

**T A**

**Č R**

Program **Prostředí pro život**



**CentrumVoda**

**Projekt SS02030027  
Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR  
v podmínkách změny klimatu  
(Centrum Voda)**

Souhrnná výzkumná zpráva

**Dílčí cíl 1.2 – Identifikace území s deficitními vodními zdroji**

**Vyhodnocení deficitních oblastí v ČR pro současné a výhledové  
podmínky**



Praha, červen 2024

**Autoři souhrnné výzkumné zprávy:**

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce

- Ing. Adam Vizina, Ph.D.
- Ing. Petr Vyskoč
- Ing. Eva Melišová, Ph.D.
- Ing. Irina Georgievová

Ústav výzkumu globální změny AV ČR, veřejná výzkumná instituce

- Prof. Mgr. Ing. Miroslav Trnka, Ph.D.
- Ing. Milan Fischer, Ph.D.
- Bc. Jan Balek

Česká zemědělská univerzita v Praze

- Prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.
- Doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.

**Odborní garanti pracovního balíčku:**

Ministerstvo životního prostředí

- Ing. Tereza Davidová, Ph.D.
- Ing. Josef Reidinger

**Poděkování:**

Souhrnná výzkumná zpráva byla vytvořena v rámci projektu SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR a podmínkách změny klimatu“, řešeného s finanční podporou Technologické agentury České republiky v rámci programu Prostředí pro život v letech 2020–2026, jako výsledek č. SS02030027-V47.



Toto dílo podléhá licenci Creative Commons Uveďte původ 4.0 Mezinárodní.

Pro získání kopie plného znění licenčních podmínek navštivte

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> nebo požádejte písemně na adrese Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Pro komerční užití díla je třeba uzavřít individuální licenční smlouvu.

## Obsah

1. Úvod .....	6
2. Hydrologická bilance.....	7
2.1 Vstupní data .....	7
2.1.1 Klimatická data: současnost.....	7
2.1.2 Klimatická data: změna klimatu.....	10
2.1.3 Hydrologická data .....	14
2.2 Metodika .....	14
2.2.1 Hydrologický model .....	14
2.2.2 Kalibrace hydrologického modelu .....	17
2.2.3 Modelování dopadů změny klimatu na hydrologickou bilanci .....	19
2.3 Vyhodnocení.....	20
3. Deficitní oblasti.....	23
3.1 Deficitní oblasti: počátek řešení projektu.....	23
3.2 Regionalizace sucha ORP .....	25
3.3 Stanovení deficitních oblastí .....	27
4. Databáze.....	29
4.1 Technická specifikace.....	29
4.2 Úvodní strana .....	29
4.3 Hydrologická bilance.....	30
4.4 Deficitní oblasti .....	32
5. Literatura .....	33
6. Přílohy.....	36
6.1 Hydrologická bilance.....	36
6.2 Deficitní oblasti .....	46

**Seznam obrázků**

Obrázek 2-1 Potenciální evapotranspirace za období 1991-2020 .....	9
Obrázek 2-2 Index aridity za období 1991-2020 (červeně jsou zobrazeny oblasti s nižšími srážkovými úhrny a vyšší evapotranspirací, v bílých oblastech je to vyrovnané a modré oblasti zobrazují místa, kde je vyšší srážkový úhrn).....	9
Obrázek 2-3 Vývoj průměrných ročních teplot vzduchu dle jednotlivých scénářů (simulace jsou agregovány dle SSP – silné linie, simulace ALADIN – čárkovaná linie) .....	12
Obrázek 2-4 Vývoj průměrných měsíčních teplot vzduchu dle jednotlivých scénářů SSP2.45 a SSP5.85 (simulace ALADIN jsou zvýrazněny) .....	12
Obrázek 2-5 Vývoj průměrných ročních srážkových úhrnů dle jednotlivých scénářů (simulace jsou agregovány dle SSP – silné linie, simulace ALADIN – čárkovaná linie).....	13
Obrázek 2-6 Vývoj průměrných měsíčních srážkových úhrnů dle jednotlivých scénářů SSP2.45 a SSP5.85 (simulace ALADIN jsou zvýrazněny) .....	13
Obrázek 2-7 Absolutní změny srážkových úhrnů na základě jednotlivých simulací klimatických modelů .....	14
Obrázek 2-8 Schéma hydrologického modelu BILAN.....	16
Obrázek 2-9 Ukázka pozorovaných (modře) a modelovaných měsíčních průtoků modelem Bilan pro vodoměrnou stanici Janov .....	19
Obrázek 2-10 Ukázka pozorovaných (modře) a modelovaných měsíčních průtoků modelem TUW pro vodoměrnou stanici Janov .....	19
Obrázek 2-11 Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu.....	20
Obrázek 2-12 Vývoj průměrných ročních odtokových výšek dle jednotlivých scénářů (simulace jsou agregovány dle SSP – silné linie, simulace ALADIN – čárkovaná linie).....	21
Obrázek 2-13 Vývoj průměrných měsíčních odtokových výšek dle jednotlivých scénářů SSP2.45 a SSP5.85 (simulace ALADIN jsou zvýrazněny) .....	21
Obrázek 2-14 Absolutní změny odtokových výšek na základě jednotlivých simulací klimatických modelů.....	22
Obrázek 3-1 Specifické oblasti, ve kterých se projevuje aktuální problém ohrožení území suchem (oblasti označené žlutě SOB8). Převzato z dokumentu MMR „Politika územního rozvoje ČR“ .....	23
Obrázek 3-2 Vymezení deficitních oblastí na počátku řešení projektu.....	24
Obrázek 3-3 Rozdělení České republiky na základě indexu aridity .....	26
Obrázek 3-4 Regionalizace sucha – ORP k roku 2023.....	26
Obrázek 3-5 Hodnocení deficitních oblastí na základě jednotlivých simulací klimatických modelů (šedé polygony udávají neaktualizovanou vrstvu deficitních oblastí) .....	27
Obrázek 3-6 Výsledné rozdělení deficitních oblastí.....	28
Obrázek 4-1 Rozdělovník úvodní strany databáze HYMOD-KZ.....	29
Obrázek 4-2 Rozdělovník databáze HYMOD-KZ: možnosti výběru veličin a časového výhledu v komponentě „Hydrologická bilance“ .....	30
Obrázek 4-3 Vývoj zvolené veličiny ve vodním útvaru dle jednotlivých SSP scénářů a modelu ALADIN-CLIMATE/CZ .....	31
Obrázek 4-4 Srážkový úhrn pro variantu: výhled k roku 2050, SSP126 a MEAN (aritmetický průměr ze všech simulací) .....	31
Obrázek 4-5 Vyhodnocené deficitní oblasti .....	32
Obrázek 6-1 Deficitní oblasti dle simulací GCM pro SSP 2.45 k roku 2050 .....	46
Obrázek 6-2 Deficitní oblasti dle simulace ALADIN-CLIMATE/CZ pro SSP 2.45 k roku 2050.....	47
Obrázek 6-3 Deficitní oblasti dle simulací GCM pro SSP 5.85 k roku 2050 .....	48
Obrázek 6-4 Deficitní oblasti dle simulace ALADIN-CLIMATE/CZ pro SSP 5.85 k roku 2050.....	49

## **Seznam tabulek**

Tabulka 2-1 Vybrané modely GCM ze simulací CMIP6 a ALADIN-CLIMATE/CZ, jejich prostorové rozlišení a dostupných scénářů socioekonomického vývoje .....	10
---	----

## 1. Úvod

Projekt Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR a podmínkách změny klimatu (Centrum Voda) probíhá v letech 2020 až 2026 s finanční podporou Technologické agentury ČR v programu Prostředí pro život a řeší ho tyto partneři:

- Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce
- Agentura ochrany přírody a krajiny ČR
- České vysoké učení technické v Praze
- Česká zemědělská univerzita
- Český hydrometeorologický ústav
- Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
- Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v. v. i.
- Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.

Tato souhrnná výzkumná zpráva obsahuje výsledky řešení projektu Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR a podmínkách změny klimatu (Centrum Voda) v pracovním balíčku WP 1 Predikce vývoje zabezpečení vodních zdrojů v ČR do r. 2050 v podrobnosti krajů v závislosti na změně klimatu, v dílčím cíli DC 1.2 Identifikace území s deficitními vodními zdroji. Cílem DC 1.2 je vyhodnotit míru zajištění výhledových potřeb vody vodními zdroji v podmínkách klimatické změny a identifikace potenciálně problémových (deficitních) území. Řešení probíhalo v období let 2020 až 2024. Na zpracování souhrnné výzkumné zprávy se podíleli tyto partneři:

- Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce
- Česká zemědělská univerzita
- Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.

Kromě souhrnné výzkumné zprávy je dalším výsledkem DC 1.2 příslušná specializovaná veřejná databáze a recenzovaný článek  $J_{ost}$ . Zpráva popisuje jednotlivé postupy a samotné výstupy.

Zpráva je předána Ministerstvu životního prostředí jako odbornému garantovi programu Prostředí pro život a veřejnosti je zpřístupněna na webových stránkách projektu <https://www.centrum-voda.cz>. Dílčí cíl 1.2 (DC 1.2) je součástí pracovního balíčku 1 (WP 1), který se zabývá problematikou nedostatku vody. A to určením jejích budoucích potřeb, v závislosti na intenzitě změn klimatu, ale také na pravděpodobném socioekonomickém vývoji. Na výsledky, zjištěné v rámci činností WP 1 potom navazují činnosti pracovního balíčku WP 3.

## 2. Hydrologická bilance

V kapitole jsou popsány postupy modelování hydrologické bilance pro současné a výhledové klimatické podmínky se zaměřením na rok 2050.

### 2.1 Vstupní data

#### 2.1.1 Klimatická data: současnost

Řešení dílčího cíle bylo zaměřeno na přípravu vstupních dat do hydrologického modelu a simulačního modelu zásobní funkce vodohospodářských soustav. V rámci pracovní databáze ORACLE bylo připraveno datové rozhraní mezi modelem hydrologické bilance a simulačním modelem zásobní funkce vodohospodářské soustavy, které usnadní přenos dat mezi modely.

Pro potřebu hydrologického modelu byly ze strany ČHMÚ byly poskytnuty klimatická data v rozlišení 500 m x 500 m v denním časovém kroku. Data jsou ve formátu GeoTiff a proběhla jejich validace. S ohledem na velikost dat (1 klimatická veličina má cca 50 Gb) se zpracovaly nástroje, tak aby byly využitelné pro hydrologické modelování a jejich zpracování nebylo výpočetně časově náročné. Jak již bylo zmíněno, jako vstupní data jsou použity rastrové vrstvy průměrných denních teplot a denních úhrnů srážek za období 1961-2020.

Jako podpora pro sestavování vstupů pro hydrologický model byl vytvořen skript ***P-T\_extract***. Vstupem jsou zmíněné rastrové řady denních úhrnů srážek a průměrných denních teplot, dále polygonová nebo bodová vrstva zájmových území ve formátu \*.shp a výstupem jsou denní řady průměrných denních úhrnů a teplot v zájmovém území ve formátu \*.csv.

V prvním kroku skript načte všechny rastry denních hodnot zvolené veličiny do multiband rastru. Dále načte a případně konvertuje do stejného souřadného systému shapefile zájmového území a definuje unikátní identifikátor území pro výpočet průměrných hodnot. Z něj je dále vytvořena rastrová vrstva zájmových území s unikátním identifikátorem. Skript obsahuje varianty pro větší polygonová území nebo menší polygony či bodově definovaná území.

Následně je zonální statistikou spočtena matice průměrných hodnot zvolené veličiny, přičemž řádky nesou řady průměrných hodnot pro jednotlivá zájmová území, sloupce pak obsahují hodnoty pro každou časovou značku. Po transpozici matice je tento výsledek uložen do formátu csv.

Skript ***daily\_evap*** slouží k výpočtu denních hodnot potenciálního výparu. V prvním kroku definuje funkci  $PET()$  pro výpočet výparu vycházející z metody dle Oudina:

$$PET = 0.405 R_a \frac{T_a + 1.88}{100}$$

Kde  $R_a$  je extraterestriální insolace [ $\text{MJ m}^{-2} \text{den}^{-1}$ ] a  $T_a$  je průměrná denní teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Přitom platí:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

Kde  $G_{sc}$  je solární konstanta [ $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ],  $d_r$  je relativní vzdálenost Země od Slunce [-],  $\omega_s$  je hodinový úhel západu Slunce [rad],  $\varphi$  je zeměpisná šířka [rad] a  $\delta$  je deklinace Slunce [rad]. Hodinový úhel západu slunce se počítá podle rovnice:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] ,$$

kde  $\varphi$  je zeměpisná šířka [rad]. Relativní vzdálenost Země od Slunce ( $d_r$ ) a deklinaci Slunce ( $\delta$ ) lze vyjádřit pomocí juliánského dne  $JDAY$  (pořadové číslo dne od začátku roku) ze vzorců:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} JDAY\right),$$
$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} JDAY - 1,39\right).$$

Jedinými potřebnými vstupy tak zůstávají průměrná denní teplota  $T_a$  [ $^{\circ}\text{C}$ ], pořadové číslo dne od začátku roku  $JDAY$  [-] a zeměpisná šířka v radiánech -  $\phi$  [rad].

Vstupem do definované funkce  $PET()$  jsou kromě jmenovaných rastrů denních průměrných teplot Juliánský den vyčíslený z data v názvu rastru a pevně definovaná rastrová vrstva zeměpisných šířek v radiánech odvozená v prostředí GIS z libovolného ze vstupních rastrů.

V dalším kroku skript prochází všechny rastry průměrných denních teplot v definovaném adresáři, na základě výše uvedené funkce vytvoří rastr denního potenciálního výparu a zapíše jej do zvoleného umístění. Pokud výpočet v kterémkoliv pixelu vrátí zápornou hodnotu, je do rastru zapsána nulová hodnota výparu.

Skript **monthly\_means** slouží k výpočtu dlouhodobých měsíčních průměrů denního potenciálního výparu pro vybrané referenční období. Vstupem jsou předchozím skriptem vypočtené rastry denních potenciálních výparů.

V prvním kroku skript vyčísluje průměrné měsíční průměry denních potenciálních výparů odděleně pro každý rok v rámci zvoleného referenčního období. Postupně prochází jednotlivé roky a rastry denních výparů pro každý měsíc v tomto roce načítá do multiband-rastru, průměruje je a zapisuje výsledky na zvolené umístění. V druhém kroku postupně načítá tyto průměrné měsíční výparů za všechny roky v referenčním období pro jednotlivé měsíce, průměruje je a zapisuje do výsledného umístění. Analogicky jsou agregovány teploty vzduchu a srážkové úhrny. Na Obrázek 2-1 jsou zobrazeny průměrné roční hodnoty evapotranspirace za období 1991-2020. Z těchto dat byly například odvozeny indexy aridity, které jsou zobrazeny na Obrázek 2-2.

Výše popsané klimatické vstupy (teplota vzduchu, srážkové úhrny, potenciální evapotranspirace) byly použity jako vstupy do hydrologických modelů, především modelu Bilan a modelu vzniklého v rámci DC 1.2 projektu PERUN.



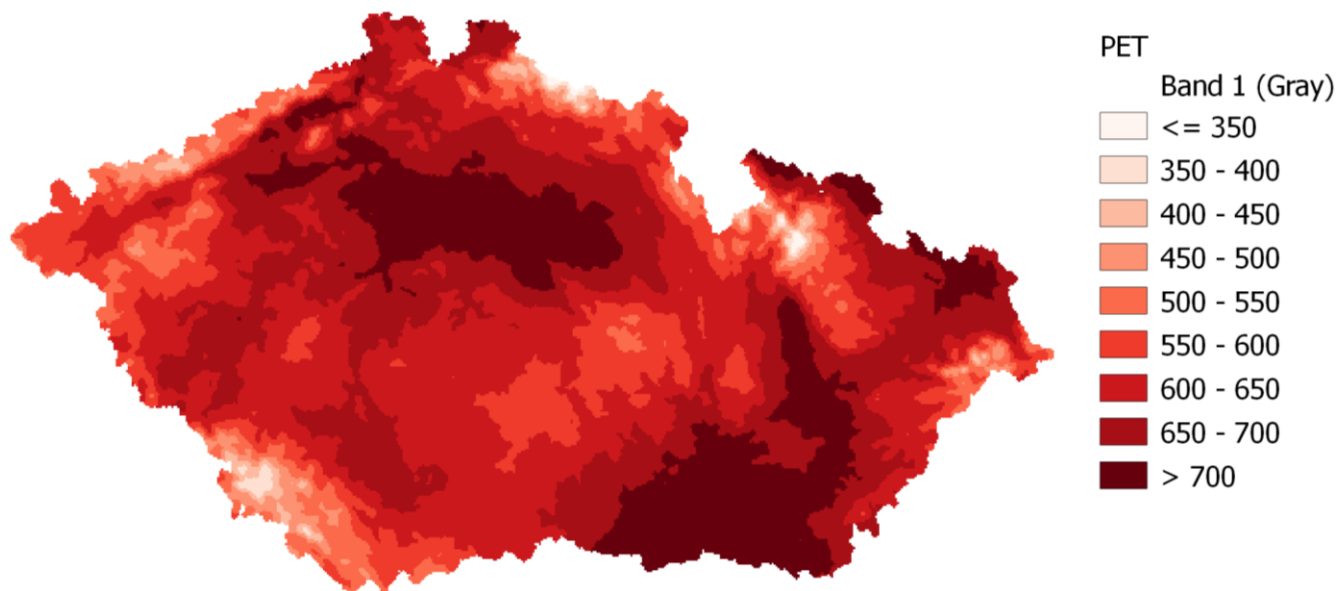
T A

Č R

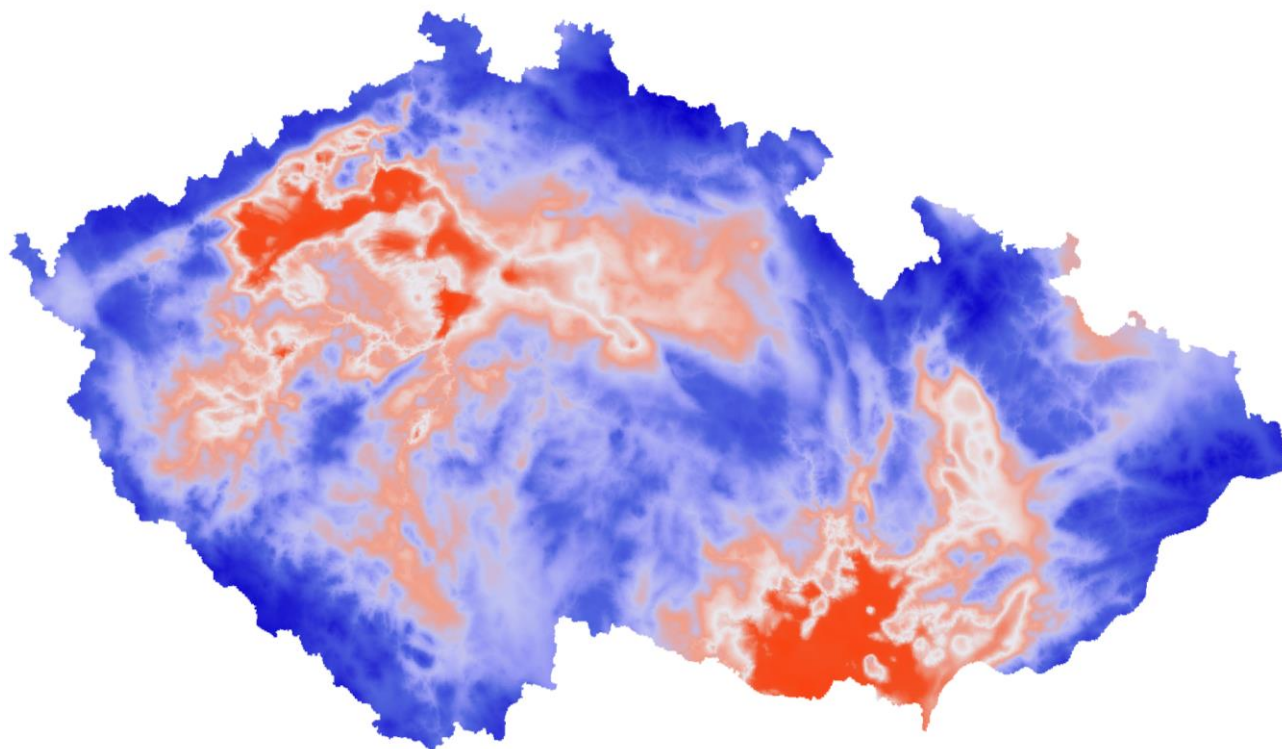


CentrumVoda

Program **Prostředí pro život**



Obrázek 2-1 Potenciální evapotranspirace za období 1991-2020



Obrázek 2-2 Index aridity za období 1991-2020 (červeně jsou zobrazeny oblasti s nižšími srážkovými úhrny a vyšší evapotranspirací, v bílých oblastech je to vyrovnané a modré oblasti zobrazují místa, kde je vyšší srážkový úhrn)

### 2.1.2 Klimatická data: změna klimatu

Klimatické modely jsou matematické reprezentace fyzikálních procesů, které se odehrávají v atmosféře, oceánech, ledových příkrovech a na pevnině. Slouží k simulaci minulého, současného a budoucího klimatu na Zemi. Globální klimatické modely (GCM) pracují s hrubým prostorovým rozlišením, což znamená, že menší geografické oblasti, jako je Česká republika, nejsou v těchto modelech přesně reprezentovány. Proto se také na regionální úrovni využívají regionální klimatické modely (RCM), které prostorově zpřesňují výstupy GCM. Využití GCM i RCM má své výhody i nevýhody.

Nejnovější CMIP6 GCM (O'Neill et al., 2016; Meresa et al., 2022) simulace zahrnují modely s různým prostorovým rozlišením, většinou okolo 100 nebo 250 km. Některé modely s rozlišením 50 km však končí simulace v polovině 21. století. Modely se liší komplexností popisu klimatického systému a parametrizací menších měřítek, což vede k rozdílům mezi simulovaným klimatem a realitou. Pro střední Evropu byly vybrány GCM, které nejlépe simulují její klima, přičemž se zajistilo, aby tento výběr reprezentoval celou původní množinu modelů. Bylo vybráno 6 modelů s rozlišením 100 km, které pokrývají všechny emisní scénáře a zohledňují základní meteorologické prvky.

Scénáře klimatické změny (SSP (Meitner et al., 2023)) odrážejí různé možné budoucí trajektorie světa z pohledu emisí i socioekonomického vývoje:

- SSP1–2.6: udržitelný vývoj
- SSP2–4.5: střední cesta se zhoršováním environmentálních systémů
- SSP3–7.0: regionální rivalita a omezený ekonomický rozvoj
- SSP5–8.5: vývoj založený na fosilních palivech

Výběr modelů GCM byl proveden podle metodiky (Mašek, 2023) a zajišťuje věrohodné simulace klimatu střední Evropy. Dále byl zahrnut regionální model ALADIN-CLIMATE/CZ, jenž se vyznačuje vysokým prostorovým rozlišením. Výpočetní oblast modelu ALADIN-CLIMATE/CZ zahrnuje téměř celou Evropu s Českou republikou v jejím středu, což je důležité pro vlastní modelování budoucího klimatu, nicméně pro další zpracování výsledků již není potřeba, proto byla zredukována (Vizina et al., 2019). Výsledný soubor použitých simulací je uveden v Tabulka 2-1.

*Tabulka 2-1 Vybrané modely GCM ze simulací CMIP6 a ALADIN-CLIMATE/CZ, jejich prostorové rozlišení a dostupných scénářů socioekonomického vývoje*

Model GCM	Dostupné scénáře klimatické změny	Prostorové rozlišení modelu v km
CMCC-ESM2	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100x90
EC-EARTH3	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	80
GFDL-ESM4	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100
MPI-ESM1-2-HR	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	50
MRI-ESM2-0	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	60
TAIESM1	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100
ALADIN-CLIMATE/CZ	SSP245, SSP585	2,3

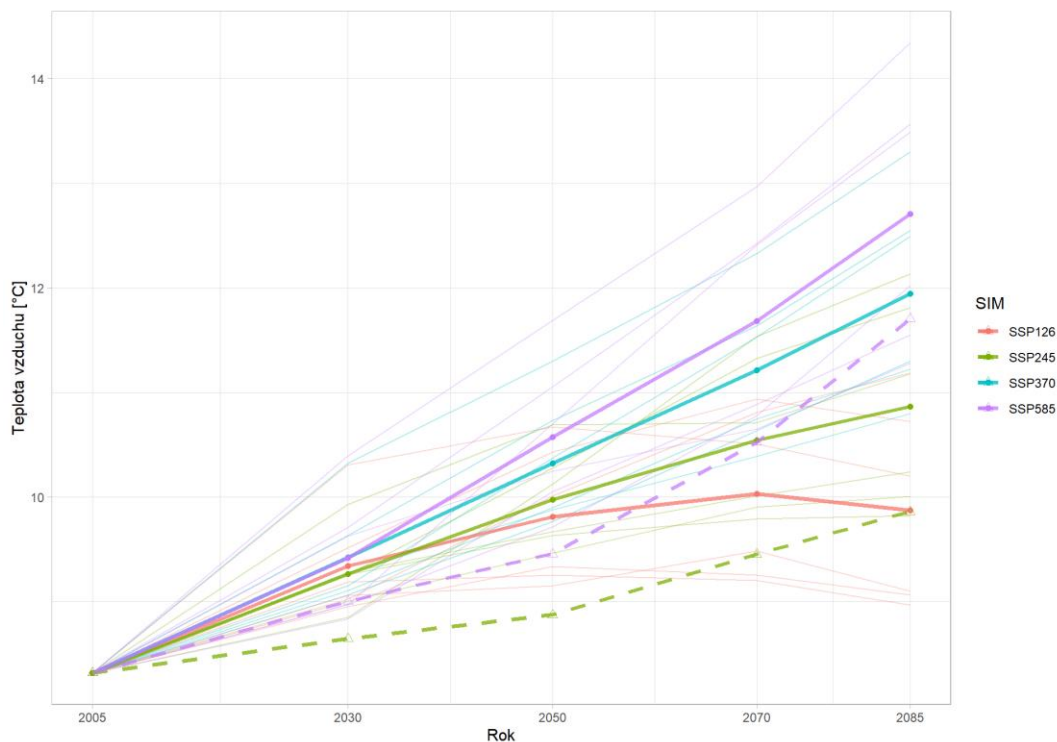
Pro tvorbu scénářů změny klimatu v kontextu odhadu změn hydrologické bilance se v České republice standardně využívá tzv. přírůstková metoda, zejména pro studie v měsíčním kroku. Tato metoda spočívá v transformaci pozorovaných dat tak, aby změny transformovaných veličin odpovídaly změnám odvozeným ze simulací klimatických modelů. V měsíčním kroku se běžně uvažují změny průměrných měsíčních úhrnů srážek a průměrné měsíční teploty. V denním kroku je nutné uvažovat i změny variability veličin. Pro tvorbu scénářů změny klimatu byla proto využita pokročilá přírůstková metoda Advanced Delta Change (ADC). Podstatou přírůstkové metody je transformace pozorovaných dat způsobem, jenž zaručí, že změny mezi transformovanou a původní řadou jsou stejné jako změny odvozené z regionálního klimatického modelu. U srážek a teploty (zejména v denním kroku) je žádoucí, aby uvažované transformace zohledňovaly změny jak v průměru, tak ve variabilitě. To zjednodušeně znamená, že extrémny se mohou měnit jinak než průměr. Při odvození změn srážek z klimatického modelu ADC metoda uvažuje i systematické chyby simulace. Jelikož teplota je transformována lineárně, nemá systematická chyba na výslednou transformaci teploty vliv (Vizina et al., 2019). Zvolenou metodou byly transformovány vybrané (Štěpánek et al., 2019) Globální cirkulační modely (GCM) a Regionální cirkulační model ALADIN-CLIMATE/CZ pro jednotlivé vodní útvary a dále agregovány například pro hodnocení trendu v rámci České republiky.

Vývoj průměrných ročních teplot vzduchu dle jednotlivých scénářů (Obrázek 2-3) ukazuje změny v průměrných ročních teplotách vzduchu podle různých scénářů socioekonomického vývoje (SSP).

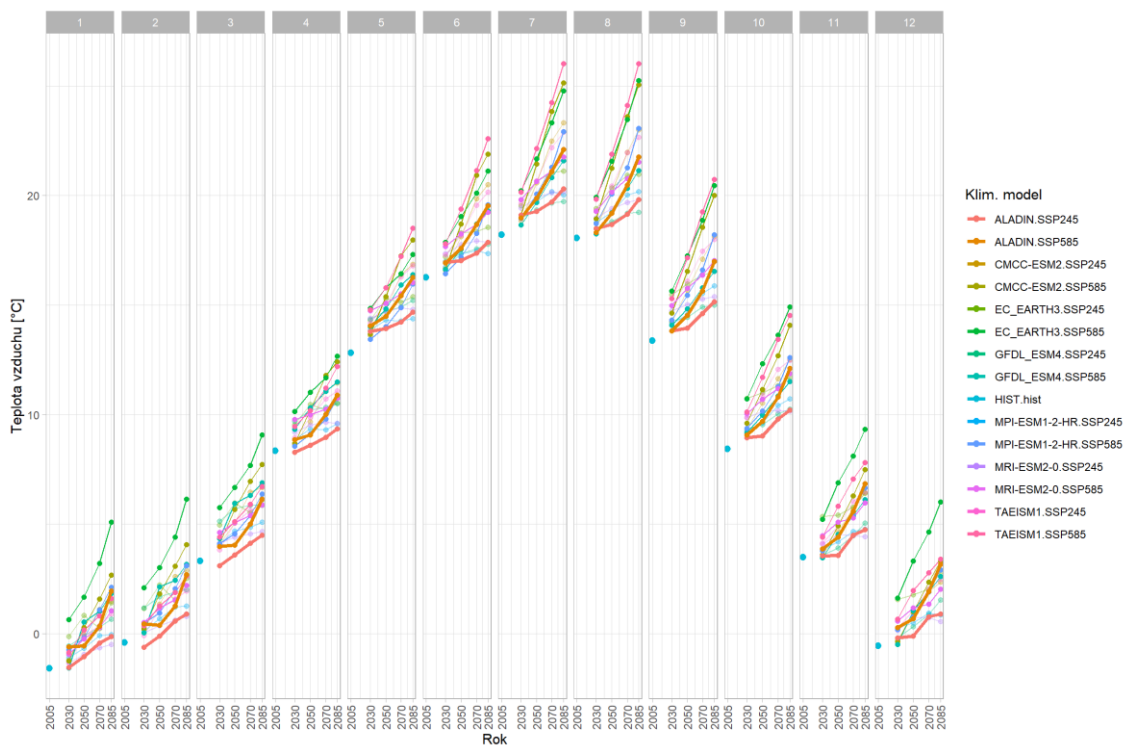
Simulace klimatických modelů jsou v grafu znázorněny tenkými liniemi jednotlivé simulace, pevnými liniemi agregované simulace, které reprezentují různé SSP scénáře (za všechny simulace), a čárkovanou linií simulace modelu ALADIN-CLIMATE/CZ. Tento obrázek poskytuje přehled o očekávaných nárůstech teplot (průměrných teplot v daném referenčním období), což je klíčové pro analýzu dopadů klimatických změn na vodní bilanci a vodohospodářské systémy. Obdobně je vývoj teplot zobrazen na Obrázek 2-4 pro jednotlivé měsíce. V grafu jsou zobrazeny pouze simulace SSP2.45 a SSP5.85, pro které byly k dispozici simulace modelu ALADIN-CLIMATE/CZ. Na obou grafech lze pozorovat, že v rámci všech simulací lze očekávat nárůst teplot, kdy k většímu rozpětí dochází až v časovém horizontu k roku 2070. Obecně lze konstatovat, že simulace ALADIN-CLIMATE/CZ jsou chladnější oproti vybraným simulacím GCM.

Obdobně jsou zobrazeny srážkové úhrny (Obrázek 2-5 pro roční hodnoty a Obrázek 2-6 pro měsíční hodnoty). Na rozdíl od teplot vzduchu, kde je trend souhlasný prakticky u všech simulací, u srážkových úhrnů je variabilita mnohem větší, a to znovu především po roce 2050. Model ALADIN-CLIMATE/CZ lze zařadit mezi vlhčí modely. Na Obrázek 2-7 jsou zobrazeny absolutní změny srážkového úhrnu (scénář - současnost) v ploše České republiky.

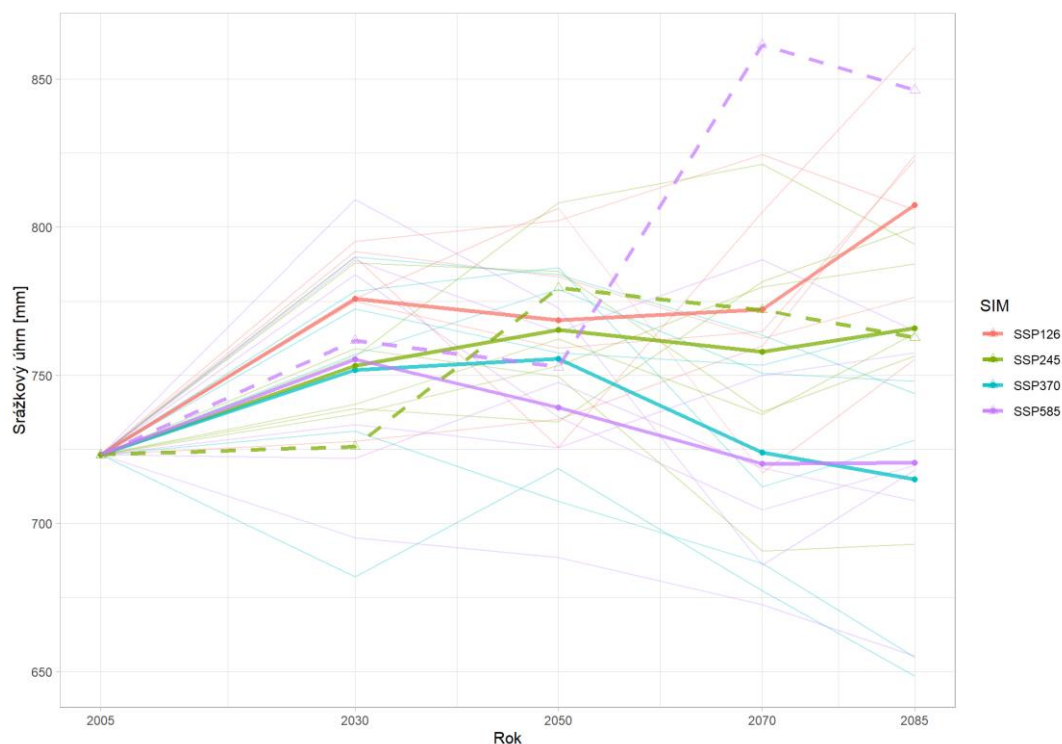
Vývojová dynamika klimatických veličin dle různých simulací zdůrazňuje rizika spojená s klimatickou změnou (a predikcí nejistot) a ukazují, jak různé emisní scénáře a simulace mohou vést k odlišným vodohospodářským výzvám.



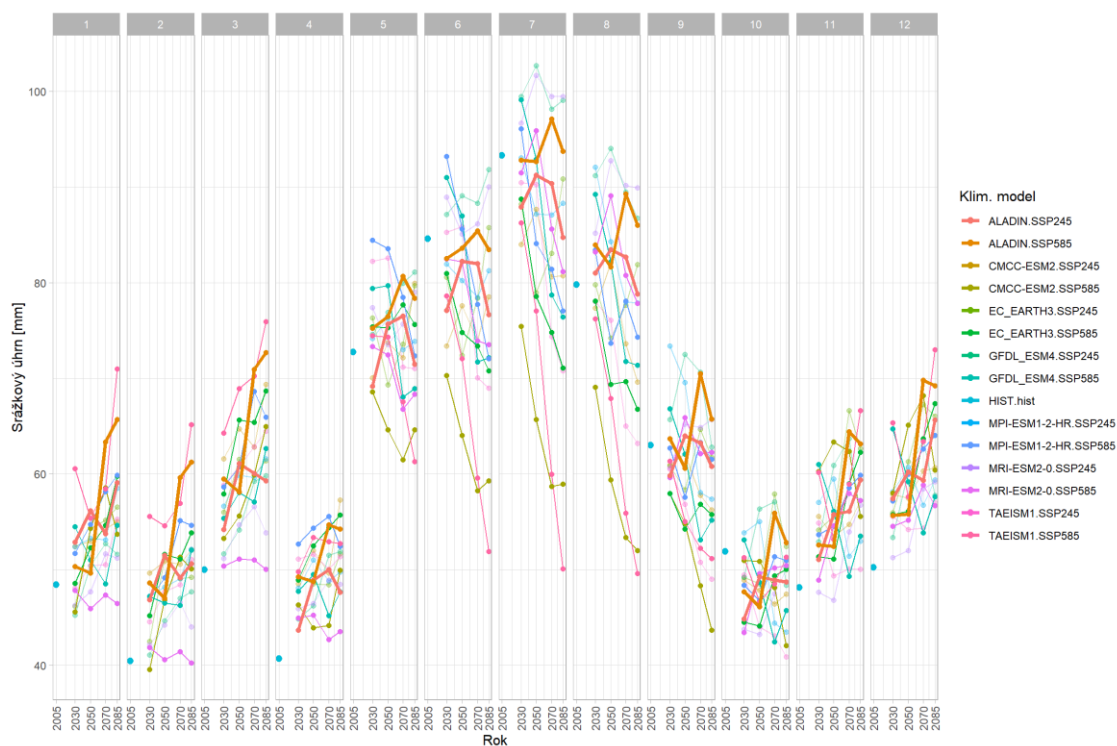
Obrázek 2-3 Vývoj průměrných ročních teplot vzduchu dle jednotlivých scénářů (simulace jsou agregovány dle SSP – silné linie, simulace ALADIN – čárkovaná linie)



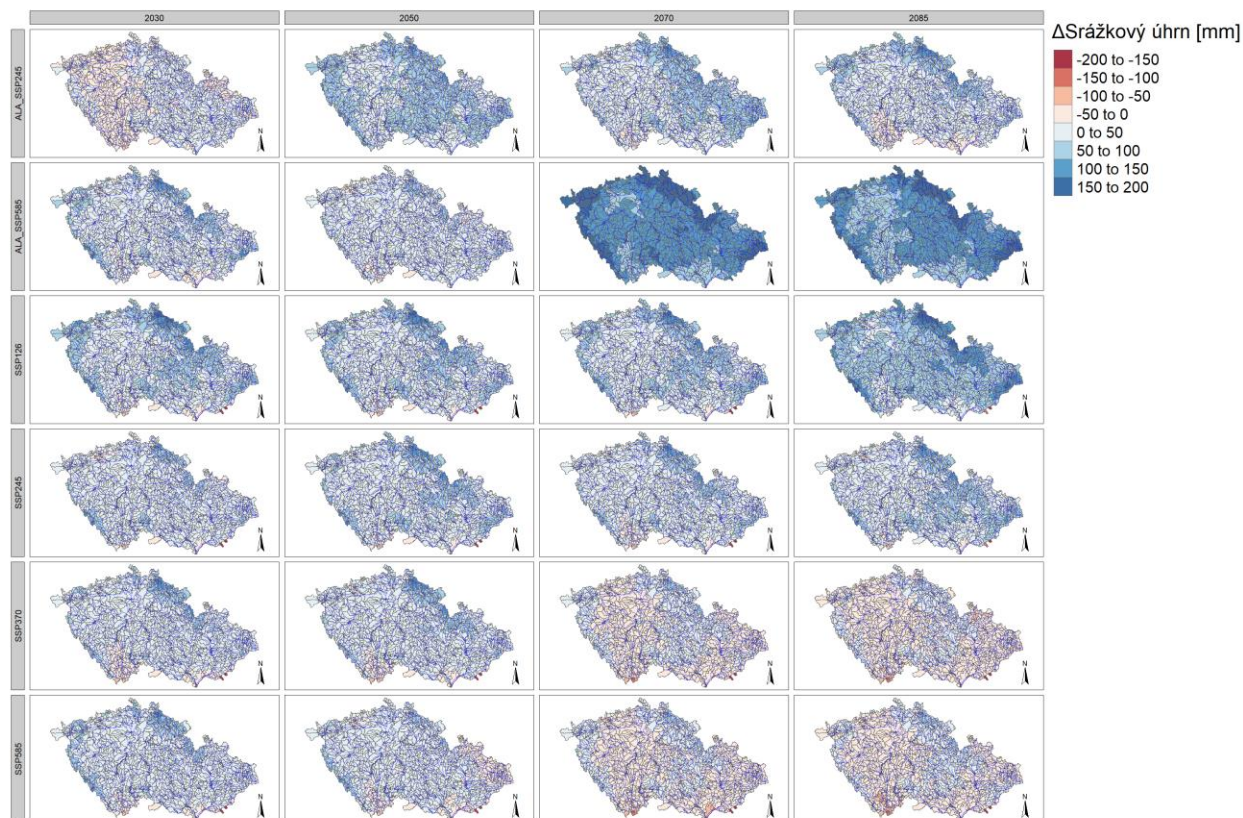
Obrázek 2-4 Vývoj průměrných měsíčních teplot vzduchu dle jednotlivých scénářů SSP2.45 a SSP5.85 (simulace ALADIN jsou zvýrazněny)



Obrázek 2-5 Vývoj průměrných ročních srážkových úhrnů dle jednotlivých scénářů (simulace jsou agregovány dle SSP – silné linie, simulace ALADIN – čárkovaná linie)



Obrázek 2-6 Vývoj průměrných měsíčních srážkových úhrnů dle jednotlivých scénářů SSP2.45 a SSP5.85 (simulace ALADIN jsou zvýrazněny)



Obrázek 2-7 Absolutní změny srážkových úhrnů na základě jednotlivých simulací klimatických modelů

### 2.1.3 Hydrologická data

Pro kalibraci hydrologického modelu byly použity denní časové řady z vodoměrných stanic v rámci celé České republiky a statistické charakteristiky (odvozené) a Mdenní vody pro vodní útvary poskytnuté ČHMÚ. Mdenní vody byly využity v oblastech, kde není k dispozici pozorování pro kalibraci modelu.

## 2.2 Metodika

### 2.2.1 Hydrologický model

Model BILAN byl vyvinut (Van Lanen et al., 2004; Vizina et al., 2015; Melišová et al., 2020) pro simulaci složek vodní bilance v povodí. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Odtok je modelován jako součet tří složek: dvě složky přímého odtoku (zahrnující i hypodermický odtok) a základní.

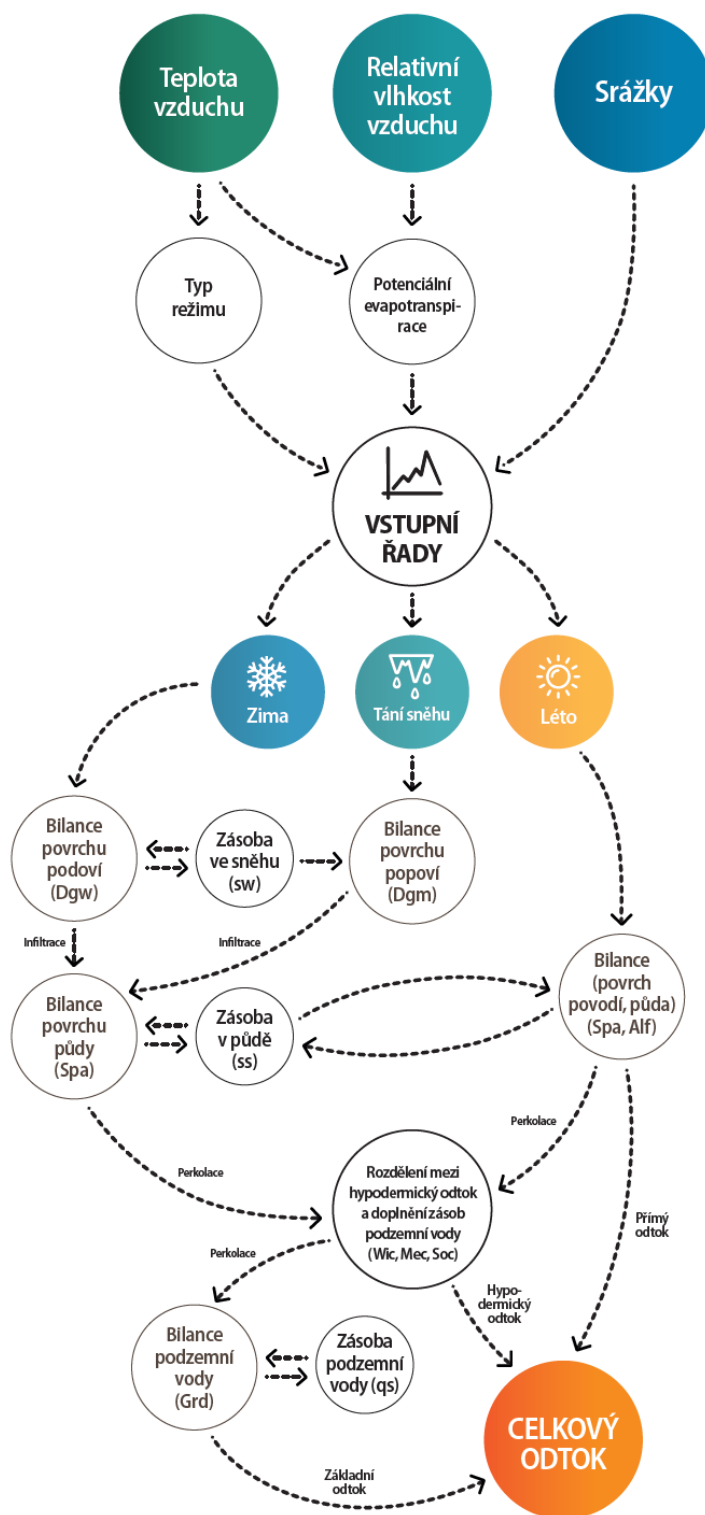
Vyvinutá denní verze konceptuálního modelu hydrologické bilance Bilan, parametrizující hydrologické chování povodí, vychází z měsíční verze. Základní struktura modelu a principy výpočtu jsou shodné v denní i měsíční verzi, stejně jako to, že povodí jsou uvažována jako celistvá. Povodí je schematizováno na soustavu nádrží, vertikálně jsou rozlišeny tři úrovně – povrch, půdní zóna a zóna podzemní vody. Velikosti toků mezi jednotlivými nádržemi jsou určovány algoritmy modelu, které jsou řízeny šesti volnými parametry (o dva méně než v měsíční verzi), považovanými za časově invariantní. Společné pro obě verze je odlišení tří typů režimů závislých na teplotě (zima, tání sněhu, léto).

Pokud nejsou vstupní řady potenciální evapotranspirace zadány, jsou dopočítány na základě sytostního doplnku (pro danou teplotu a vlhkost vzduchu). K tomu se využívá metodiky (Gidrometeoizdat, 1976), která uvádí měsíční hodnoty pro různé vegetační zóny nebo pomocí výpočtu dle (Oudin et al., 2010; Beran et al.; 2011). Pro použití v denní verzi byly tyto hodnoty převedeny na denní pomocí interpolace zachovávající měsíční průměry. Obecně je bilance vody v určité nádrži počítána podle vztahu:

$$S(d) = S(d - 1) + IN(d) - OUT(d)$$

velikost zásoby vody  $S(d)$  je tedy pro daný den  $d$  zjištěna ze zásoby v předchozím dni  $S(d-1)$  a vstupů do nádrže  $IN(d)$  a výstupů z nádrže  $OUT(d)$  v aktuálním dni.

Pro bilanci na povrchu půdy hrají zásadní roli vstupní srážkový úhrn a územní výpar, jehož velikost je určována podle potenciální evapotranspirace a množství dostupné vody (v létě se do ní zahrnuje také voda v půdním profilu). Intercepce je v bilanci uvažována jako součást vody v půdním profilu. V zimním období a při tání sněhu vstupuje do bilance na povrchu také zásoba vody ve sněhu. Z povrchu voda infiltruje do půdní zóny, kde plní nádrž s kapacitou, která je jedním z kalibrovaných parametrů. Při překročení této kapacity voda přetéká a následně je dělena do dvou lineárních nádrží. Odtoky z nich představují pomalou (základní odtok) a rychlou (přímý odtok) odezvu povodí. Celkový odtok je pak dán jejich součtem. Kromě odtokových dat poskytuje model výstupní časové řady zásob v jednotlivých nádržích a ve sněhu.



Obrázek 2-8 Schéma hydrologického modelu BILAN

Výpočetní rozlišení hydrologického modelu jsou vodní útvary.



### 2.2.2 Kalibrace hydrologického modelu

Parametry modelu byly identifikovány kombinací dvou strategií (automatické, expertní) a prostorových rozlišení (povodí a UPOV):

#### A) Automatická kalibrace

V prvním kroku je pro vodoměrné stanice a jejich povodí použit automatický optimalizační algoritmus v prostředí R. Účelem kalibrační cílové funkce je minimalizovat rozdíly mezi simulovaným a pozorovaným odtokem. Ve druhém kroku je ověřena věrohodnost odhadnutých parametrů a v případě potřeby jsou parametry modelu upraveny expertně. Automatická kalibrace odhaduje souhrnné parametry modelu pro všechny UPOV jednotky v každém jednotlivém povodí. Výstupy modelu SoilClim (půdní vlhkost a retenční kapacita půdy) se také používají k určení parametrů Spa a limitů tohoto parametru. Pro odvození nejlepších sad modelových parametrů je použit globální algoritmus „shuffled complex evolution/differential evolution“ (DE<sup>1</sup>).

Kalibrační kritéria (cílové funkce - OF) pro tuto část jsou Nash-Sutcliffeův koeficient odvozený z normálních hodnot NSE a logaritmičticky transformovaných hodnot průtoku NSElog (Nash a Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$
$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs,i}) - \log(Q_{sim,i}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{obs,i}) - \log(\overline{Q_{obs}}))^2}$$

Po porovnání a neuspokojivé shodě mezi pozorovaným a modelovaným odtokem na některých výpočetních jednotkách (UPOV) byl při kalibraci modelu dále použit algoritmus Lokální gradient - binární vyhledávání (BS). V tomto optimalizačním postupu je pro odhad parametrů Dgw, Dgm, Spa a Alf je použito kritérium střední kvadratická chyba (MSE).

---

<sup>1</sup> Metoda je odvozena z algoritmu publikovaného a testovaného ve studiích (Vrugt et al., 2009; Mariani et al., 2011). Použitý algoritmus pracuje s populací modelů, které prohledávají prostor parametrů a prostřednictvím vzájemné interakce nacházejí optimální hodnoty parametrů. Algoritmus SCDE kombinuje metodu diferenciální evoluce (Storn a Price, 1997) s míchacím algoritmem, který tvoří podstatnou část známého široce používaného algoritmu SCE-UA (Duan et al., 1994). Populace modelů je složena z jednotlivců, z nichž každý je reprezentován jednou sadou parametrů a hodnotou kritériální funkce. Pro tyto jednotlivce je iterativně hledána optimální hodnota kritériální funkce (Máca et al., 2013).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RM(i) - R(i))^2$$

Zbývající parametry modelu Wic, Mec, Soc a Grd ovlivňující distribuci odtoku do jednotlivých komponent modelu jsou kalibrovány pomocí kritéria absolutních hodnot relativních odchylek. Tento postup byl testován a přináší lepší výsledky při kalibraci modelu, jak pro nízké hodnoty průtoků, které jsou ovlivněné především hodnotou základního odtoku, tak pro střední hodnoty odtoku. Průměrná výsledná absolutní hodnota relativních odchylek je vyhodnocena pomocí optimalizačního kritéria MAPE:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|RM(i) - R(i)|}{R(i)}$$

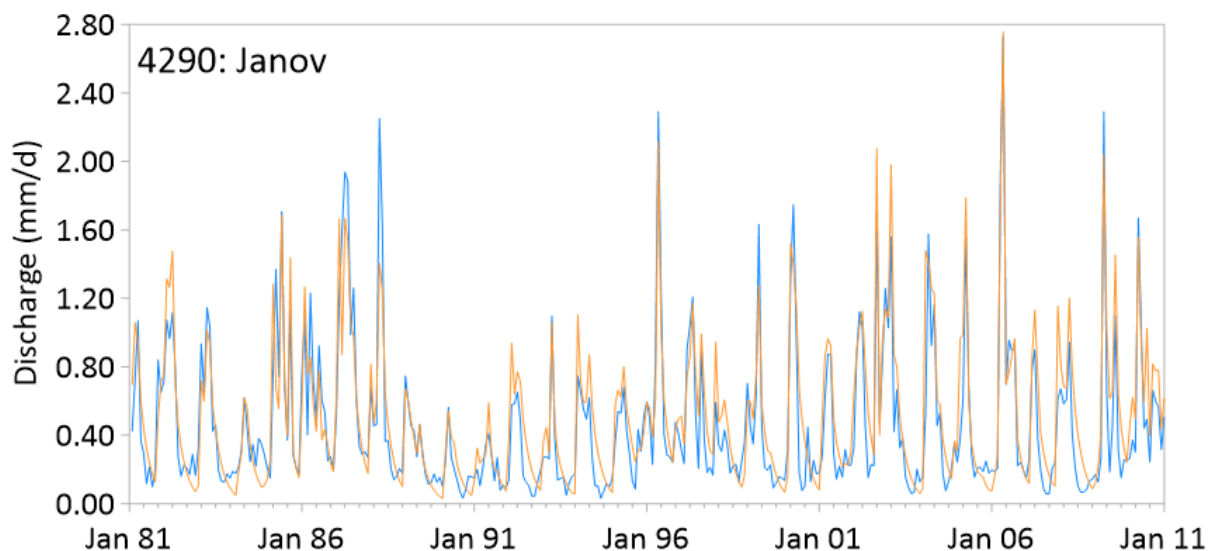
Jako optimalizační kritérium lze použít také Nash-Sutcliffeův koeficient účinnosti (NSE) nebo logaritmicou Nash-Sutcliffeovu účinnost (NSElog). Model umožňuje nastavit počet iterací. V této studii je pro každé povodí použito 500 iterací.

## B) Expertní kalibrace

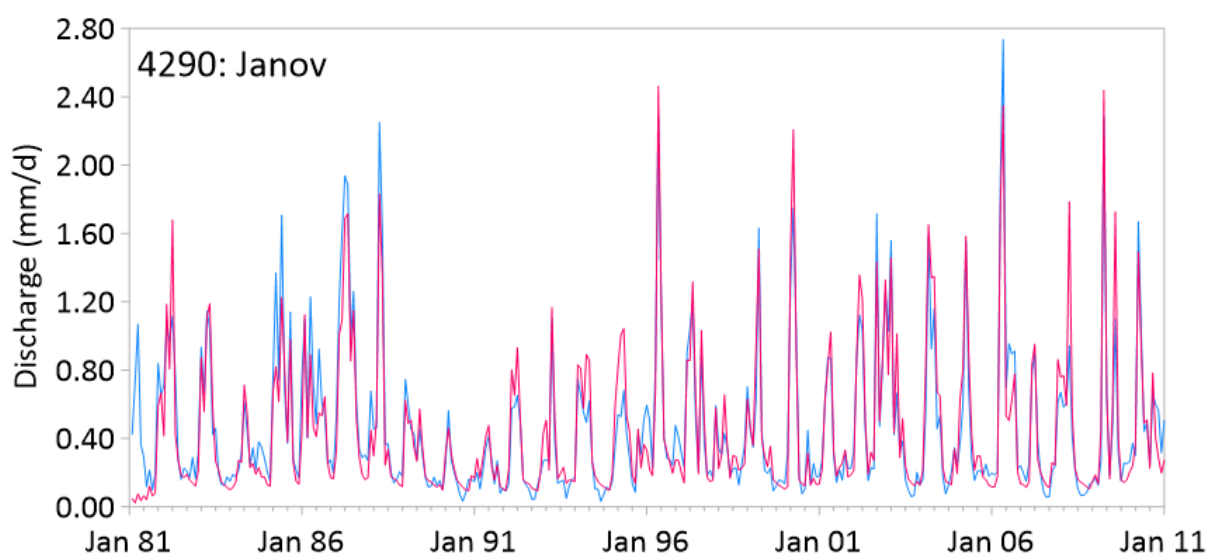
Expertní kalibrace byla použita jako poslední krok pro povodí, kde nebyla dobrá shoda výsledků. Tato strategie vychází ze znalostí o povodích a zkušeností s hydrologickým modelováním a je často aplikována v případových studiích pro jednotlivá povodí v České republice. Odborník obvykle omezuje rozsah optimalizace parametrů modelu a poté spustí optimalizační proceduru. Z tohoto pohledu tato kalibrační strategie nevede vždy k co nejlepšímu souladu mezi pozorovaným a simulovaným odtokem, ale zároveň zajišťuje, že všechny složky vodní bilance mají rozumné hodnoty a respektují fyzikální podmínky povodí.

Pro hodnocení kvality kalibrace a validace modelu byl použit balíček R hydroGOF (Zambrano-Bigiarini, M. et al., 2020). Dostupné časové období (1981-2022) bylo rozděleno na kalibrační (1981-2010) a validační (2011-2022) období, přičemž první slouží k identifikaci parametrů modelu a druhé k hodnocení výkonu modelu.

Výše popsané klimatické vstupy (teplota vzduchu, srážkové úhrny) byly použity pro kalibraci hydrologických modelů, především modelu Bilan a modelu vzniklého v rámci DC 1.2 projektu PERUN. Pro verifikaci se v roce 2022 na vybraných územích také kalibrovaly modely TUW a GR4J, které jsou standardně používány v zahraničí. Ukázka kalibrace pro povodí Janov je zobrazeno na Obrázek 2-9 (model Bilan) a Obrázek 2-10(model TUW).



Obrázek 2-9 Ukázka pozorovaných (modře) a modelovaných měsíčních průtoků modelem Bilan pro vodoměrnou stanici Janov



Obrázek 2-10 Ukázka pozorovaných (modře) a modelovaných měsíčních průtoků modelem TUV pro vodoměrnou stanici Janov

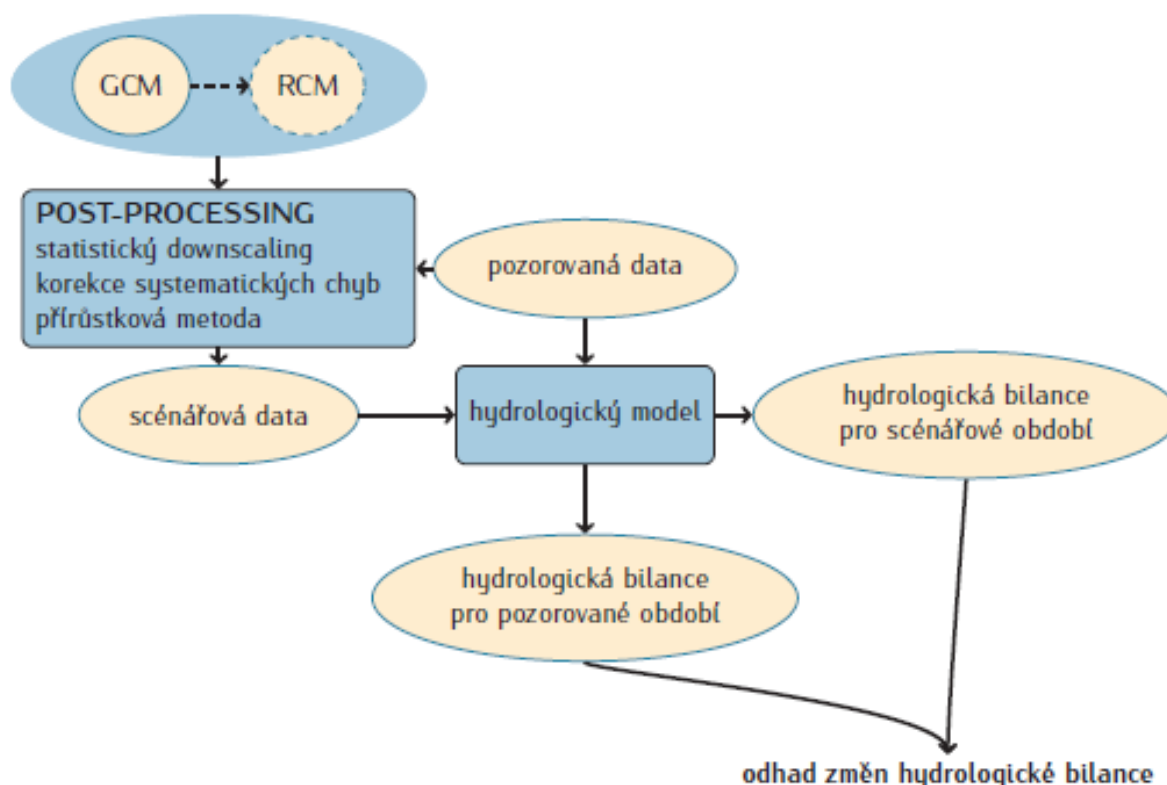
### 2.2.3 Modelování dopadů změny klimatu na hydrologickou bilanci

Postup modelování dopadu změny klimatu na hydrologický režim (viz Obrázek 2-11) lze stručně shrnout následovně:

1. Zvolený hydrologický model je pro vybrané povodí nakalibrován pomocí pozorovaných dat. Hydrologický model by měl být fyzikálně založen, aby bylo zaručeno, že i pro nepozorované podmínky bude poskytovat fyzikálně přijatelné výsledky.

2. Vstupní veličiny z globálního, popřípadě vnořeného regionálního klimatického modelu jsou převedeny na scénářové řady pro jednotlivá povodí, a to:
  - (a.i.1.a) statistickým downscalingem,
  - (a.i.1.b) „postprocessingem“ výstupu klimatického modelu, tj. využitím přírůstkové metody či korekce systematických chyb.

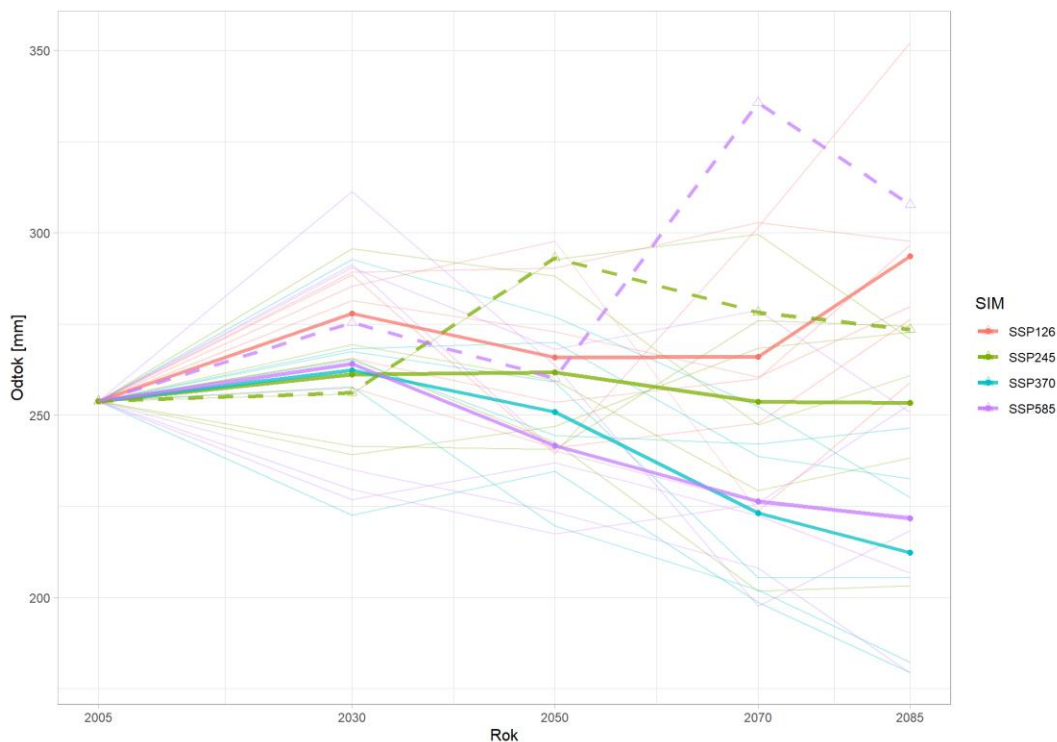
Často je nutné pomocí prostorové interpolace vztáhnout data z výpočetních buněk klimatického modelu k těžišti daného povodí. Pro korektní využití všech metod (a–b) je nezbytné mít k dispozici pozorovaná data.
3. Pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad je provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období.



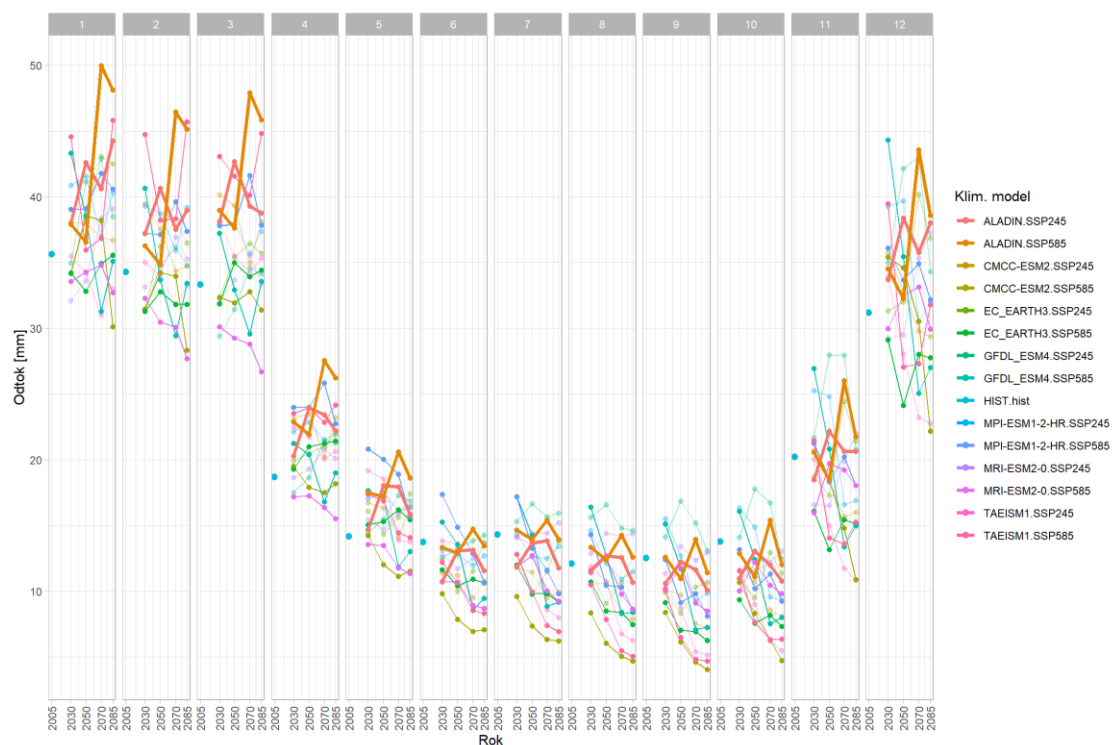
Obrázek 2-11 Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu

## 2.3 Vyhodnocení

Kapitola 2.3 dokumentu se zaměřuje na vyhodnocení simulací hydrologických modelů a jejich výsledků při simulaci současných a výhledových podmínek. Výsledky jsou prezentovány formou vývoje průměrných ročních a měsíčních odtokových výšek podle jednotlivých scénářů socioekonomického vývoje (SSP2.45 a SSP5.85) a klimatických modelů, přičemž jsou agregovány i individuálně zobrazeny simulace regionálního modelu ALADIN-CLIMATE/CZ. Obrázek 2-12 a Obrázek 2-13 ilustrují dlouhodobé trendy průměrných odtokových výšek (průměrné roční a měsíční hodnoty), přičemž simulace ukazují: (i) Zvýšenou variabilitu odtoků mezi jednotlivými scénáři; (ii) Postupné snižování průměrných odtokových výšek v některých regionech, zejména po roce 2050.

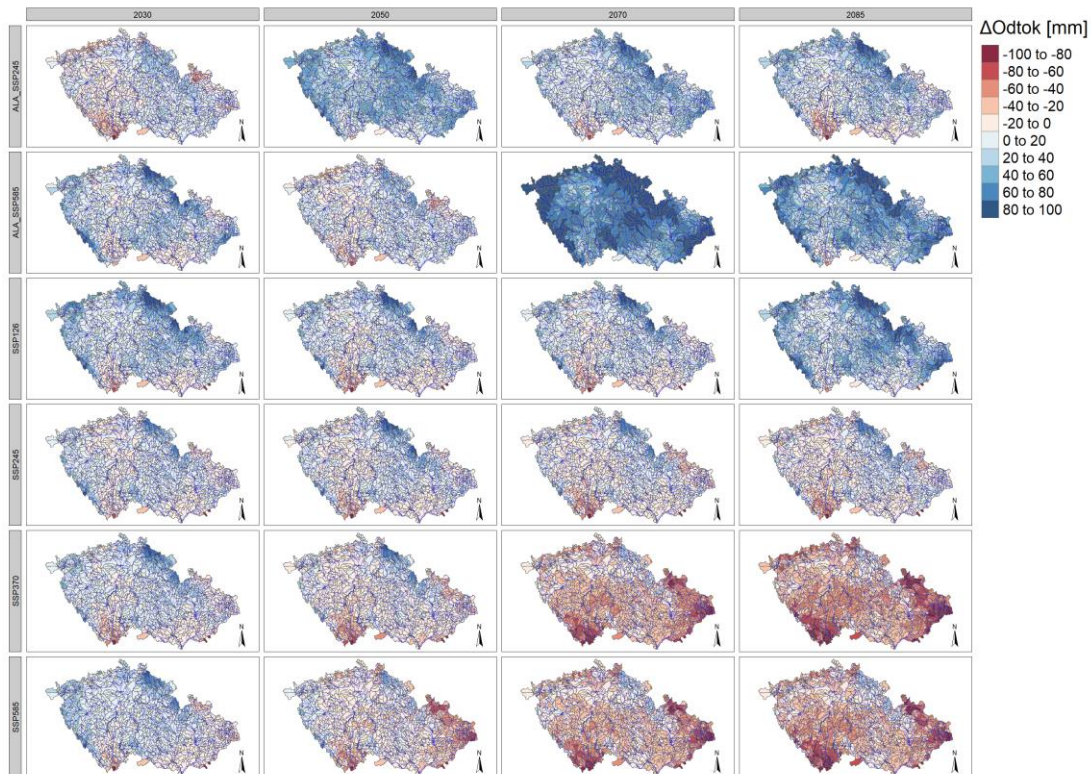


Obrázek 2-12 Vývoj průměrných ročních odtokových výšek dle jednotlivých scénářů (simulace jsou agregovány dle SSP – silné linie, simulace ALADIN – čárkovaná linie)



Obrázek 2-13 Vývoj průměrných měsíčních odtokových výšek dle jednotlivých scénářů SSP2.45 a SSP5.85 (simulace ALADIN jsou zvýrazněny)

Rozložení absolutních změn průměrných ročních průtoků (agregovány dle jednotlivých SSP scénářů, model ALADIN-CLIMATE/CZ je separátně) je zobrazeno na Obrázek 2-14.



Obrázek 2-14 Absolutní změny odtokových výšek na základě jednotlivých simulací klimatických modelů

### Očekávané trendy odtoků:

- Simulace ukazují **pokles průměrných ročních odtokových výšek** dle většiny simulací, který je způsoben zejména vyšší evapotranspirací v důsledku rostoucí teploty vzduchu.
- Regionální rozdíly jsou výrazné, přičemž některé oblasti vykazují vyšší variabilitu odtoků, zejména v důsledku sezónních změn (poklesy jsou významnější v rámci vegetačního období).
- **Regionální model ALADIN-CLIMATE/CZ:**
  - Tento model má tendenci simulovat mírně vyšší odtoky (především po roce 2050) než globální modely (GCM).

Vyhodnocení potvrzuje, že změna klimatu ovlivní hydrologický režim v České republice. Zjištění naznačují, že:

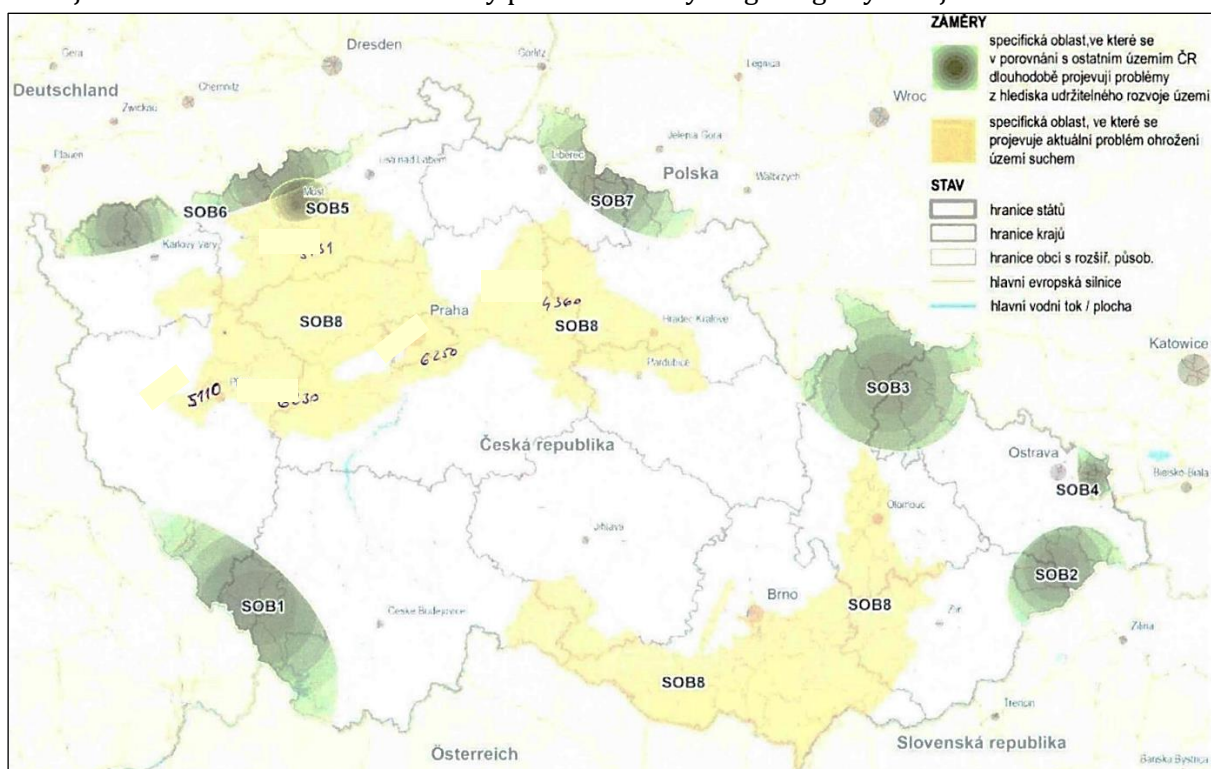
- Změny v odtocích a vodní bilanci budou velmi variabilní v čase i prostoru.
- Výraznější změny budou patrné po roce 2050, což odráží nejistoty spojené s emisními scénáři a socioekonomickým vývojem.
- Výsledky simulací slouží jako podklad pro další analýzy deficitních oblastí, návrhy adaptačních opatření a vstupují do modelu vodohospodářské bilance.

Další grafické výstupy dílčích bilančních veličin jsou uvedeny v příloze.

## 3. Deficitní oblasti

### 3.1 Deficitní oblasti: počátek řešení projektu

Protože oblasti s deficitními vodními zdroji byly v rámci WP 1 stanoveny až na přelomu 2023-24, pro první etapu řešení části WP 3 bylo nutno zájmové území výzkumu stanovit jiným způsobem. Po dohodě s odbornými garanty MŽP byl využit materiál „Politika územního rozvoje ČR“, který obsahuje tzv. specifické oblasti, ve kterých se projevuje aktuální problém ohrožení území suchem (viz Obrázek 3-1), a to na základě vyhodnocení hydrologických bilančních dat primárně na podzemních vodách. Z toho důvodu jsou hranice těchto oblastí vedeny po hranicích hydrogeologických rajonů.



Obrázek 3-1 Specifické oblasti, ve kterých se projevuje aktuální problém ohrožení území suchem (oblasti označené žluté SOB8). Převzato z dokumentu MMR „Politika územního rozvoje ČR“

V rámci takto vymezených specifických oblastí byla po dohodě se zástupci MŽP stanovena a odsouhlasena zájmová území pro řešení WP 3, tzv. deficitní oblasti 1, 2 a 3. Tyto oblasti, tak jak byly dále definovány, se s velkou pravděpodobností – na základě odborného odhadu se zahrnutím veškerých dostupných a dnes známých aspektů a dat (včetně rozpracovaných podkladů z WP1 a dříve řešených projektů).

Vymezené deficitní oblasti pro účely WP 3 splňovali následující aspekty:

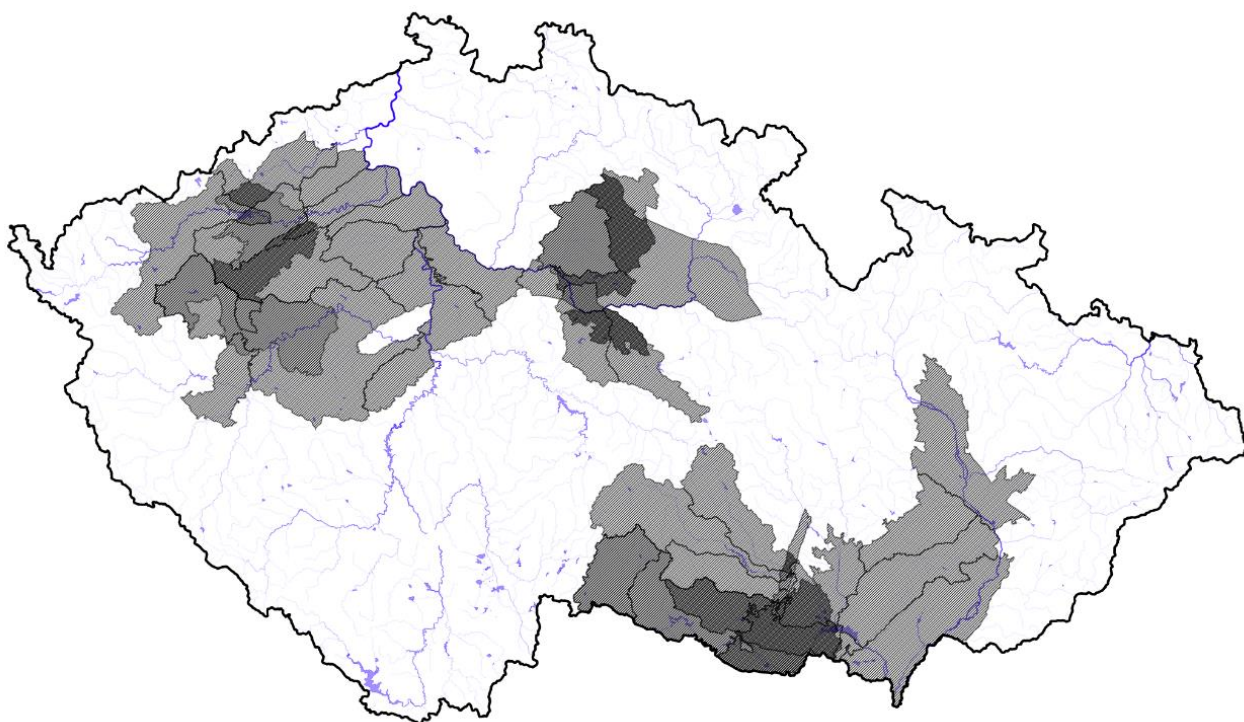
- Byly zvoleny 3 oblasti, které jsou společné pro všechny dílčí cíle WP 3, tzn., že na těchto územích lze vést výzkum všech dílčích cílů.

Program **Prostředí pro život**

- Deficitní oblasti jsou definovány jednak na základě hydrogeologických rajonů (jak byla původně definována specifická území v materiálu MMR), pro realizované hydrologické výzkumy však bylo nutno území vymezit i podle hranic hydrologických (orografických) povodí, jak vyplývá z Obrázek 3-2.
- Deficitní oblasti pro účely WP3 proto nepokrývají celé území specifických oblastí ve smyslu Obrázek 3-2, ale jen jejich vybranou část. Kritérii výběru byly možnost realizace výzkumů ve všech zahrnutých dílčích cílech, informace o dopadech sucha z dalších řešených projektů (např. projekt Sucho, systém HAMR), a v neposlední řadě i stanovení takové plochy území k řešení, které je technicky zvládnutelné v rámci technických, finančních i časových možností Centra VODA.

Finálně tak byly stanoveny pro WP 3 tři deficitní oblasti:

- Deficitní oblast 1 Západní Čechy
- Deficitní oblast 2 Východní Čechy
- Deficitní oblast 3 Jižní Morava



Obrázek 3-2 Vymezení deficitních oblastí na počátku řešení projektu



### 3.2 Regionalizace sucha ORP

Studie se zabývala regionální charakterizací sucha na úrovni obcí s rozšířenou působností (ORP) a byla vytvořena na základě požadavků Ministerstva životního prostředí, Ministerstva pro místní rozvoj a Ministerstva zemědělství. Aktualizace předchozí verze studie z roku 2020 byla provedena s využitím nových poznatků získaných z projektů TA ČR (SS02030027, SS02030040) a BV III/1-VS (VI20192022159). Výsledky projektů a jejich výstupy byly zpřístupněny na webových portálech jednotlivých projektů a na platformě suchovkrajine.cz, která sdružuje materiály týkající se problematiky sucha a nedostatku vody v ČR.

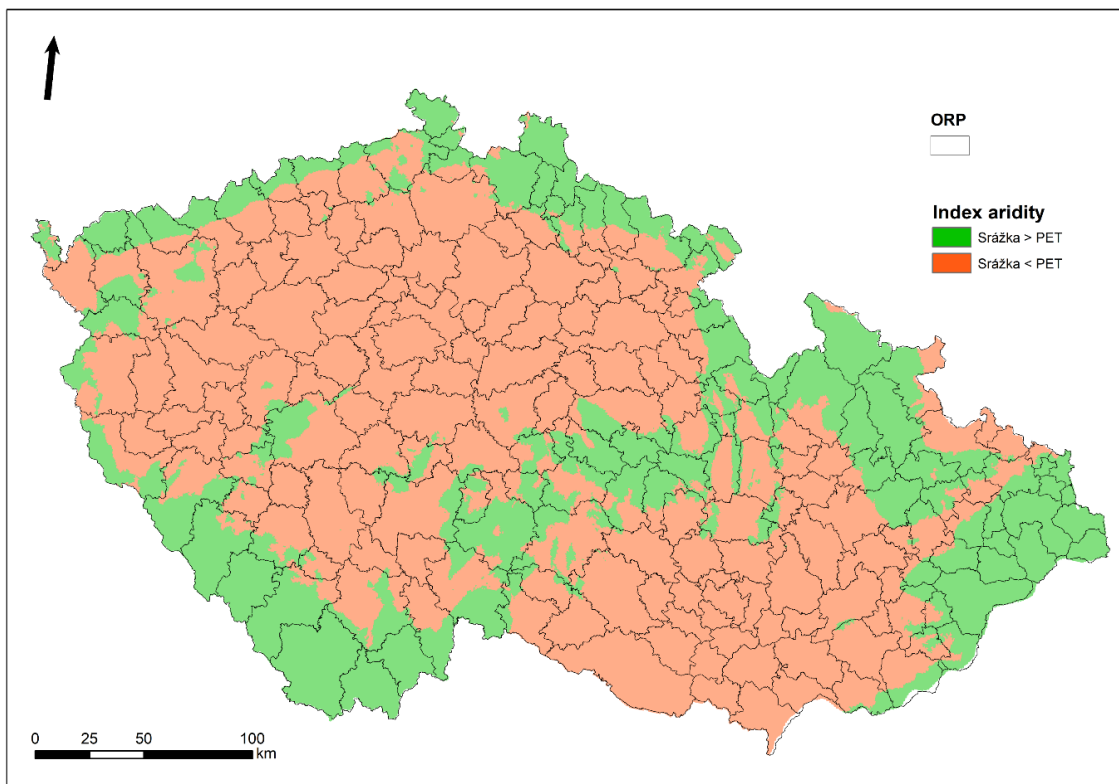
Modelování dopadů klimatické změny bylo realizováno s využitím scénáře HadGEM-ES2, který reprezentuje střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v ČR k období kolem roku 2050. Tento scénář byl dříve zpracován pro podniky povodí a následně aplikován v rámci dalších projektů. Mapové podklady zahrnovaly mimo jiné zobrazení přírodního sucha na základě klimatických podmínek z referenčního období 1981–2010. Data byla agregována na úroveň ORP a zaměřila se na oblasti s nízkými srážkovými úhrny a zvýšenou potenciální evapotranspirací.

Další mapové výstupy zahrnovaly index aridity (Obrázek 3-3), který byl vypočten jako poměr srážkového úhrnu a potenciální evapotranspirace ve vegetačním období (duben–září) za roky 2014–2020. Tento index umožnil klasifikaci oblastí podle bilanční rovnováhy: na oblasti s přebytkem (srážky převyšovaly evapotranspiraci) a oblasti deficitní (srážky byly nižší než evapotranspirace). Hodnocení se zaměřilo především na „suchá“ období a měsíce s vyššími teplotami. Data byla zpracována na gridu o rozlišení 500 × 500 m a pocházela z denních časových řad, přičemž klíčové výpočty vznikly v rámci projektu TA ČR PERUN a Centra Voda.

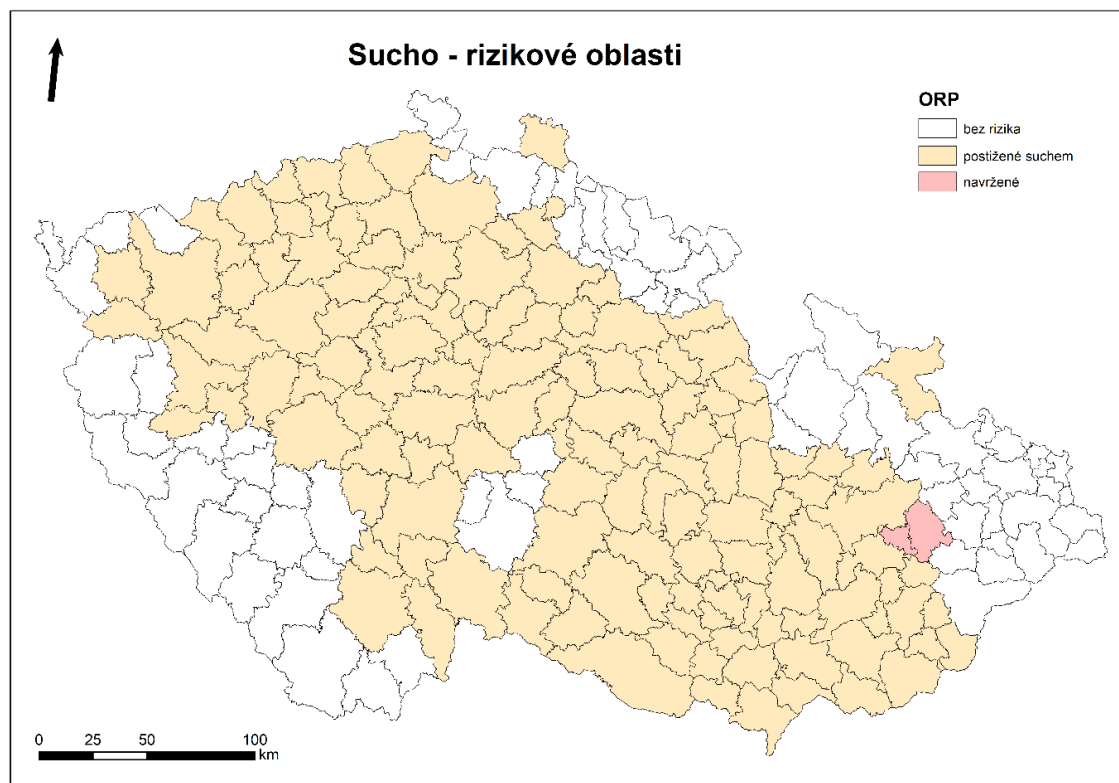
Výsledky studie reflektovaly použité vstupní podklady, hodnocená časová období a aplikované metodologické přístupy. S ohledem na tyto faktory se mezi jednotlivými hodnoceními mohly vyskytovat rozdíly, zejména v závislosti na míře detailu a zvolených přístupech k řešení.

Dále byly využity mapové kompozice, které obsahují hydrogeologické rajony a hydrologická povodí, které jsou rizikové z hlediska dopadu sucha na užívání vod. Lokality byly určeny pomocí bilančních metod posuzujících dlouhodobě dostupné zdroje vody vzhledem k současným požadavkům na užívání vod, zejména odběry. Lokality byly klasifikovány jako rizikové, potenciálně rizikové (zejména tam, kde je nižší spolehlivost hodnocení) a nerizikové.

Výsledná regionalizace, která vznikla na základě analýzy podkladů v roce 2020, odborným posouzením a zařazením nových výstupů projektů, navrhuje zařazení dalších 2 ORP. Navržená ORP se nacházejí v oblasti, kde dle projektu II, může dojít k omezenému zajištění odběrů pro současné podmínky. Tato ORP se také nacházejí v oblasti, které bylo v období suché periody (2014-2020) bilančně záporné (na základě klimatologické vodní bilance vegetačního období). Výsledná mapa je zobrazena na Obrázek 3-4.



Obrázek 3-3 Rozdělení České republiky na základě indexu aridity



Obrázek 3-4 Regionalizace sucha – ORP k roku 2023

### 3.3 Stanovení deficitních oblastí

V kapitole jsou zobrazeny deficitní oblasti vodního režimu krajiny z pohledu hydro-klimatologického, bez vodohospodářského aspektu (vodohospodářským aspektem se zabývá Vsouhrn WP1). Na základě analýz vstupních veličin byla zvolena jednoduchá interpretace deficitních oblastí na základě tzv. klimatologické vodní bilance, která je dána vztahem:

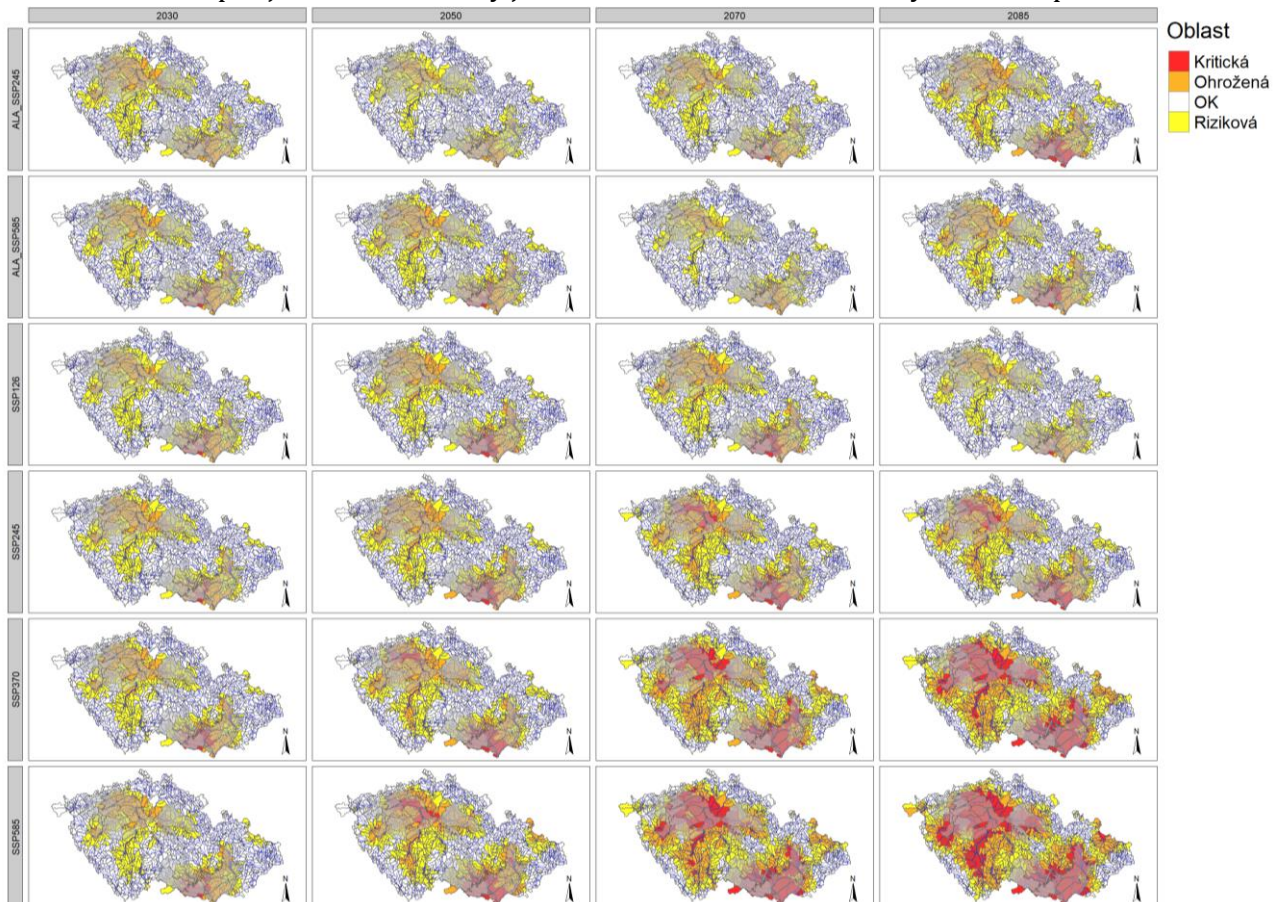
$$B = P - PET,$$

kde:  $B$  je klimatologická vodní bilance,  $P$  srážkový úhrn,  $PET$  potenciální evapotranspirace.

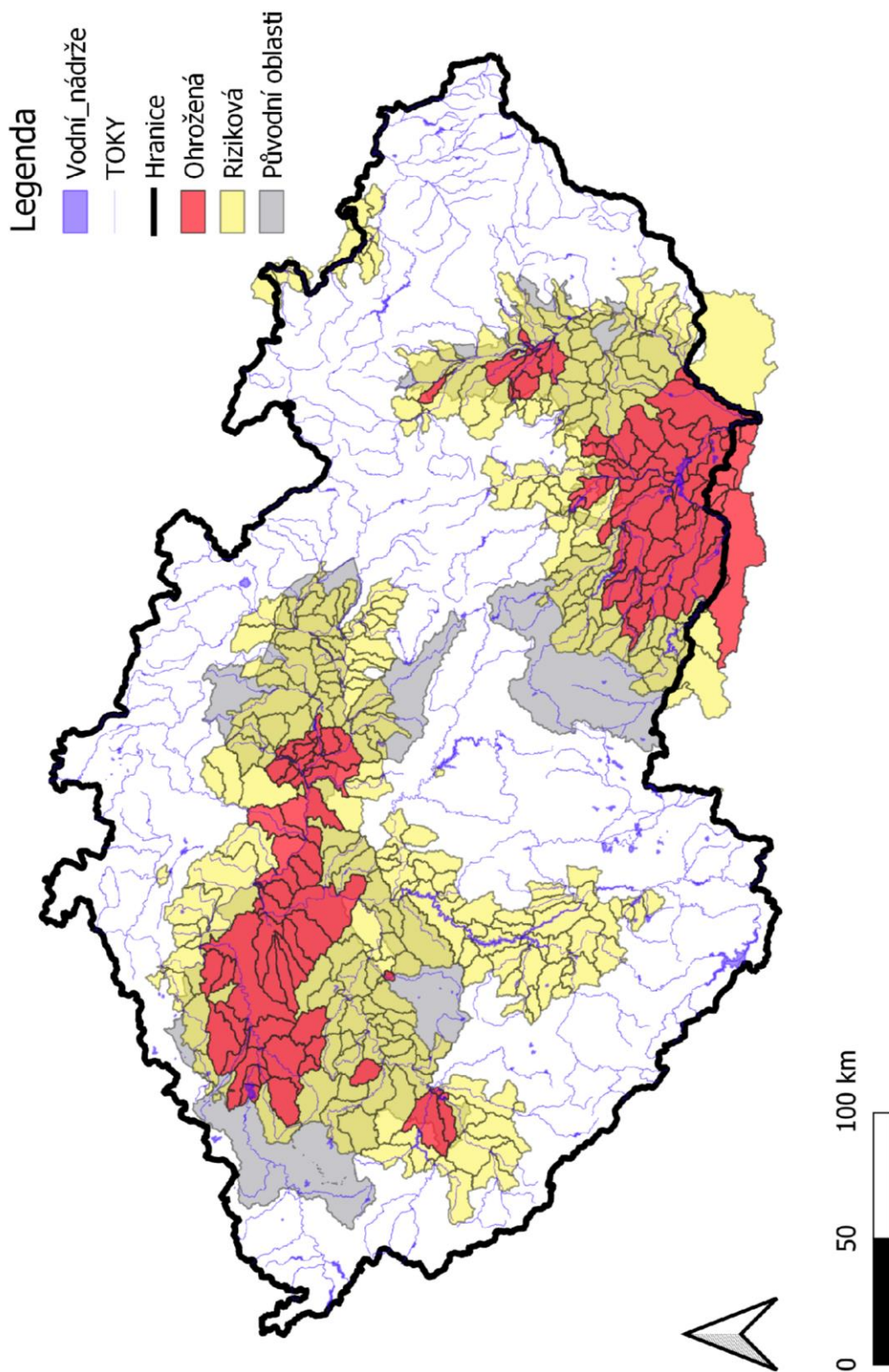
Bilance byla vypočtena pro současné a výhledové podmínky na základě výše zmíněných simulací, agregována a rozdělena do jednotlivých kategorií:

- 1) Bezproblémová oblast:  $B > 0$  mm
- 2) Riziková oblast:  $0 \text{ mm} > B > -100$  mm
- 3) Ohrožená oblast:  $-100 \text{ mm} > B > -200$  mm
- 4) Kritická oblast:  $B < -200$  mm.

Výsledné rozdělení pro jednotlivé varianty je zobrazeno na Obrázek 3-5 a výsledná mapa Obrázek 3-6.



Obrázek 3-5 Hodnocení deficitních oblastí na základě jednotlivých simulací klimatických modelů (šedé polygony udávají neaktualizovanou vrstvu deficitních oblastí)



Obrázek 3-6 Výsledné rozdělení deficitních oblastí

## 4. Databáze

Na základě výstupů<sup>2</sup> projektů TA ČR („Centrum Voda“ a „PERUN“) byla vytvořena databáze HYMOD-KZ, která je dostupná na <https://shiny.vuv.cz/HYMOD-KZ/>. Databáze běží na technice VÚV TGM v Praze. Cílem databáze je poskytnout uživatelům ucelené informace o dostupnosti vody (přirozeného vodního režimu) pro současné a výhledové podmínky s důrazem na jednotlivé simulace klimatických modelů.

### 4.1 Technická specifikace

Databáze „HYMOD-KZ“ byla vytvořena v programovacím jazyce R, konkrétně v jeho verzi 4.3.1. Interaktivní webové rozhraní aplikace je zajištěno prostřednictvím open source nadstavby ve formě balíčků Shiny (verze 1.7.5.1) a flexdashboard (verze 0.6.2), kde Shiny zajišťuje funkcionalitu uživatelského rozhraní (tj. obsahuje veškeré funkce a výpočty, a i instrukce potřebné pro jeho rozvržení a vzhled), zatímco flexdashboard umožňuje provázání veškerých Shiny komponent formou jednoho RMarkdown dokumentu. Dále aplikace užívá nástrojů ve formě balíčků, jako jsou tidy (verze 1.3.0) a dplyr (verze 1.1.2), sloužících pro úpravu a transformaci dat, sf (verze 1.0-13), umožňující práci s OpenGIS standardem geografických dat Simple Features a Leaflet (verze 2.2.0) umožňující zobrazení prostorových dat formou interaktivních map.

### 4.2 Úvodní strana

Rozcestník pro databázi je přes úvodní stranu (Obrázek 4-1), na které je zobrazeno:

1. Logo a název projektu a logo databáze.
2. Sekce s veřejnou databází: Obsahuje odkazy na sekce, jako jsou **Hydrologická bilance** a **Deficitní oblasti**, které uživatelům poskytují přístup k relevantním informacím a datům.
3. Kontaktní informace: Na pravé straně jsou uvedeny kontaktní informace na řešitele včetně jejich institucí a umístění.
4. Anotace projektu.



Veřejná  
databáze:

Hydrologická bilance

Deficitní oblasti

Obrázek 4-1 Rozdělovník úvodní strany databáze HYMOD-KZ

<sup>2</sup> zabývajících se modelováním dopadů klimatické změny na vodní režim

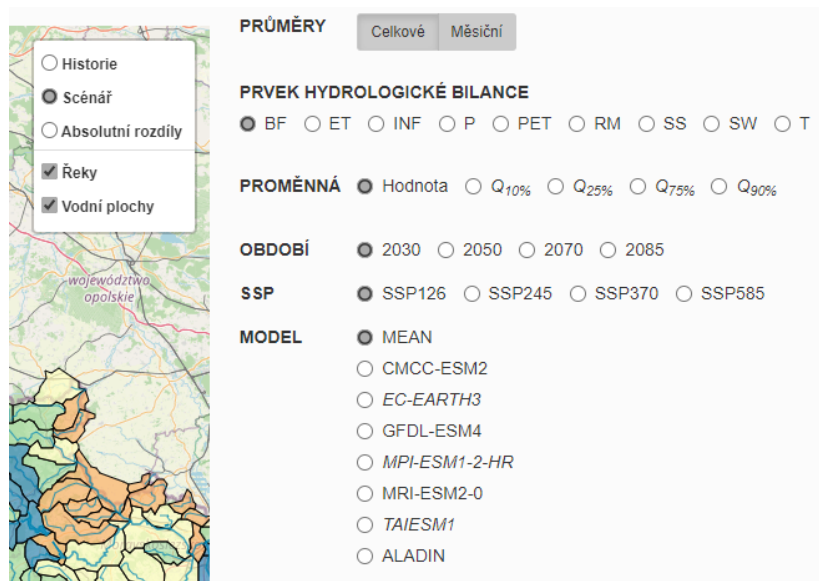
### 4.3 Hydrologická bilance

Komponenta „Hydrologická bilance“ zobrazuje souhrn základních hydro - klimatologických veličin pro jednotlivé vodní útvary. Na Obrázek 4-2 je znázorněno uživatelské rozhraní s různými možnostmi výběru. Uživatel si může vybrat různé proměnné:

- BF – základní odtok [mm],
- ET – aktuální evapotranspirace [mm],
- INF - infiltrace [mm],
- P – srážkový úhrn [mm],
- PET – potenciální evapotranspirace [mm],
- RM – modelovaný odtok [mm],
- SS - zásoba vody ve sněhu [mm],
- SW – zásoba vody v půdě [mm],
- T – teplota vzduchu [°C].

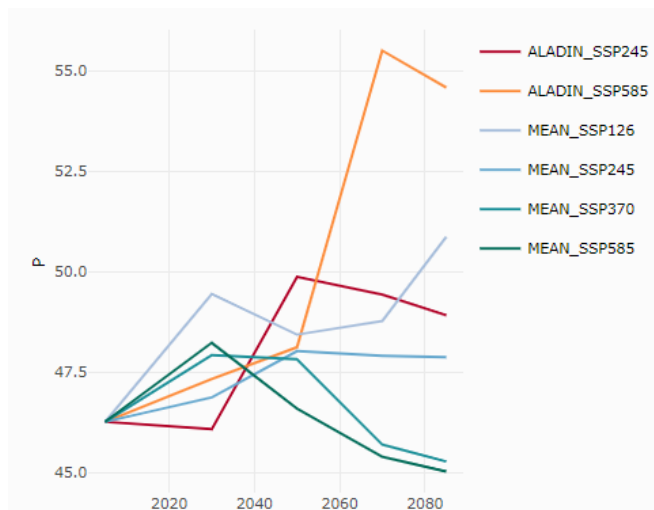
Hodnoty jsou agregovány do měsíčních (záložka “Měsíční”) a ročních hodnot (záložka “Celkové”) a dále odvozených základních statických veličin, jako je průměr (“Hodnota”) či dílčí kvantily (10%, 25%, 75% a 95%). V rámci aplikace je dále možné vybírat mezi různými obdobími (2030, 2050, 2070, 2085) a různými socioekonomickými cestami (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585), což naznačuje možné budoucí vývojové scénáře.

Pod tímto výběrem jsou uvedeny modely klimatu, jako je MEAN (průměr ze všech modelů), CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, TAIESM1 a ALADIN (ALADIN-CLIMATE/CZ), které představují různé klimatické modely používané pro simulace. Dále je možné zobrazovat hodnoty pro současnost 1991–2020, „Historie“), hodnoty scénářů („Scénář“) k rokům 2030, 2050, 2070 a 2085 a absolutní rozdíly mezi výhledem a současností pro zvolenou veličinu.



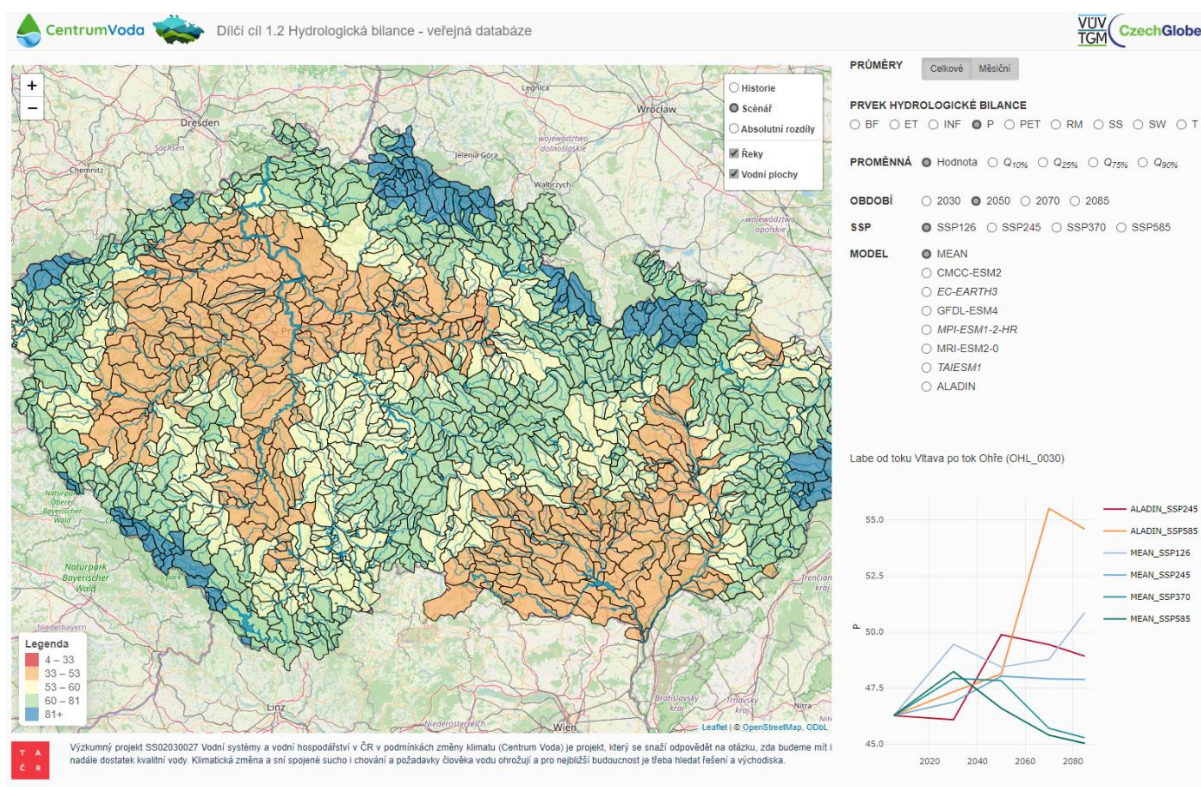
Obrázek 4-2 Rozdělovník databáze HYMOD-KZ: možnosti výběru veličin a časového výhledu v komponentě „Hydrologická bilance“

Graf (Obrázek 4-3) zobrazuje vývoj zvolené veličiny, kvantilu a vodní útvar dle jednotlivých SSP scénářů a simulací modelem ALADIN-CLIMATE/CZ pro jednotlivé časové horizonty.



Obrázek 4-3 Vývoj zvolené veličiny ve vodním útvaru dle jednotlivých SSP scénářů a modelu ALADIN-CLIMATE/CZ

Na Obrázek 4-4 je potom celková kompozice výstupu, která se skládá z mapového okna a grafů vývoje na základě zvolené kombinace (v tomto případě: absolutní hodnoty srážkového úhrnu pro variantu: výhled k roku 2050, SSP126 a MEAN (průměr ze všech simulací)).

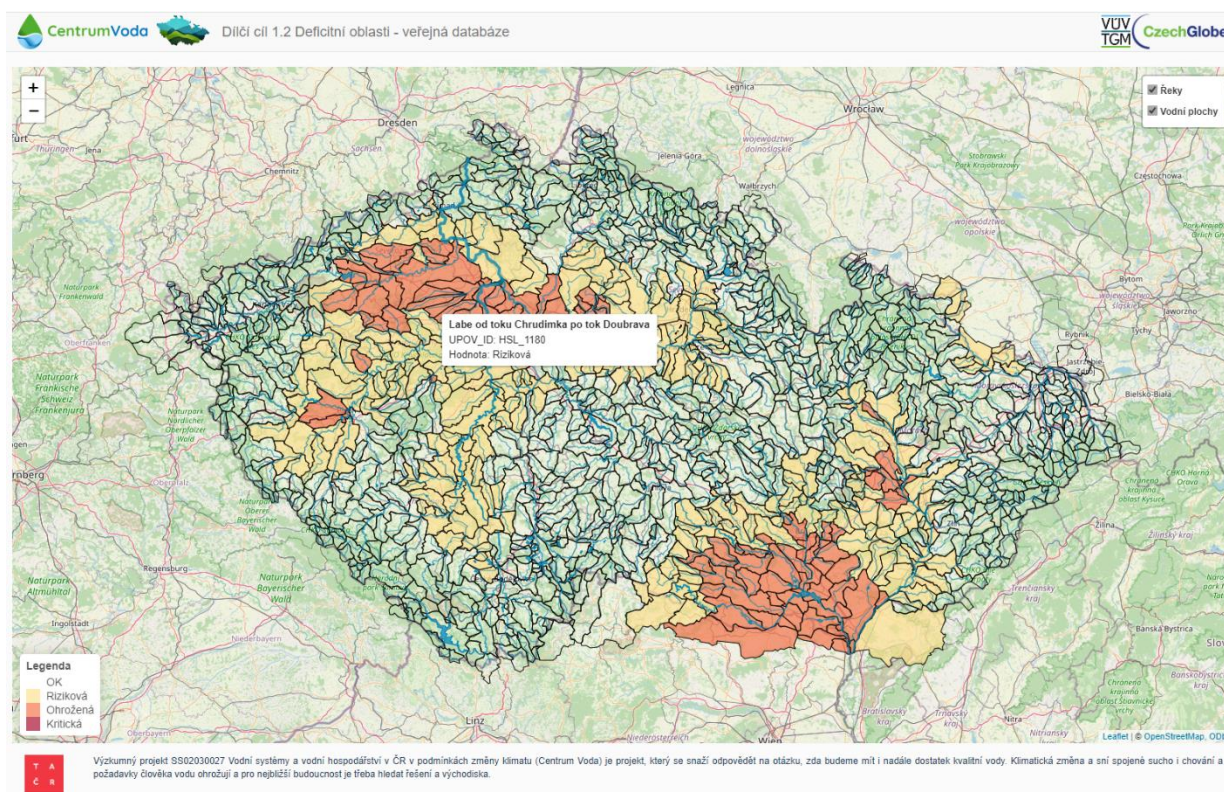


Obrázek 4-4 Srážkový úhrn pro variantu: výhled k roku 2050, SSP126 a MEAN (aritmetický průměr ze všech simulací)

## 4.4 Deficitní oblasti

Na počátku řešení (rok 2020) projektu Centrum Voda byly definovány tzv. deficitní oblasti České republiky, které byly stanoveny odborným posouzením na základě předchozích studií zabývajících se dopadem změny klimatu na vodní režim a vymezením problematických hydrogeologických rajónů. V rámci řešení projektu Centrum Voda byly tyto oblasti upřesněny na základě využití modelování hydrologické bilance v rozlišení vodních útvarů a aktualizaci výstupů z klimatických modelů. V rámci deficitních oblastí by se měla navrhnout adaptační opatření a jejich dopad na vodní režim dané lokality by měl být vyhodnocen.

Na základě zmíněné metodiky výpočtu deficitních oblastí je v komponentě „Deficitní oblasti“ zobrazena mapa (Obrázek 4-5) České republiky s vymezením aktualizovaných oblastí. Mapa by měla být v průběhu řešení (do konce roku 2024) doplněna o vrstvu, která bude poskytovat i informace o deficitních oblastech z vodohospodářského pohledu. Pro finalizaci mapy byly využity také podklady dle výhledů jednotlivých simulací.



Obrázek 4-5 Vyhodnocené deficitní oblasti



## 5. Literatura

DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., and GUPTA, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*, 158(3-4), 265-284.

GEORGIEVOVÁ, I., HANEL, M., PAVLÍK, P., & VIZINA, A. (2023). Streamflow simulation in poorly gauged basins with regionalised assimilation using Kalman filter. *Journal of Hydrology*, 620, 129373.

MÁCA, P., VIZINA, A., and HORÁČEK, S. (2013). The parameter optimisation of hydrological model BILAN using the SCDE method. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 55(4), 1-4.

MAŠEK, J., 2023. Klimatická konfigurácia modelu ALADIN na ČHMÚ. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha: ČHMÚ.

MARIANI, V. C., LUVIZOTTO, L. G. J., GUERRA, F. A., & dos SANTOS COELHO, L. (2011). A hybrid shuffled complex evolution approach based on differential evolution for unconstrained optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 217(12), 5822-5829.

MARKONIS, Y., HANEL, M., MÁCA, P., KYSELÝ, J., & COOK, E. R. (2018). Persistent multi-scale fluctuations shift European hydroclimate to its millennial boundaries. *Nature Communications*, 9(1), 1767.

MEITNER, J., ŠTĚPÁNEK, P., SKALÁK, P., DUBROVSKÝ, M., LHOTKA, O., PENČEVOVÁ, R., ... & TRNKA, M. (2023). Validation and selection of a representative subset from the ensemble of EURO-CORDEX EUR11 regional climate model outputs for the Czech Republic. *Atmosphere*, 14(9), 1442.

MELIŠOVÁ, E., VIZINA, A., STAPONITES, L. R., & HANEL, M. The Role of Hydrological Signatures in Calibration of Conceptual Hydrological Model. *Water*, 2020, 12(12), 3401.

MERESA, H., TISCHBEIN, B., & MEKONNEN, T. (2022). Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: observations from CMIP6 and hydrological models. *Natural Hazards*, 111(3), 2649-2679.

NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.

O'NEILL, B. C., TEBALDI, C., VAN VUUREN, D. P., EYRING, V., FRIEDLINGSTEIN, P., HURTT, G., ... & SANDERSON, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.

POTOPOVÁ, V., TRNKA, M., VIZINA, A., SEMERÁDOVÁ, D., BALEK, J., CHAWDHERRY, M. R. A., ... & CLOTHIER, B. (2022). Projection of 21st century irrigation water requirements for sensitive agricultural crop commodities across the Czech Republic. *Agricultural Water Management*, 262, 107337.

PRCHALOVÁ, H., VYSKOČ, P., VIZINA, A., & NOVÁKOVÁ, H. (2022). Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 64(5), 22-31.

Storn, R., and Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.

SU, B., HUANG, J., MONDAL, S. K., ZHAI, J., WANG, Y., WEN, S., ... & LI, A. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250, 105375.

ŠTĚPÁNEK, P. a kol. Očekávané klimatické podmínky v České republice. 2019. Vydáno v rámci projektu: „SustES – Adaptační strategie pro udržitelnost ekosystémových služeb a potravinové bezpečnosti v nepříznivých přírodních podmínkách“ (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000797). ISBN. 978-8-87902-28-8.

TALLAKSEN, L. M., & VAN LANEN, H. A. (eds.). (2004). *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*.

TRNKA, M., VIZINA, A., HANEL, M., BALEK, J., FISCHER, M., HLAVINKA, P., .. & 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., HANEL, M. a kol. Střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v České republice. *Zprávy pro státní podniky povodí*. Praha: VÚV TGM v. v. i., 2019.

VIZINA, A., HANEL, M., TRNKA, M., DAÑHELKA, J., GREGORIEOVÁ, I., PAVLÍK, P., & HEŘMANOVSKÝ, M. (2018). HAMR: Online drought management system—operational management during a dry episode. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 60(5), 22-28.

VIZINA, A., HORÁČEK, S., & HANEL, M. (2015). Recent Developments of the BILAN Model. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 57(4–5), 7-10.

VIZINA, A., VYSKOČ, P., KOŽÍN, R., & NOVÁKOVÁ, H. (2023). Potenciál chráněných území pro akumulaci povrchových vod pro zmírnění dopadů klimatické změny na zásobování pitnou vodou. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 65(1), 32–41.

VRUGT, J. A., TET BRAAK, C. J. F., DIKS, C. G. H., ROBINSON, B. A., HYMAN, J. M., and HIGDON, D. (2009). Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive

T A

Č R



Program **Prostředí pro život**

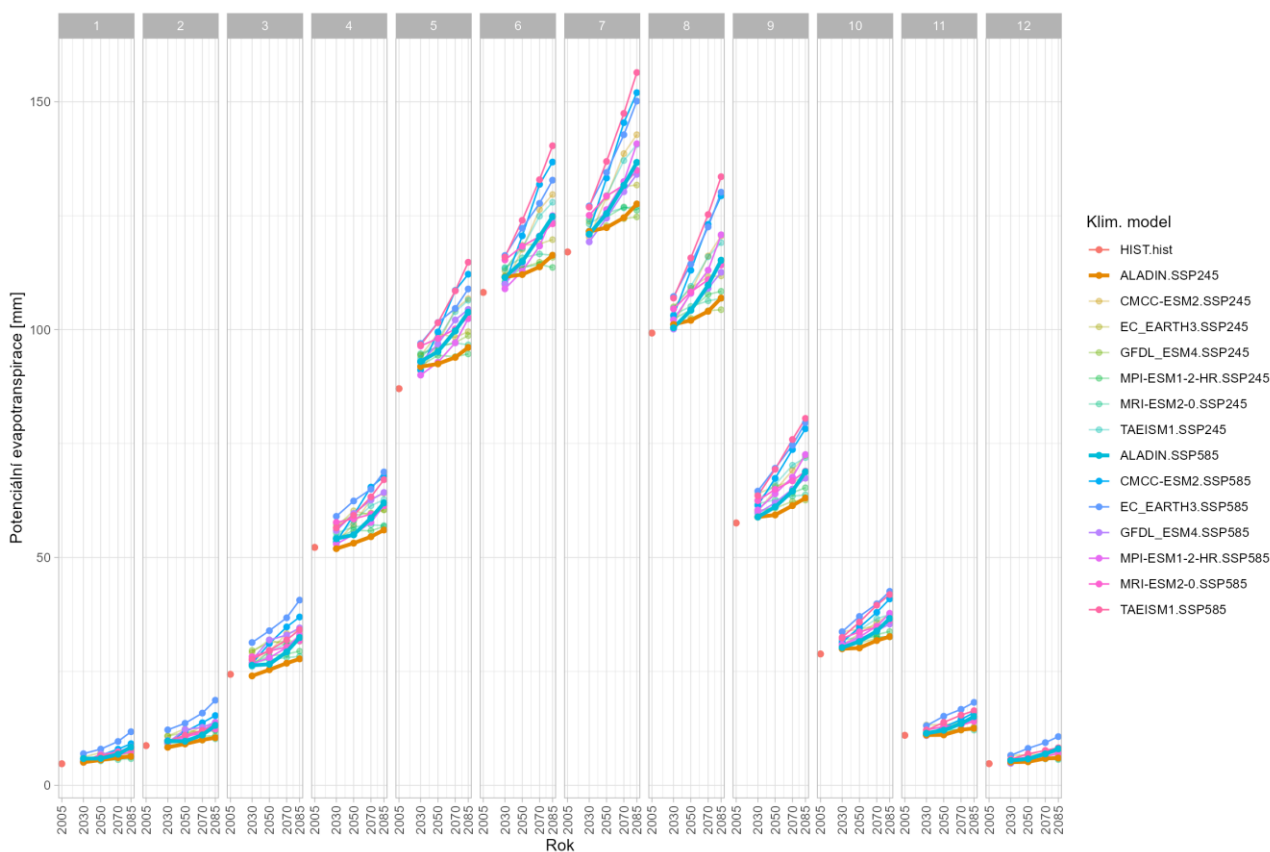
randomized subspace sampling. International journal of nonlinear sciences and numerical simulation, 10(3), 273-290.

ZAMBRANO-BIGIARINI, M. (2020). Package 'hydroGOF'. Goodness-of-fit Functions for Comparison of Simulated and Observed.

## 6. Přílohy

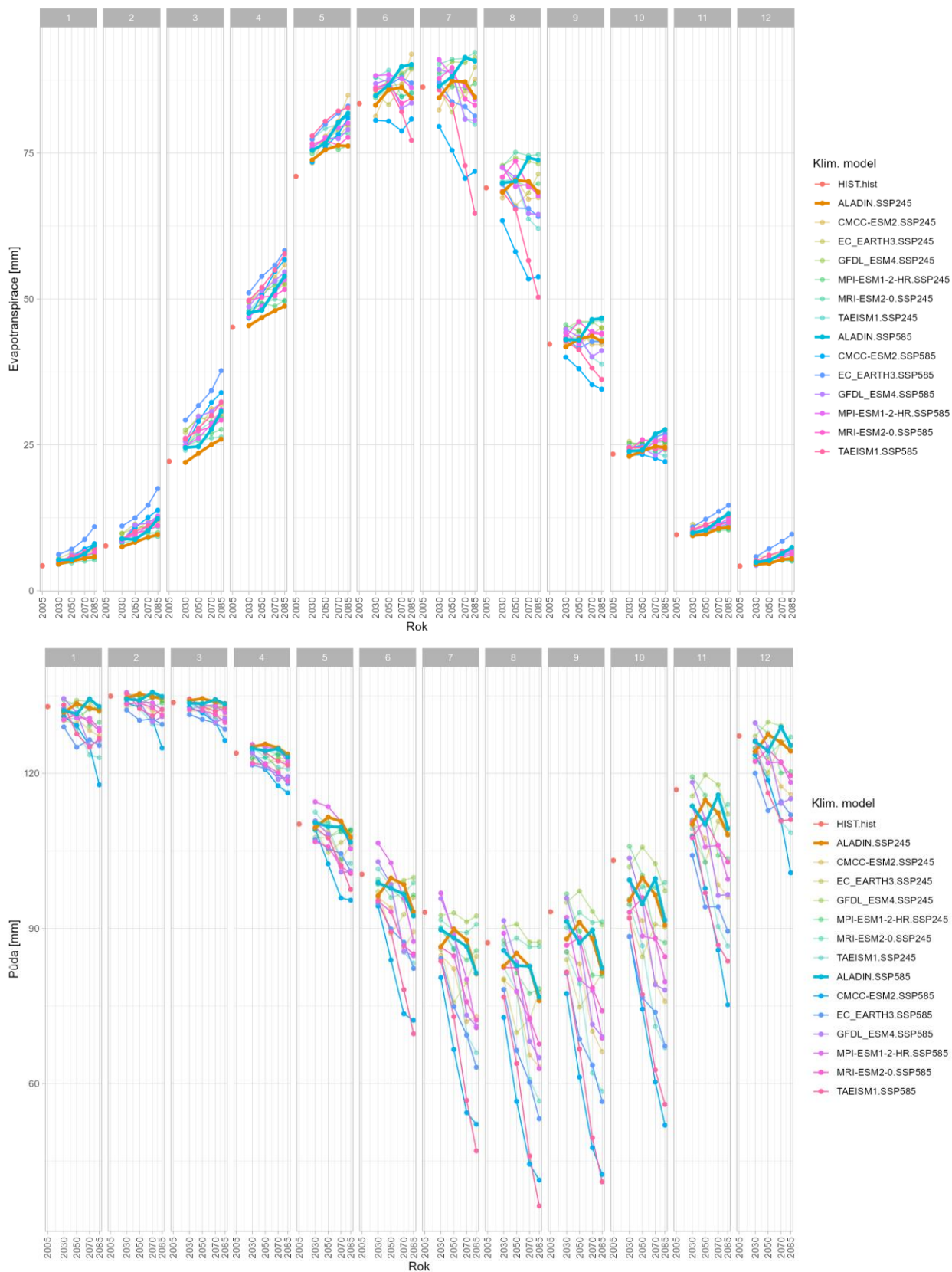
V přílohách jsou uvedeny souhrnné informace pro dílčí veličiny hydrologické bilance: potenciální evapotranspiraci, aktuální evapotranspiraci, zásobě vody v půdě, zásoby vody ve sněhu, základní odtok a průměrný odtok (včetně 10 a 90 procentního kvantilu). V mapových kompozicích jsou uvedeny relativní změny odtoku (výhled/současnost) v jednotlivých měsících. Podrobnější informace jsou dostupné v rámci databáze.

### 6.1 Hydrologická bilance



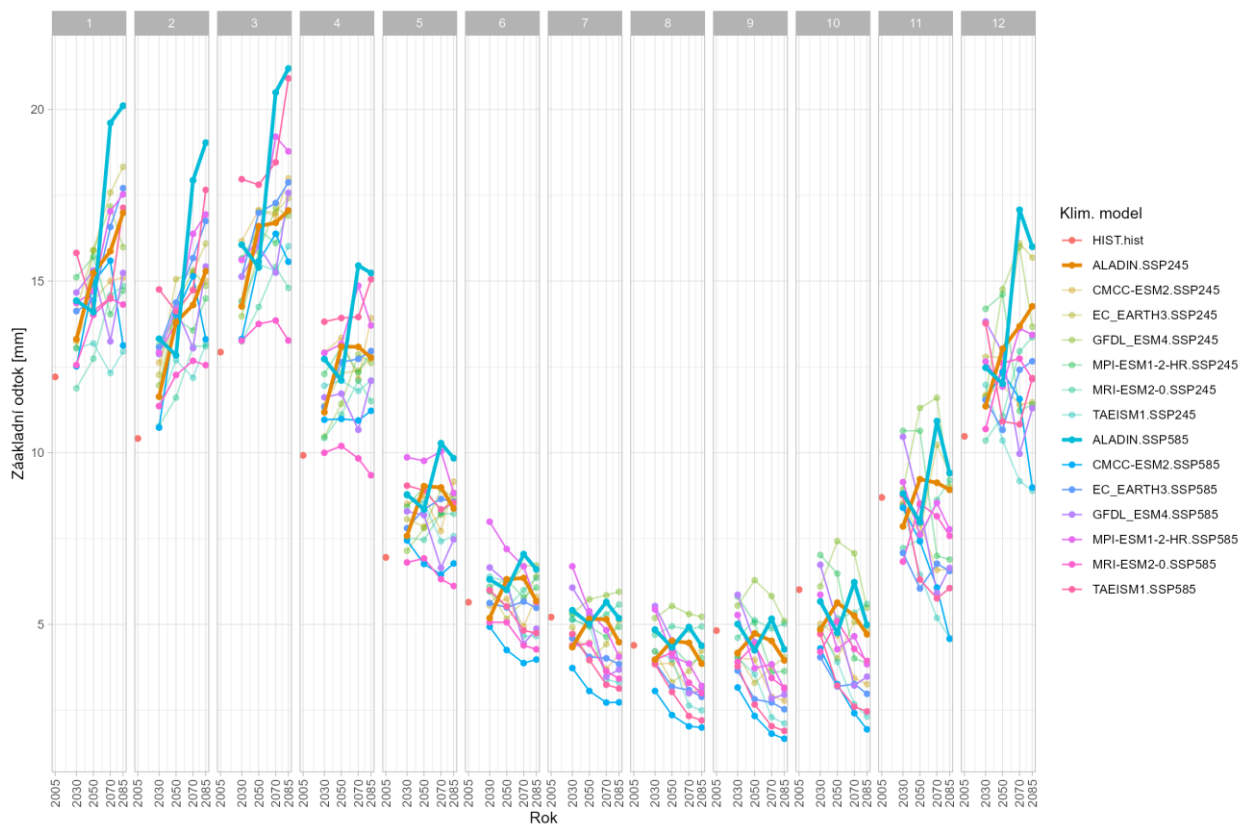
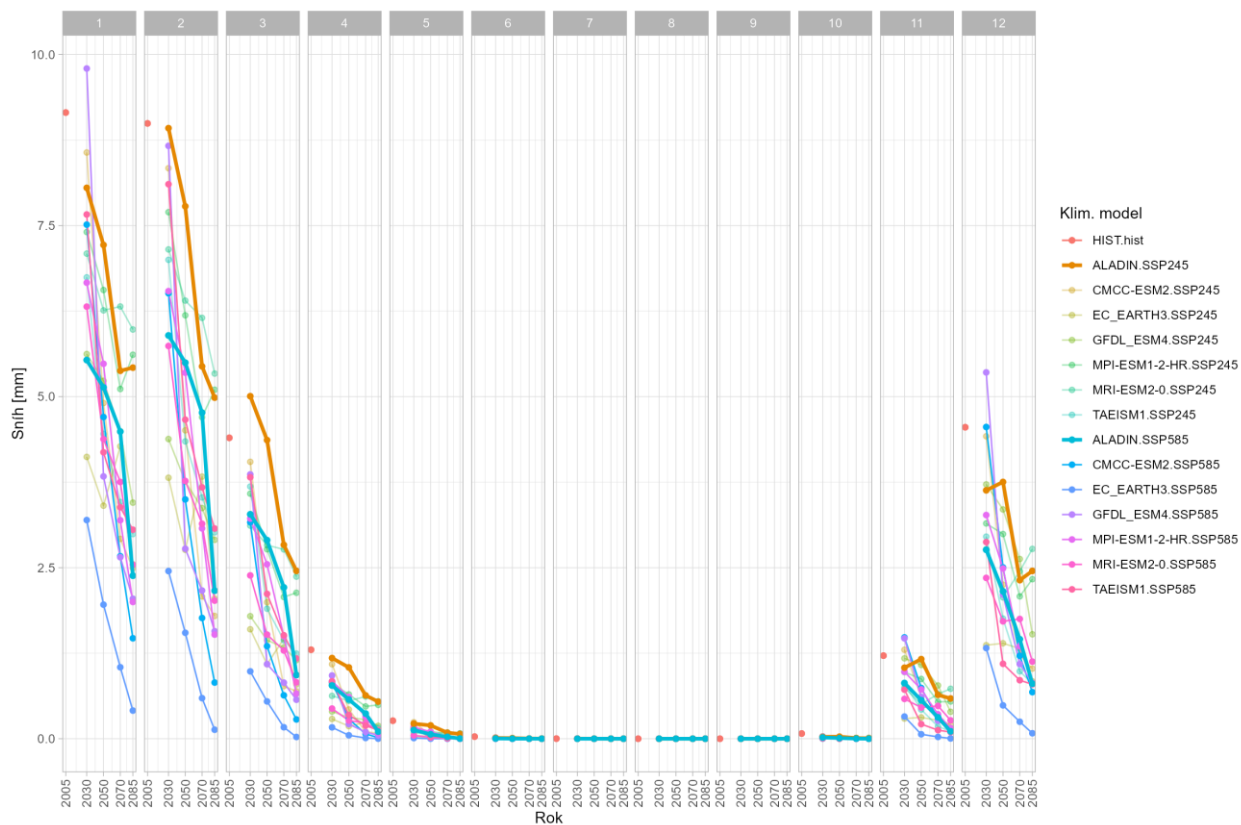


Program Prostředí pro život



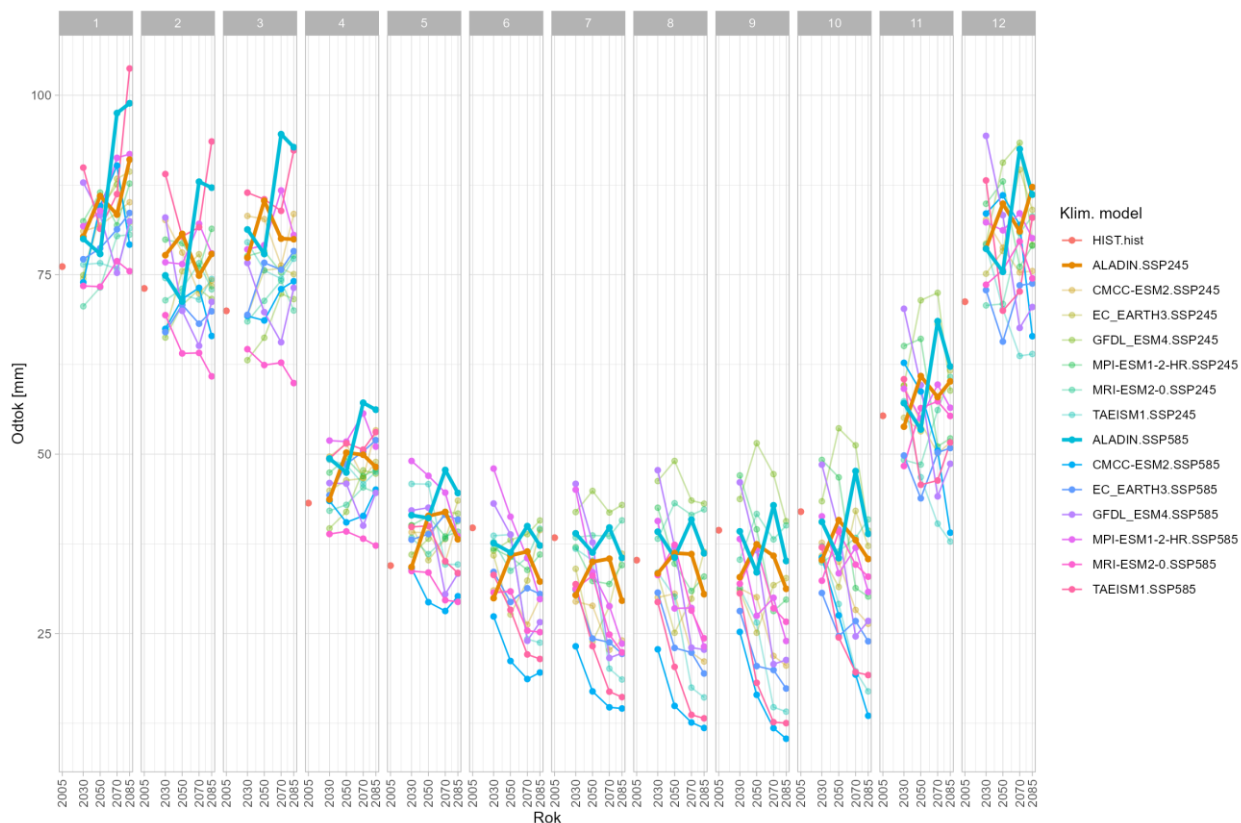
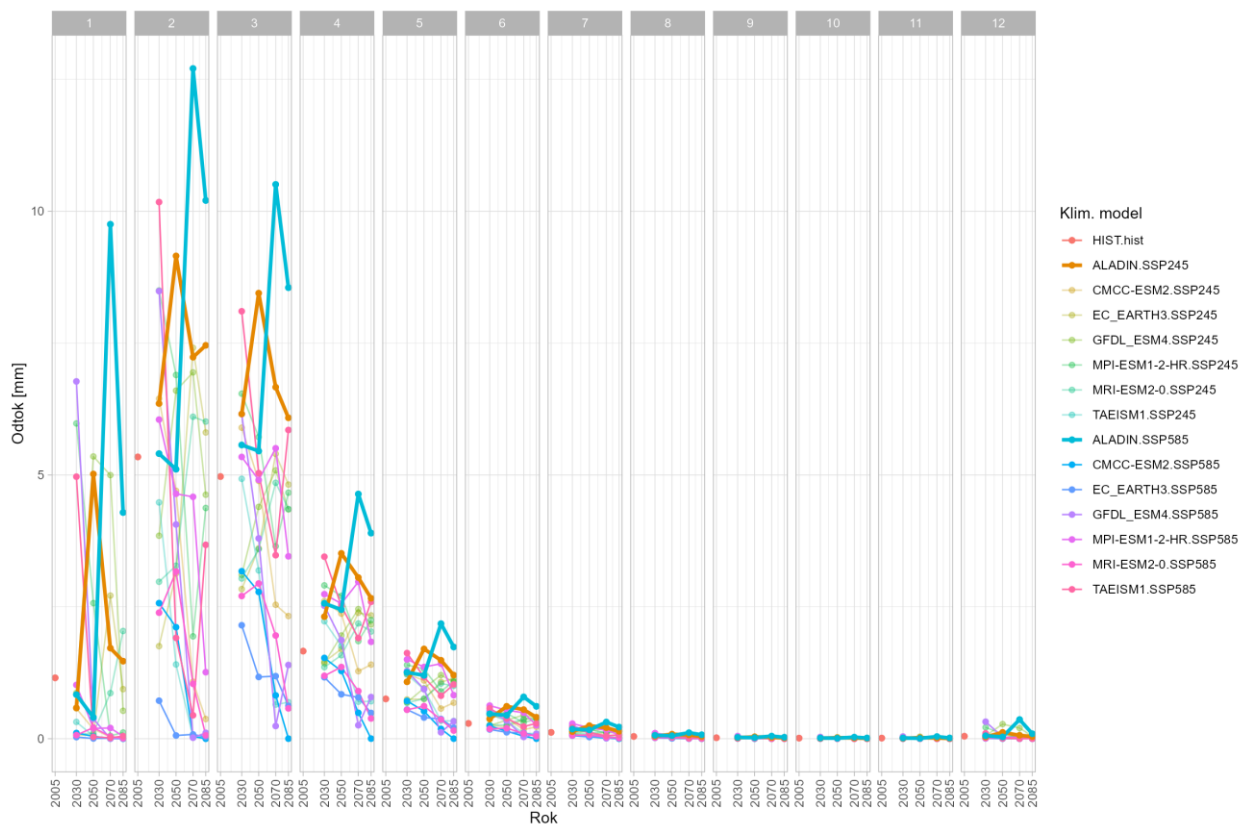


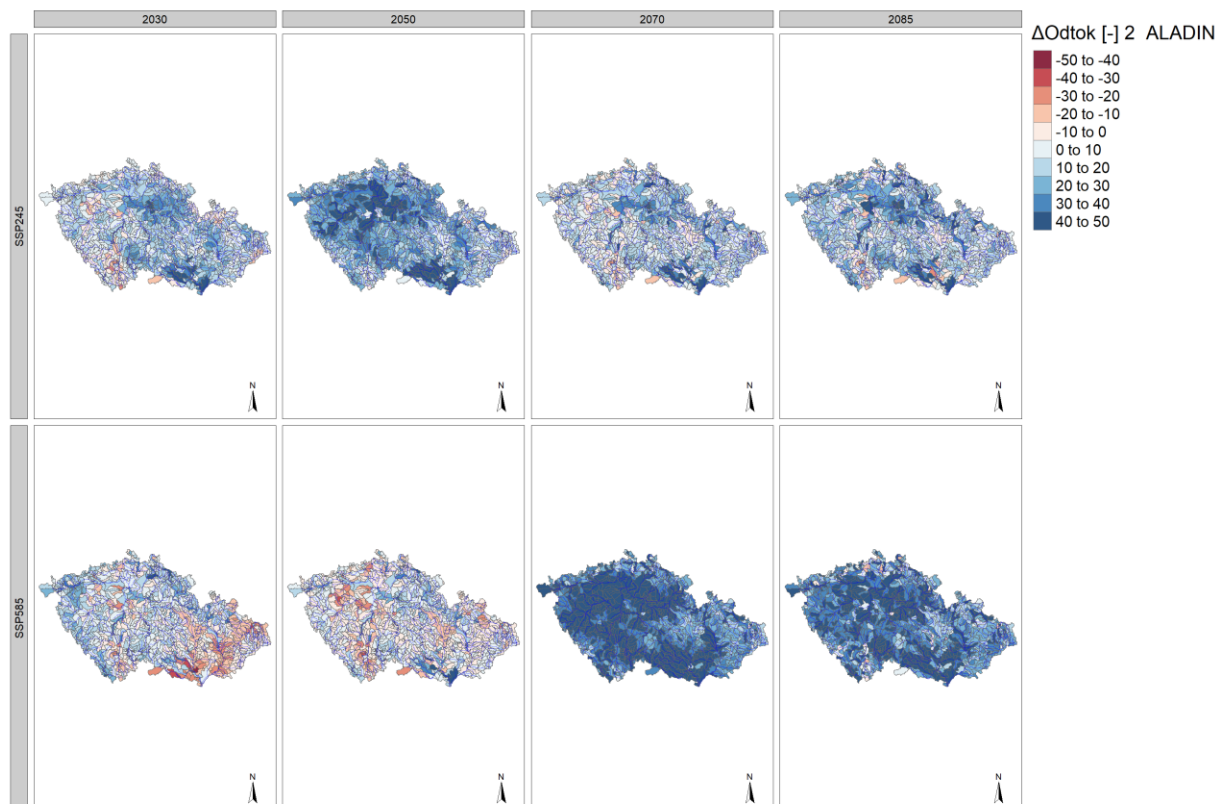
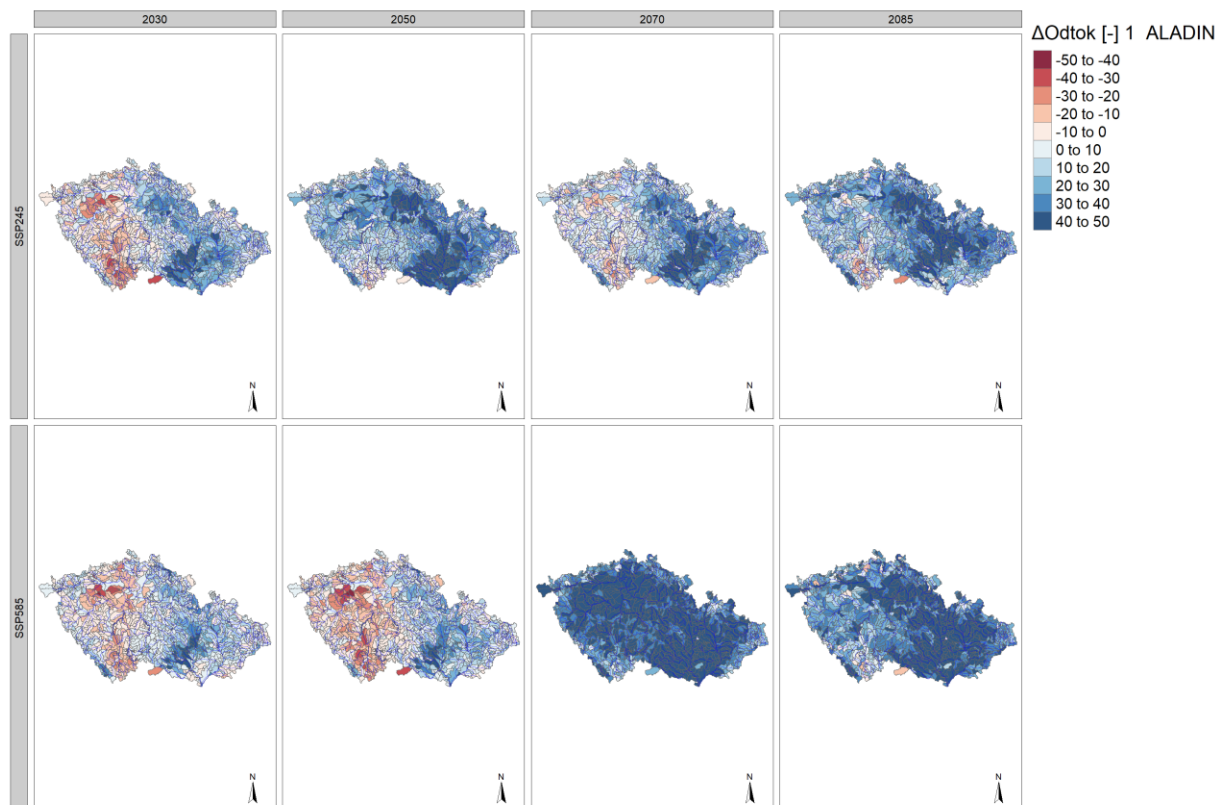
Program Prostředí pro život



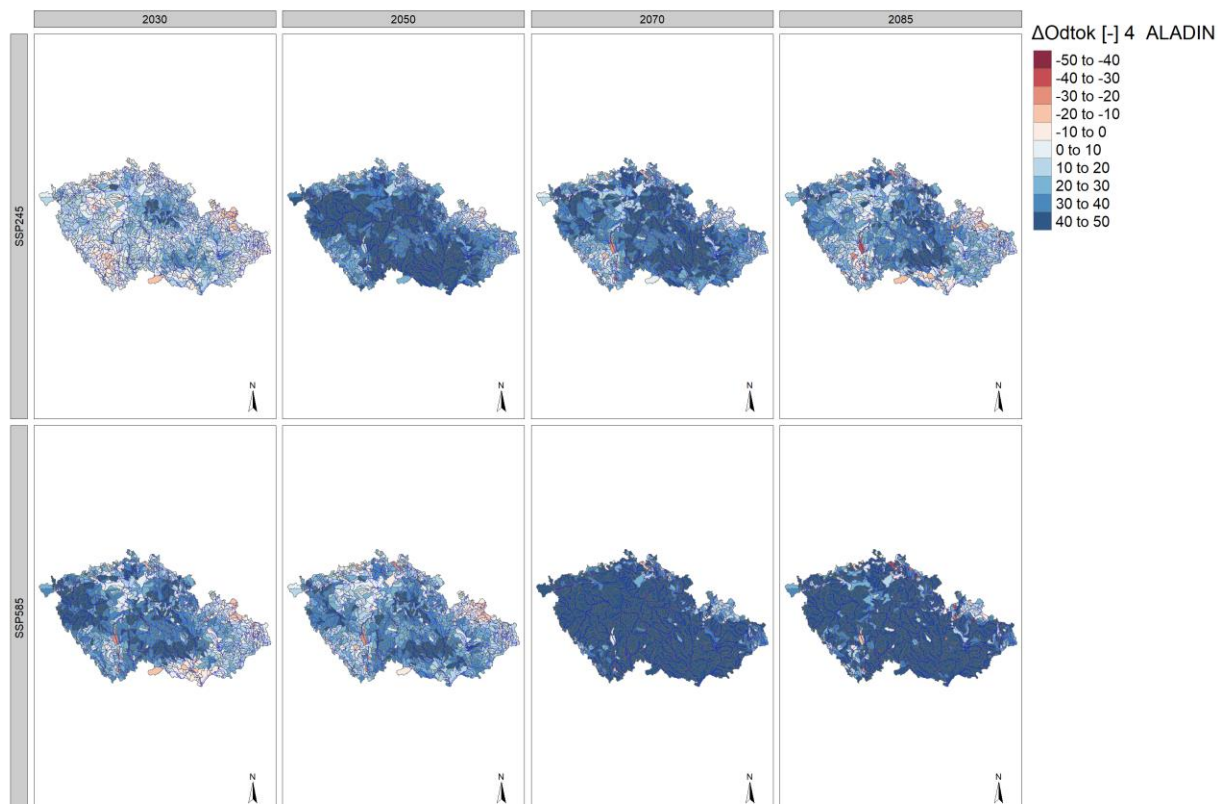
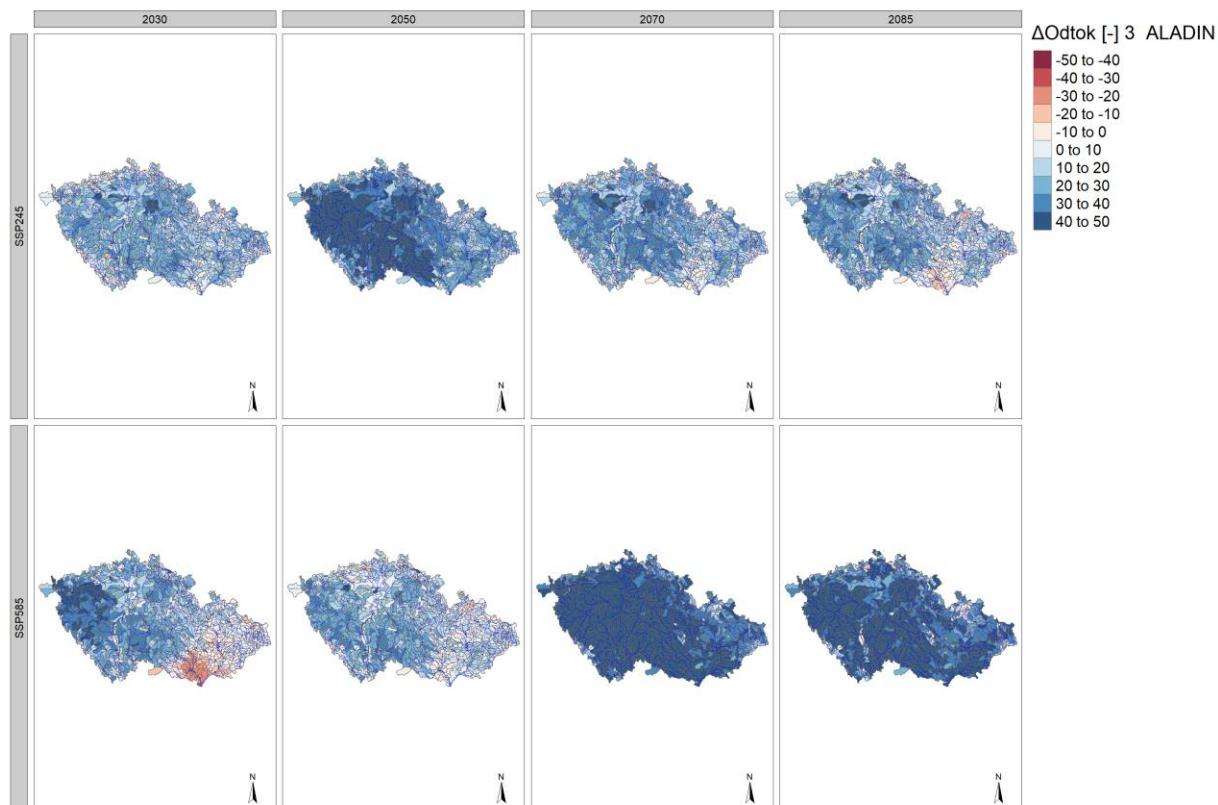


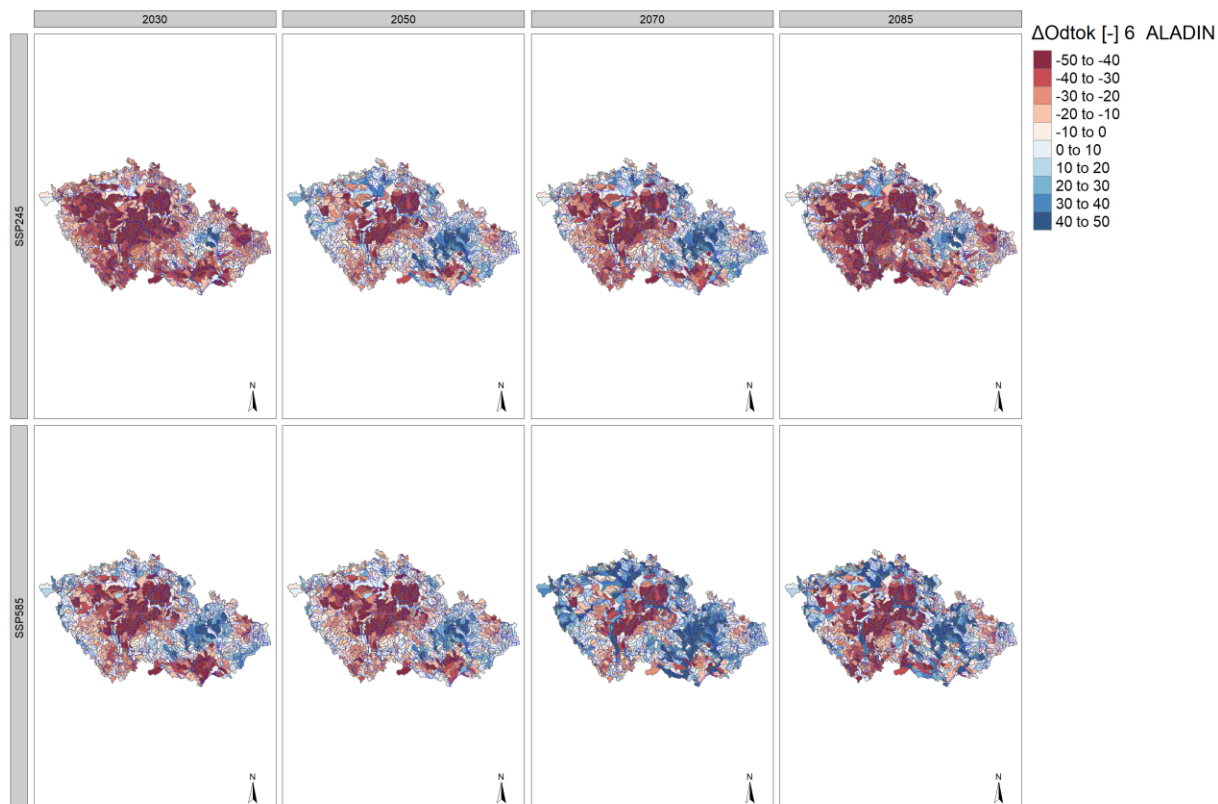
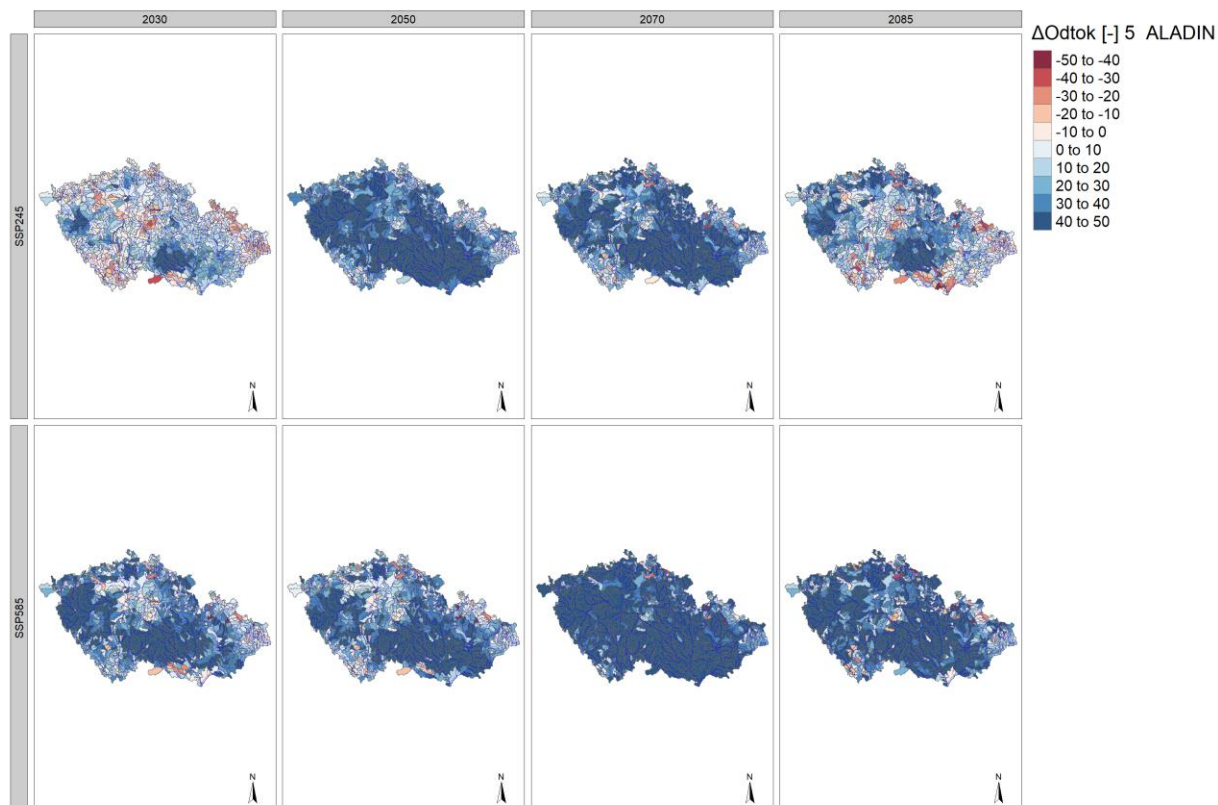
Program Prostředí pro život





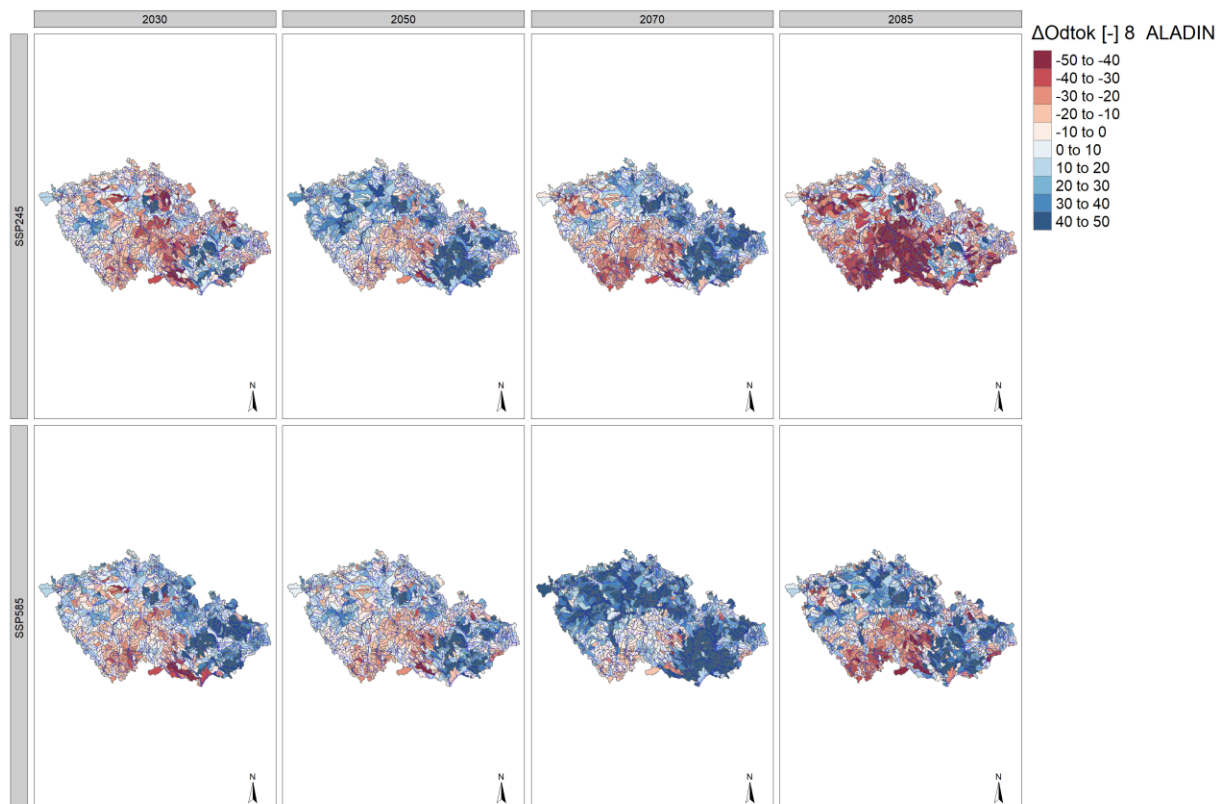
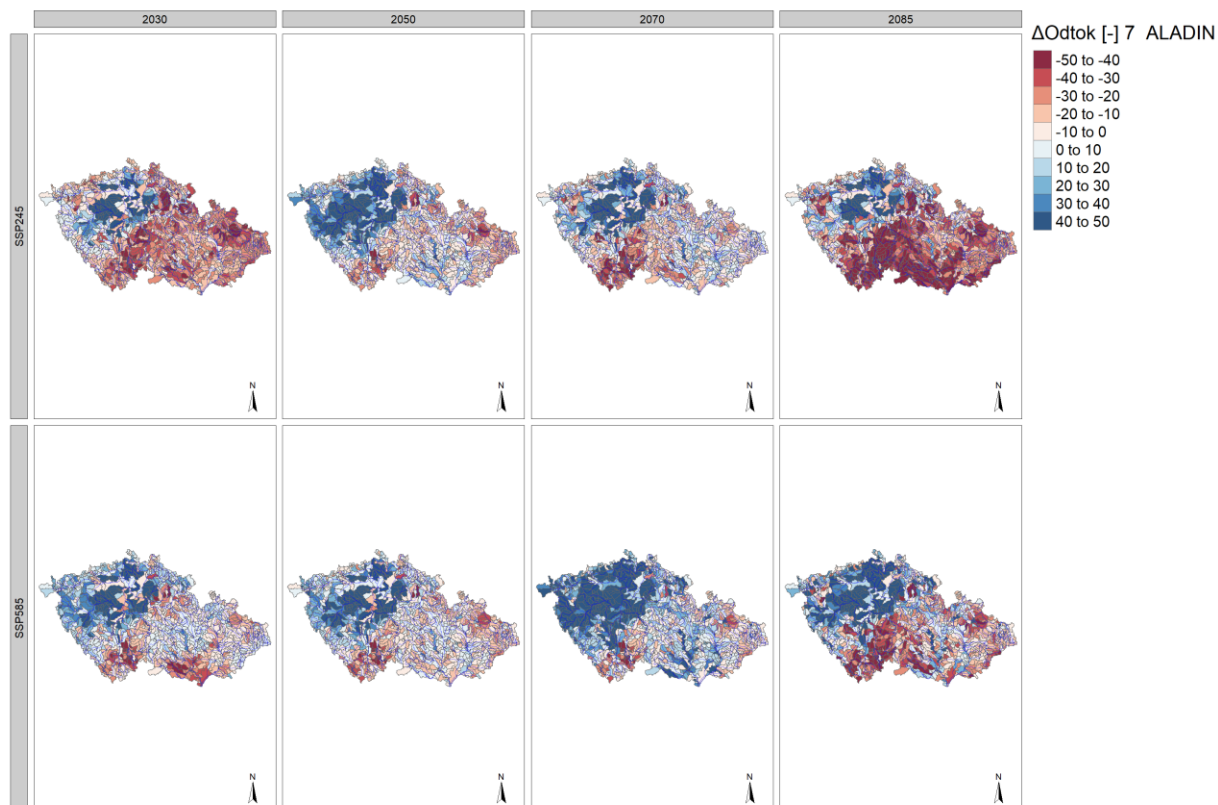


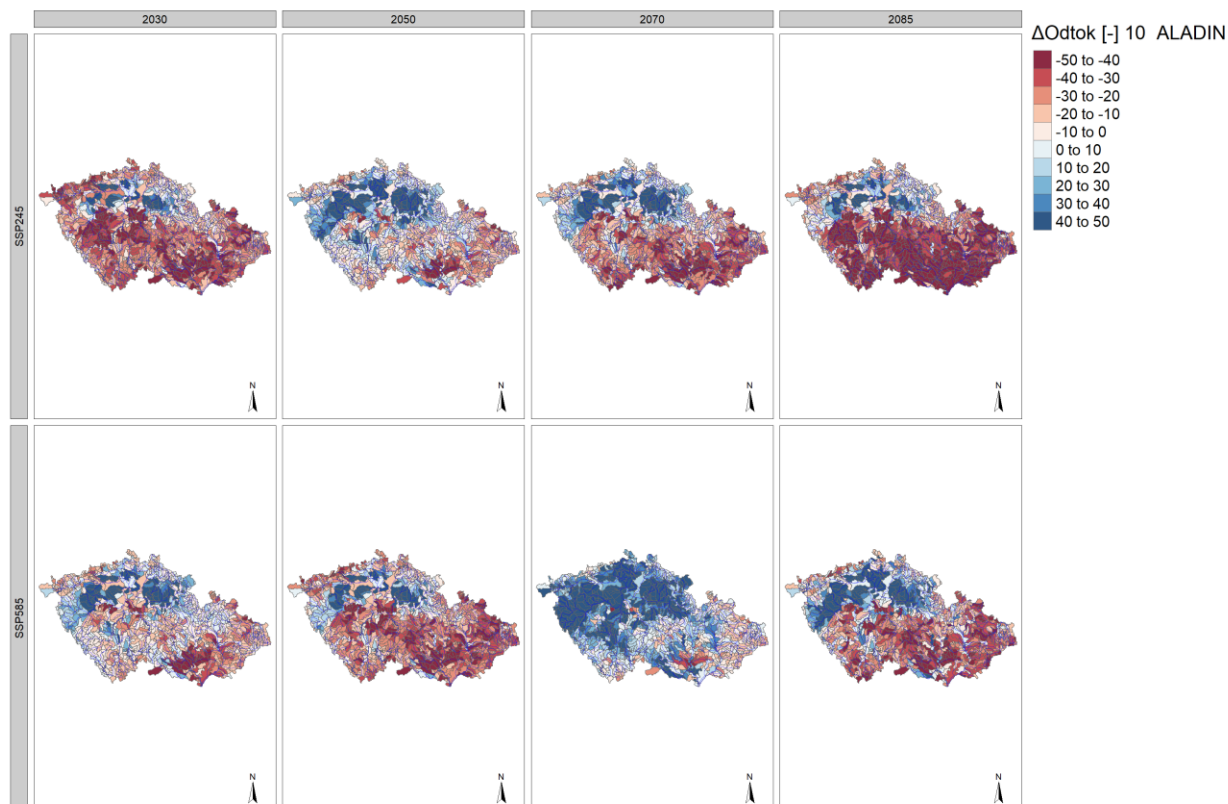
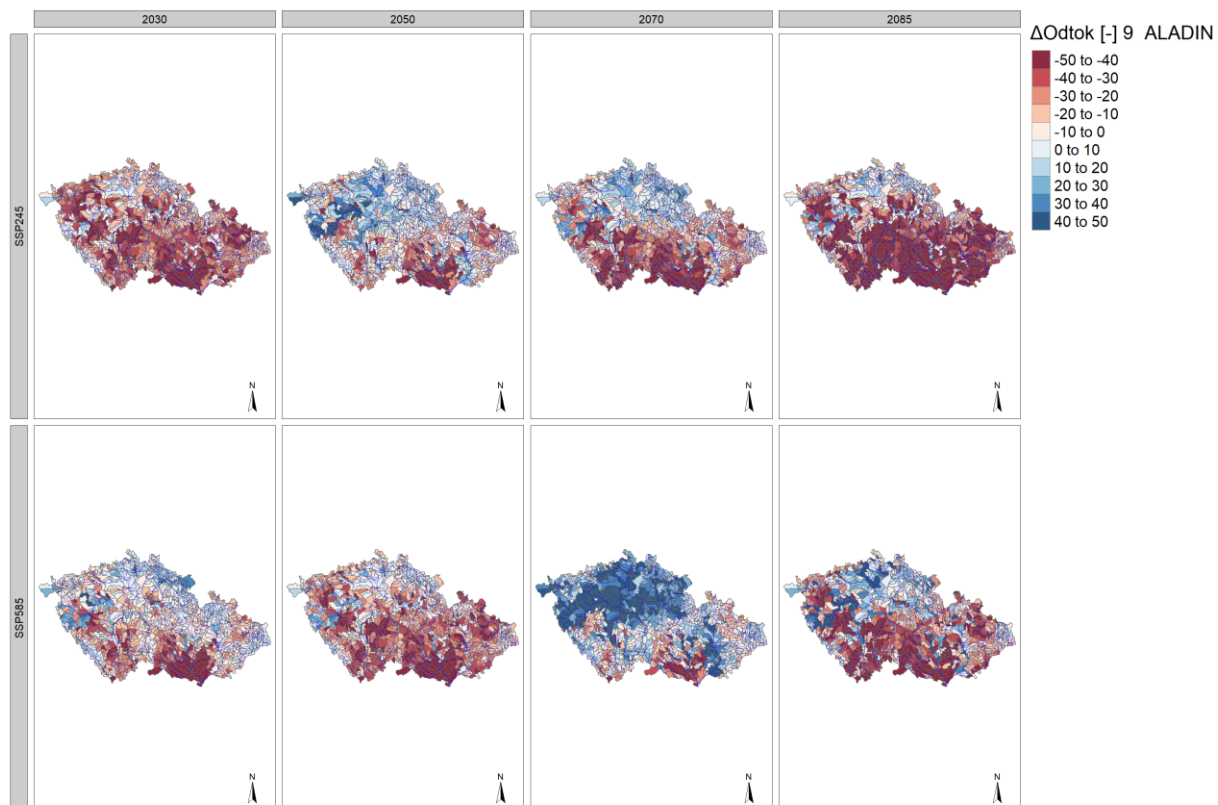




T A  
Č R

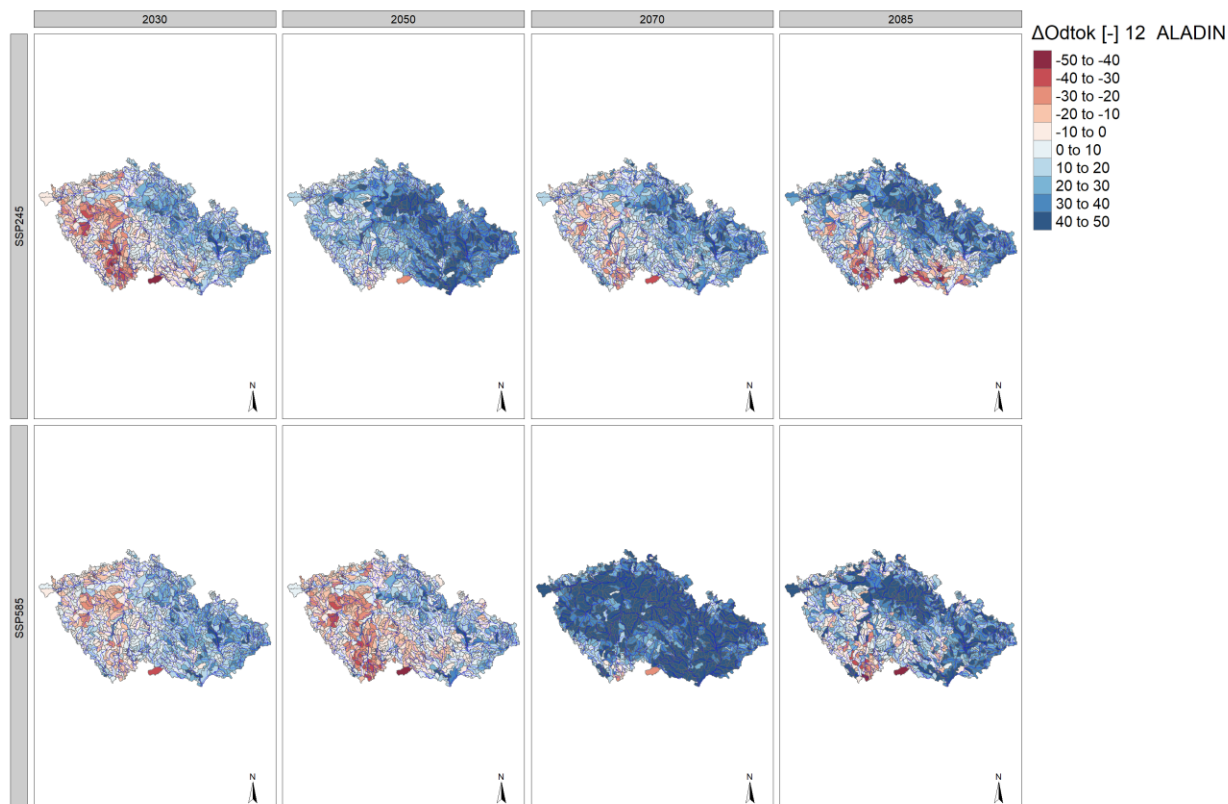
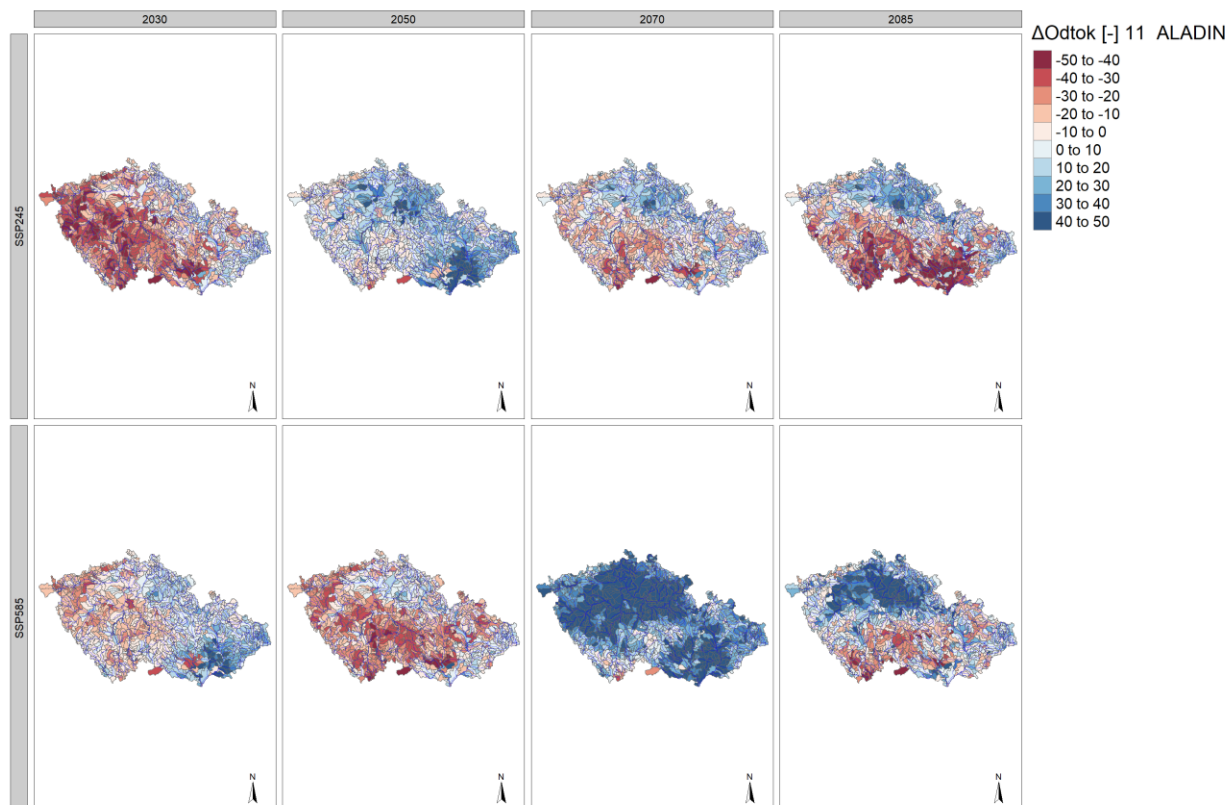
Program **Prostředí pro život**





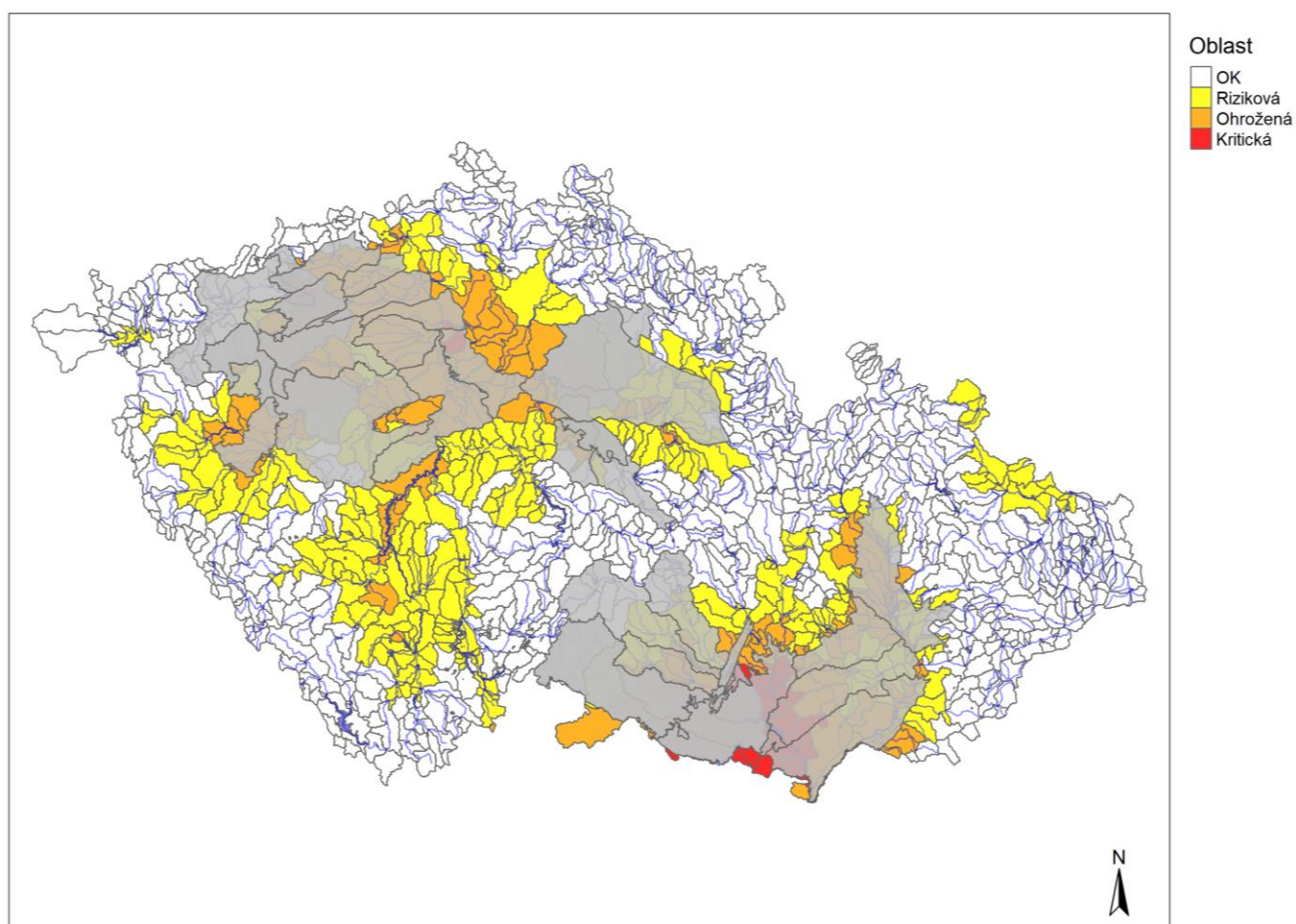
T A  
Č R

Program **Prostředí pro život**



## 6.2 Deficitní oblasti

V rámci přílohy jsou uvedeny deficitní oblasti dle průměrné simulace GCM pro SSP2.45 a simulace ALADIN-CLIMATE/CZ. Analogicky jsou uvedeny simulace pro SSP5.85.



Obrázek 6-1 Deficitní oblasti dle simulací GCM pro SSP 2.45 k roku 2050

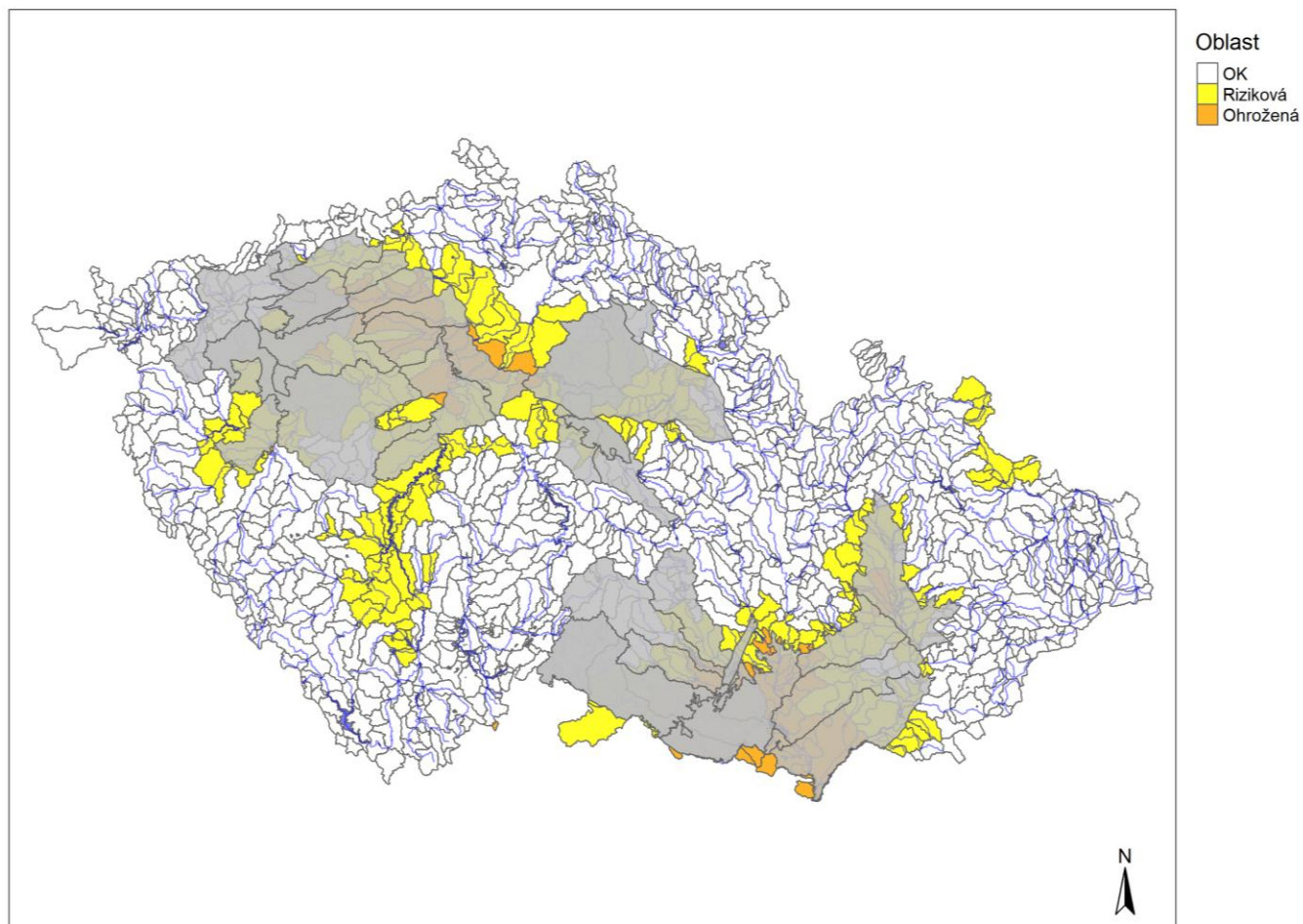
T A

Č R



CentrumVoda

Program **Prostředí pro život**



Obrázek 6-2 Deficitní oblasti dle simulace ALADIN-CLIMATE/CZ pro SSP 2.45 k roku 2050

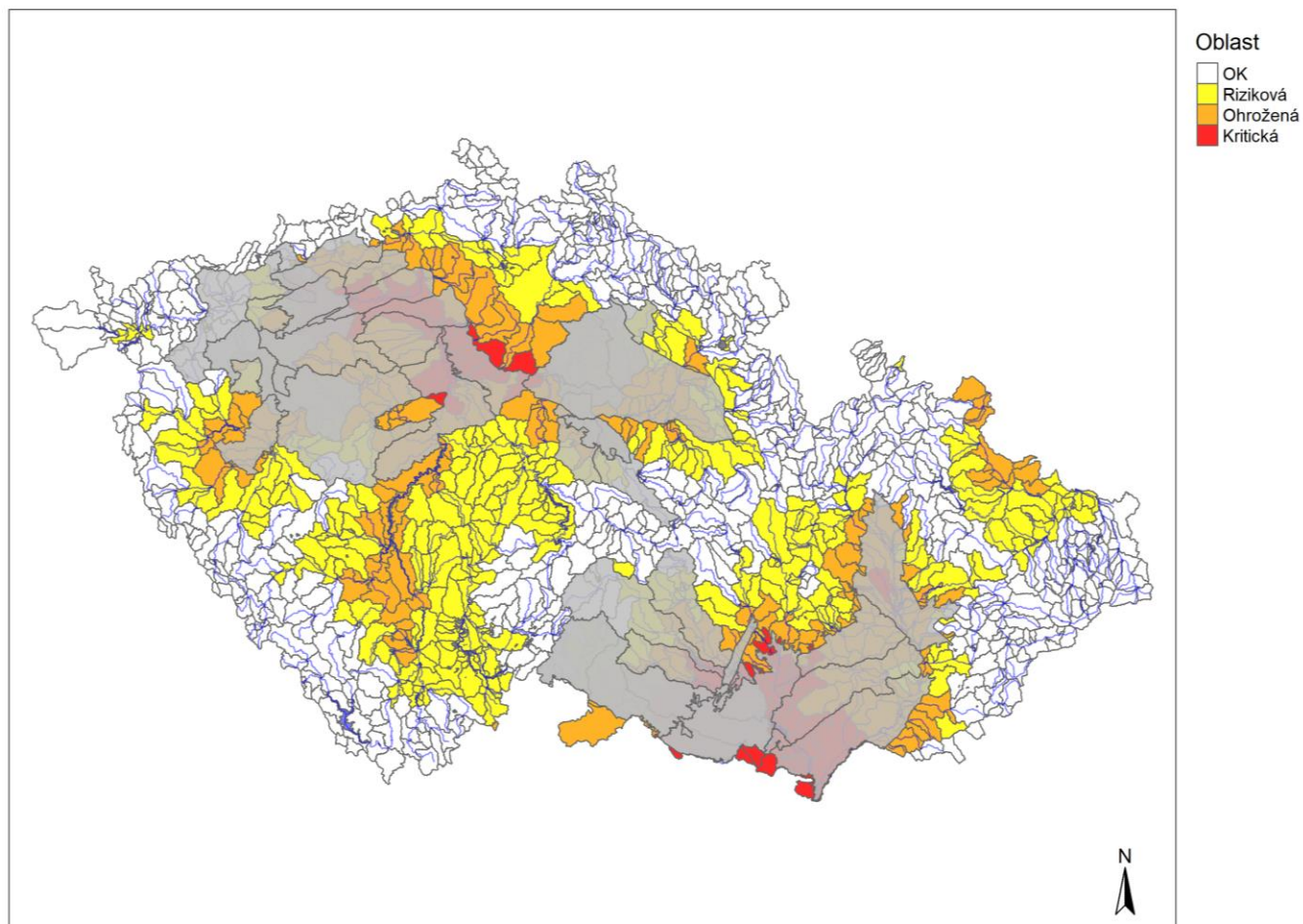
T A

Č R



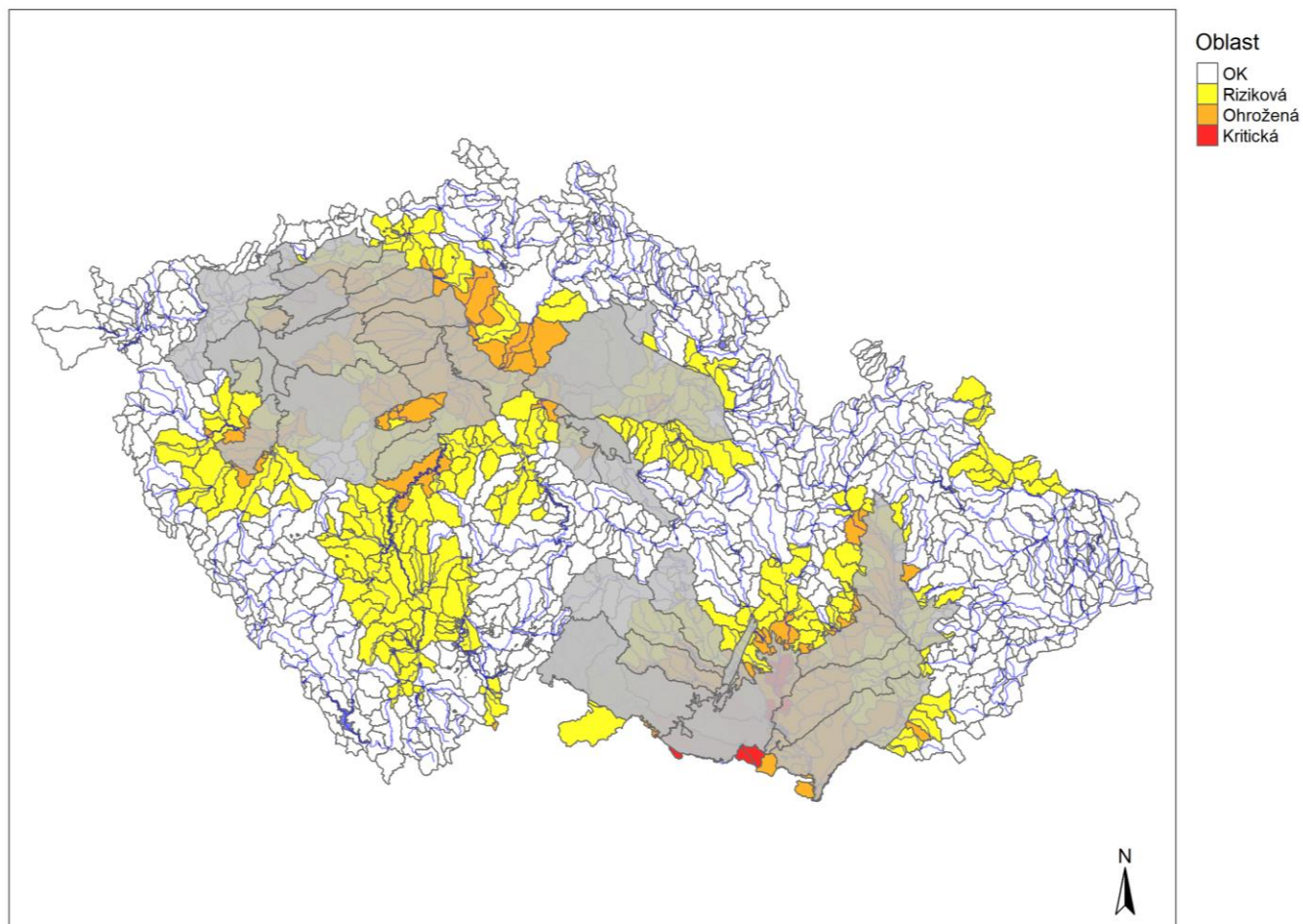
CentrumVoda

Program **Prostředí pro život**



Obrázek 6-3 Deficitní oblasti dle simulací GCM pro SSP 5.85 k roku 2050





Obrázek 6-4 Deficitní oblasti dle simulace ALADIN-CLIMATE/CZ pro SSP 5.85 k roku 2050