové vody, snížené přítoky nepříznivě působí na stabilitu odběrů.
- Zvýšená evapotranspirace současně zvyšuje riziko snížení efektivní infiltrace do hlubších vrstev, což může ohrozit i podzemní vodní zdroje.
- Použití hydrologických modelů (HM) spolu s klimatickými scénáři poskytuje fyzikálně podložené kvantitativní zhodnocení dopadů klimatické změny na vodní zdroje a umožňuje identifikovat optimální řešení pro různá adaptační opatření.
- Představovaná metodika dále zdůrazňuje, že při pohledu na klimatickou změnu bychom neměli spoléhat pouze na jeden střední scénář, ale měli bychom se opřít o širší spektrum těchto scénářů. To umožní určit míru nejistoty vodní bilance v budoucím klimatu a zajistit co nejrobustnější systém opatření pro snížení možných poruch vodohospodářské bilance

Seznam použitých zkratek

AR6 – (*„Sixth Assement Report“*), Šestou hodnotící zpráva Mezivládního panelu pro změnu klimatu

ADC – (*“Advanced Delta Change”*) pokročilá přírůstková metoda

AT – Rakousko

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

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

ČR – Česká republika

ČSN – Československá státní norma, česká technická norma

ET_o – Referenční evapotranspirace

DHI – nadnárodní společnost zabývající se obory související s vodním hospodářstvím a životním prostředí

DTM – digitální model terénu

DPZ – dálkový průzkum země

EPSG – unikátní kód geodetického referenčního systému

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

GIS – geografické informační systémy

HM – hydrologický model

IPCC – (*"Intergovernmental Panel on Climate Change"*), Mezivládní panel pro změnu klimatu

KGE – “*Kling–Gupta Efficiency“, statistická metoda pro hodnocení kvality simulovaných výstupů*

MIKE HYDRO – 1D hydraulický model od společnosti DHI

MIKE SHE – plošně distribuovaný hydrologický model od společnosti DHI

MZe – Ministerstvo zemědělství

MŽP – Ministerstvo životního prostředí

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

PMo – Povodí Moravy s.p.

R – programovací jazyk

RCM – (*„Regional Climate Model“*), regionální klimatický model

RMSE – odmocnina střední kvadratické chyby

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

TB – terabyte, jednotka velikosti dat

VD – vodní dílo

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

WMO – (“*World meterological organization*”) - Světová meteorologická organizace

WMS – webová mapová služba umožňující sdílet geografické informace v prostředí Internetu

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.

Brázdil R., Zahradník P., Dobrovolný P., Štěpánek P., Trnka M., 2021. Observed changes in precipitation during recent warming: The Czech Republic, 1961–2019. *International Journal of Climatology* 41, 3881–3902.

Brázdil R., Zahradníček 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.

Ministerstvo zemědělství, 2002. Metodický pokyn pro sestavení vodohospodářské bilance oblasti povodí (k ustanovením § 5, § 6, § 7, § 8 a § 9 vyhlášky č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci.

Naumann G., Cammalleri C., Mentaschi L., Feyen L., 2021. Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nature Climate Change* 11, 485–491.

Štěpánek P., Zahradníček P., Farda A., 2013. Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961–2010. *Idojaras* 117, 123–141.

Štěpánek P., Zahradníček P., Huth R., 2011. Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. *Idojaras* 115, 87–98.

R Core Team, 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

van Pelt S.C., Beersma J.J., Buishand T.A., van den Hurk B.J.J.M., Kabat P., 2012. Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 4517–4530.

Willems P., 2000. Probabilistic modeling of emission receiving surface waters. Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium.

Willmott C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63, 1309–1313.

Zahradníček P., Brázdil R., Štěpánek P., Trnka M., 2021. Reflections of global warming in trends of temperature characteristics in the Czech Republic, 1961–2019. *International Journal of Climatology* 41, 1211–1229.

ISBN 978-80-87902-37-0

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