

SS02030040-V37

Souhrnná výzkumná zpráva (Vsouhrn)

Úplné a podrobné scénáře změny klimatu do roku 2100, tj. průběhu, změn a trendů klimatických prvků a z nich odvozených prvků hydrologického cyklu (včetně doplňování a stavu podzemních vod). Včetně ověření na pozorovaných datech.

Iryna Dvoretzká, Petr Štěpánek, Veronika Šustková, Radim Tolasz, Adam Valík, Pavel Zahradníček

Obsah

Úvod	3
Zpracování výstupů modelu	3
Příprava dat.....	3
Zpracování meteorologických prvků	4
Příprava scénářů	6
Výstupy pro veřejnost	15
Povinné výstupy DC 2.1	17
Závěr	17
Literatura	17

Úvod

Příprava scénářů změny klimatu s krokem 2,3 km je důležitou součástí řešení projektu. Jednotlivé řešitelské týmy tyto scénáře postupně aplikují ve svých postupech řešení. Scénáře jsou cíleně připravené pro území Česka a v tomto rozlišení umožňují identifikovat možné odlišné odezvy a vývoj např. v horských oblastech ve srovnání s nížinami. Podrobnější rozlišení rovněž umožňuje přesnější aplikaci statistických downscalingových a bias-correction metod a to zejména v oblasti extrémů. Bias korekce je připravena pro průměrnou, maximální a minimální teplotu vzduchu a srážky, následovat bude ještě vlhkost vzduchu, rychlost větru a sluneční záření. Po provedených korekcích v gridových bodech jsou připraveny základní klimatické indexy (např. studená a teplá období, dny a noci, mrazové dny, ledové dny, tropické dny, letní dny, tropické noci, dny s definovanými úhrny srážek, vlhká a suchá období, apod.). Základní data a část indexů pro 20letá období od 2021 do 2100 jsou veřejně přístupná na webu projektu PERUN.

Zpracování výstupů modelu

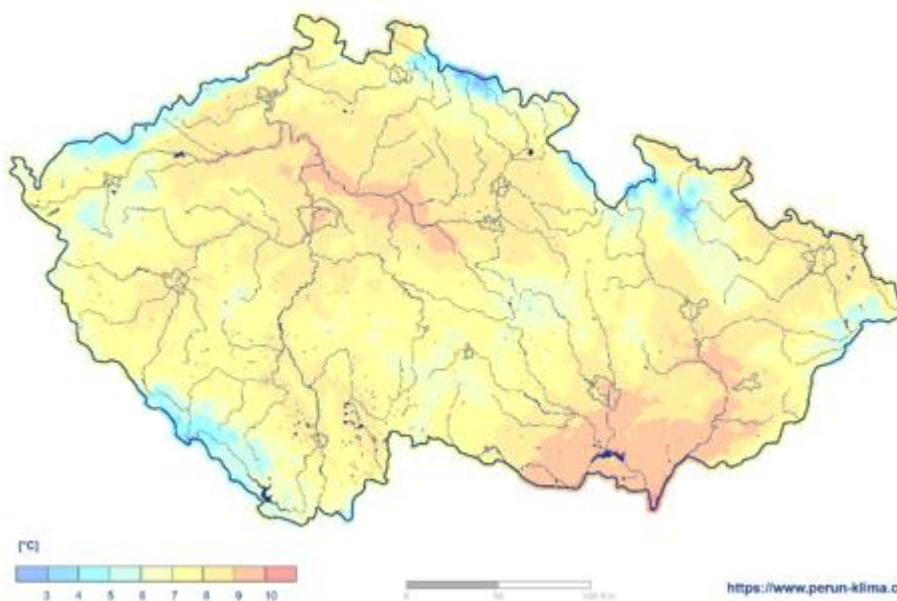
Příprava dat

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. K tomuto účelu byl využit balíček TERRA v prostředí R, pomocí kterého byla celá výpočetní oblast zúžena podle hranic povodí 4. řádu a následně rozšířena o 5 km (dále PERUN doména). Výsledná síť obsahuje 29154 bodů s původním prostorovým rozlišením 2,3 km.

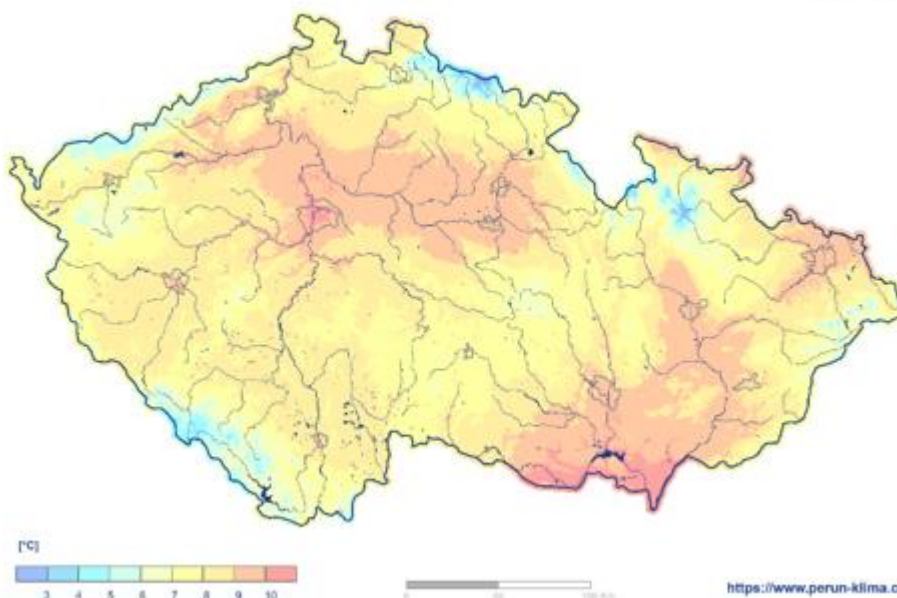
Po předchozí domluvě s ostatními řešiteli byl změněn i formát výstupních dat modelu z původního prostorového rasteru ve formátu GRIB na jednoduchý textový soubor ve formátu CSV, čímž byla podstatně zredukována velikost výsledných souborů a tím se zjednodušila manipulace s nimi. Každý výsledný soubor obsahuje informace o pořadovém čísle každého z 29154 bodů, identifikátor modelované veličiny, datum a vypočtené hodinové hodnoty (obr. 1). Zvlášť je součástí výsledků uveden soubor obsahující souřadnice všech bodů ve třech souřadnicových systémech (v původní Lambertově projekci, WGS 84 a S-42). Modelové výstupy ALADIN-CLIMATE/CZ jsou široce využívány při přípravě různých článků, např. Babuňková Uhlířová, Popová, Sokol 2022; Zacharov, Řezáčová, Brožková, 2022).

Zpracovávána jsou pouze data z experimentů *Simulace historického klimatu*, která jsou následně porovnávána s reálně naměřenými daty (Squintu et al. 2020) na staniční síti ČHMÚ (obr. 2 ukazuje příklad porovnání pro teplotu vzduchu ve výšce 2 m) a *Výpočet scénářů*, který obsahuje modelovaný budoucí vývoj vybraných meteorologických prvků a indexů podle dvou vývojových scénářů (SSP5-8.5 a SSP2-4.5). Scénářová data byla následně opravena pomocí tzv. BIAS korekce podle metodiky Štěpánek a kol., 2016 využívající empirické distribuční funkce a shlazená nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem. K dalším analýzám jsou řešitelům poskytována opravená i původní modelová data.

Průměrná roční teplota vzduchu za období let 1995–2014 (ALADIN)



Průměrná roční teplota vzduchu za období let 1995–2014 (GRIST)



Ob. 2 Srovnání průměrné roční teploty podle modelu ALADIN (nahore) a měření ze staniční sítě ČHMÚ (dole)

Příprava scénářů

Modelová data za období 2021–2100 jsou po BIAS korekci připravena k dalšímu zpracování, předání řešitelským týmům a k prezentaci veřejnosti. K tomu je pro řešitele využíván adresář */Cloud/PERUN/DC 2.1/Výsledky/* na externím cloudu a pro veřejnost jsou soubory ke stažení uloženy na projektovém webu (<https://www.perun-klima.cz/scenare>).

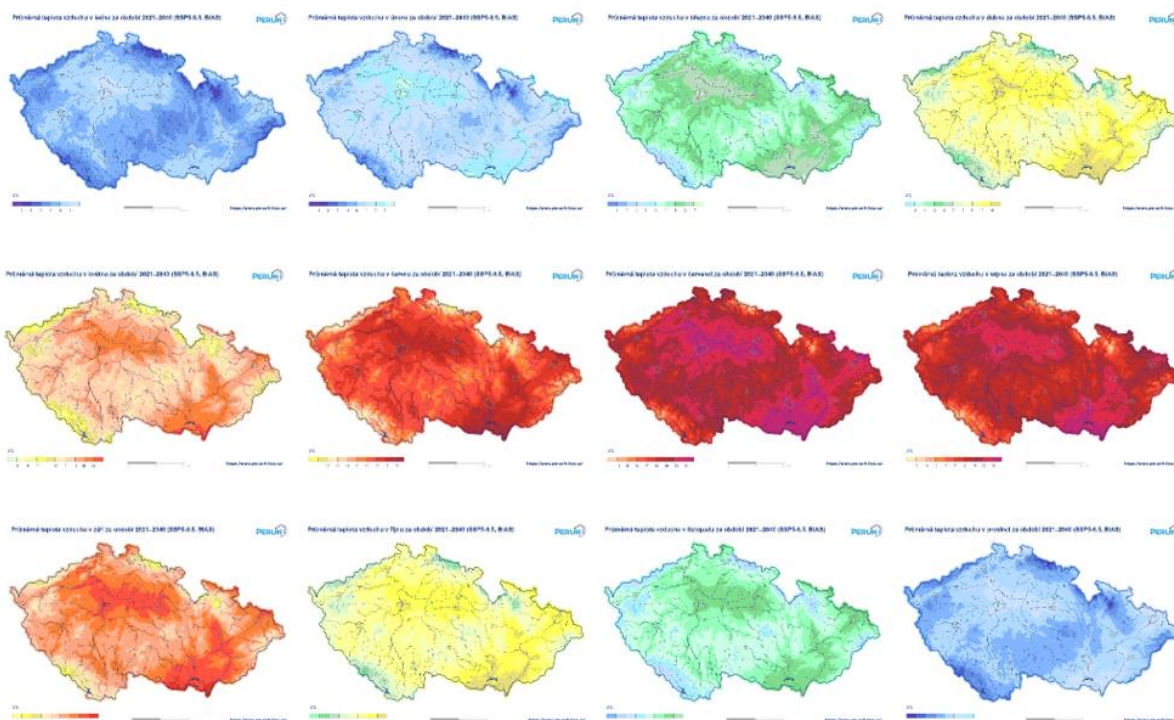
K dispozici jsou zpracovaná denní data pro scénářové období v různých formátech, základní datová sada pro scénáře SSP5-8.5 (X=585) a SSP2-4.5 (X=245) obsahuje data uvedená v tab. 2.

Tab. 2 Základní datové sady pro scénáře SSPX (X je parametr pro 5-8.5 a 2-4.5)

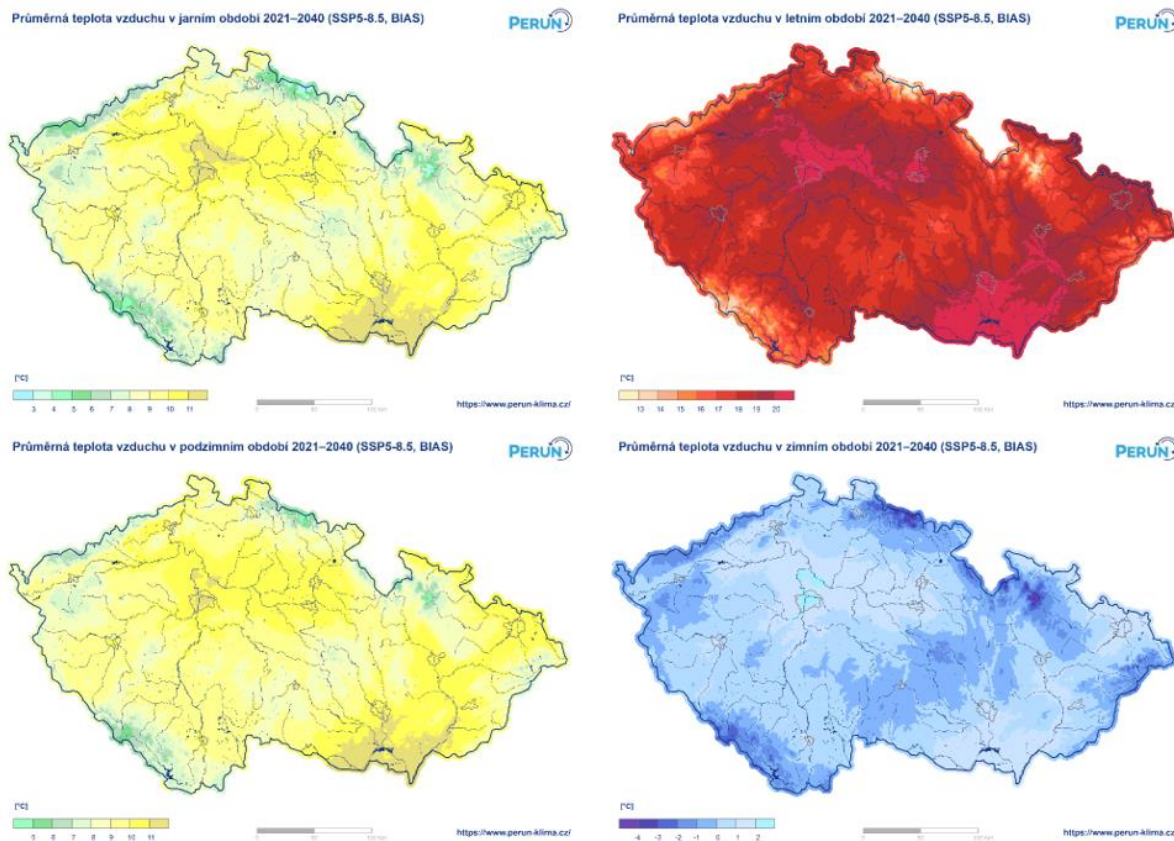
Soubor	Parametr	Popis
T_BIAS-SSPX_rrrr.csv	rrrr=2015,2016, ..., 2100	Průměrná denní teplota
T_BIAS-SSPX_tttt_rrrr.csv	tttt in (Daily, Monthly) rrrr in (2021_2040, 2041_2060, 2061_2080, 2081_2100)	Průměrná teplota
TMA_BIAS-SSPX_rrrr.csv	rrrr=2015,2016, ..., 2100	Maximální denní teplota
TMA_BIAS-SSPX_tttt_rrrr.csv	tttt in (Daily, Monthly) rrrr in (2021_2040, 2041_2060, 2061_2080, 2081_2100)	Průměrná maximální teplota
TMA_BIAS-SSPX_fce_rrrr.csv	fce in (count_0, count_25, count_30, count_35) rrrr in (2021_2040, 2041_2060, 2061_2080, 2081_2100)	Průměrný počet dní s maximální teplotou < 0 °C a >= 25, 30, 35 °C
TMI_BIAS-SSPX_rrrr.csv	rrrr=2015,2016, ..., 2100	Minimální denní teplota
TMI_BIAS-SSPX_tttt_rrrr.csv	tttt in (Daily, Monthly) rrrr in (2021_2040, 2041_2060, 2061_2080, 2081_2100)	Průměrná minimální teplota
TMI_BIAS-SSPX_fce_rrrr.csv	fce in (count_0, count_20) rrrr in (2021_2040, 2041_2060, 2061_2080, 2081_2100)	Průměrný počet dní s minimální teplotou < 0 °C a >= 20 °C
SRA_BIAS-SSPX_rrrr.csv	rrrr=2015,2016, ..., 2100	Denní úhrn srážek
SRA_BIAS-SSPX_tttt_rrrr.csv	tttt in (Daily, Monthly_avg) rrrr in (2021_2040, 2041_2060, 2061_2080, 2081_2100)	Průměrný úhrn srážek
SRA_BIAS-SSPX_fce_rrrr.csv	fce in (count_0, count_1, count_5, count_10, count_20, count_30) rrrr in (2021_2040, 2041_2060, 2061_2080, 2081_2100)	Průměrný počet dní se srážkou > 0, 1, 5, 10, 20 a 30 mm

Pro základní přehled o připravených scénářích byly připraveny měsíční, sezónní a roční mapy pro průměrnou teplotu, průměrnou maximální a minimální teplotu a úhrn srážek.

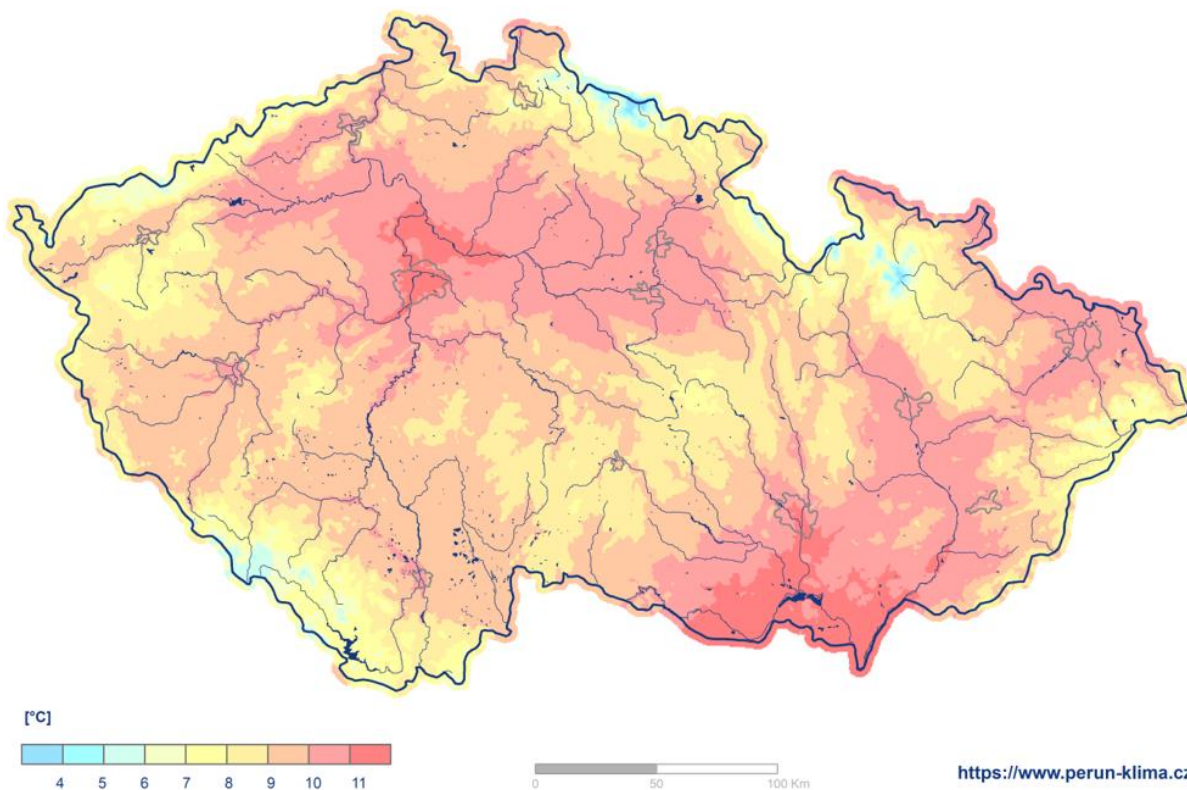
Na následujících obrázcích 3 až 14 je kompletní sada měsíčních, sezónních a ročních map pro čtyři scénářová období a čtyři bias korigované prvky (průměrná, maximální a minimální teplota a srážky).



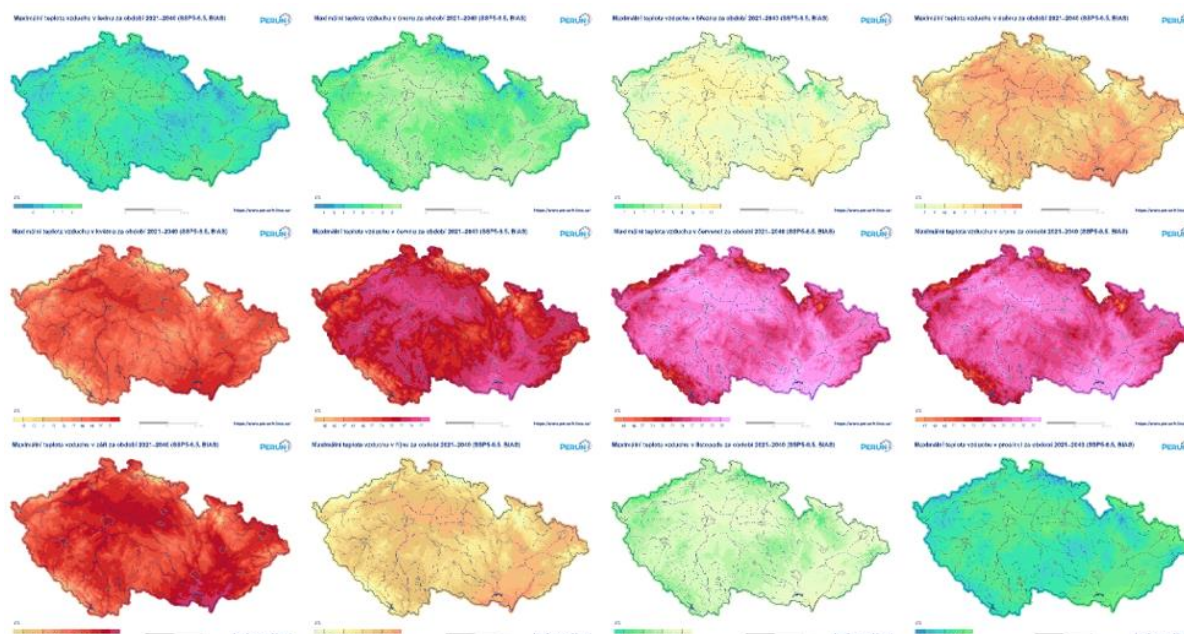
Obr. 3 Průměrná měsíční teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5



Obr. 4 Průměrná sezónní teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

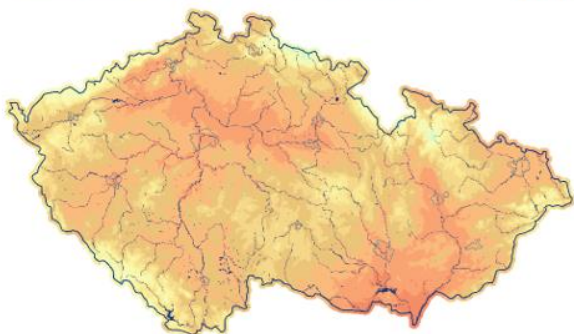


Obr. 5 Průměrná roční teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

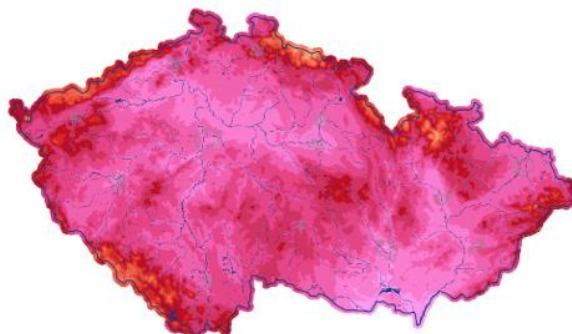


Obr. 6 Průměrná maximální měsíční teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

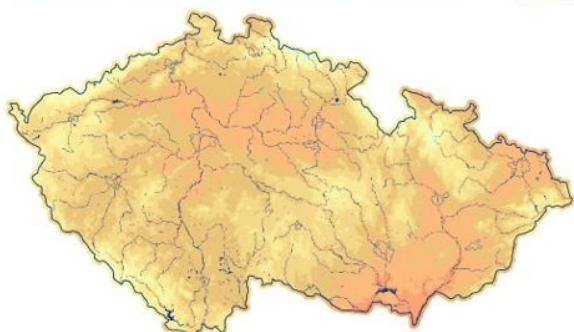
Maximální teplota vzduchu v jarním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



Maximální teplota vzduchu v letním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



Maximální teplota vzduchu v podzimním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)

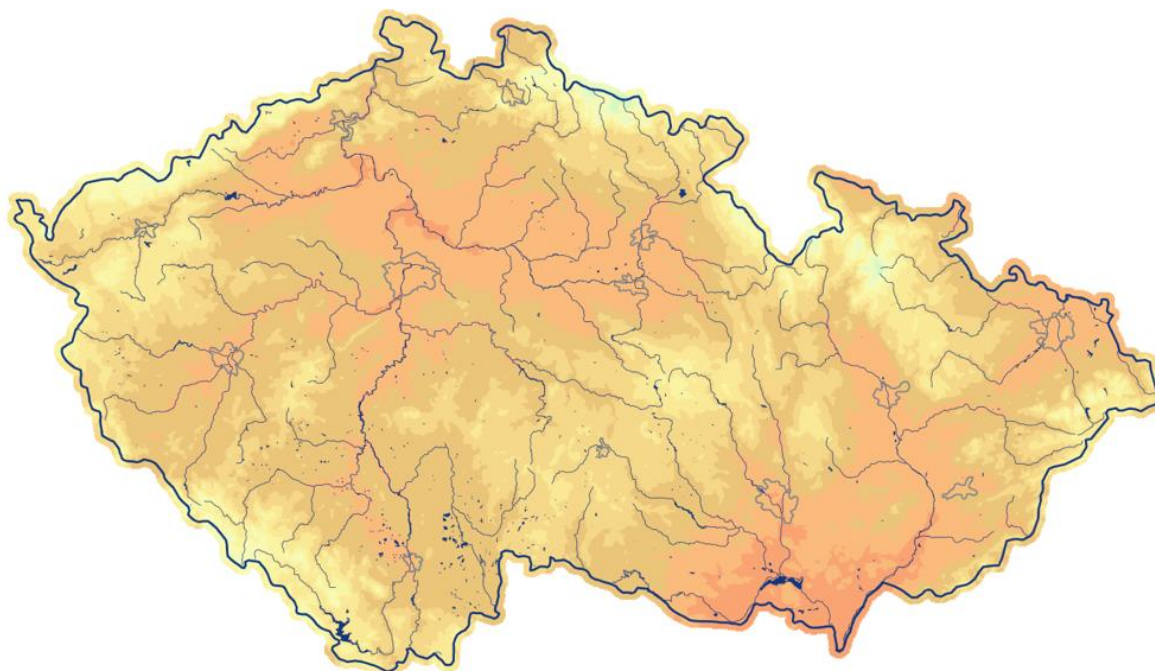


Maximální teplota vzduchu v zimním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



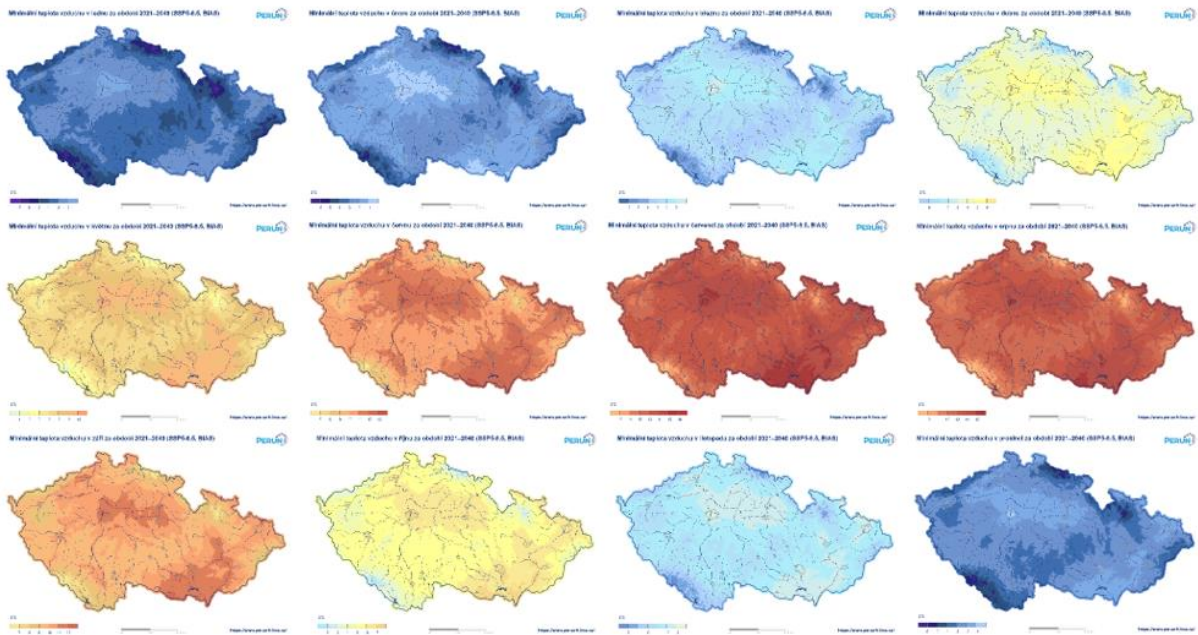
Obr. 7 Průměrná maximální sezónní teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

Maximální roční teplota vzduchu za období let 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)

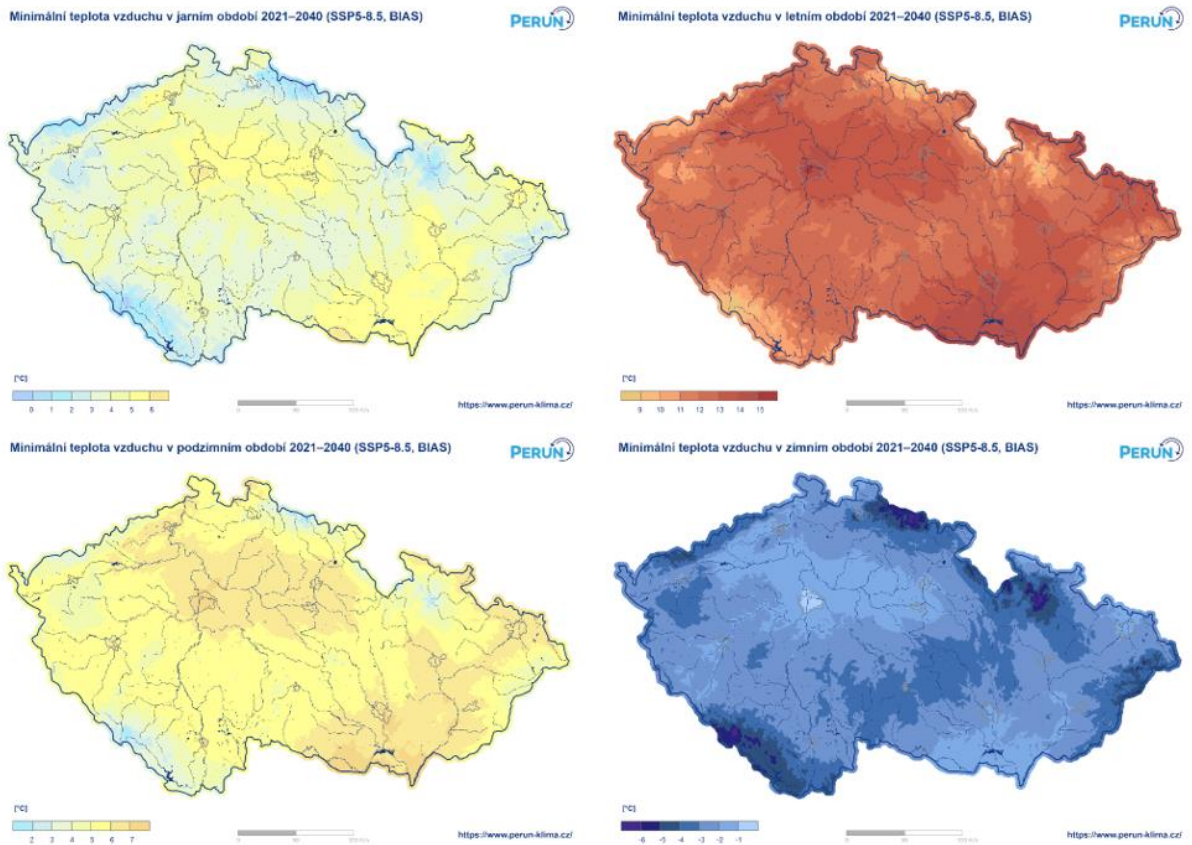


<https://www.perun-klima.cz/>

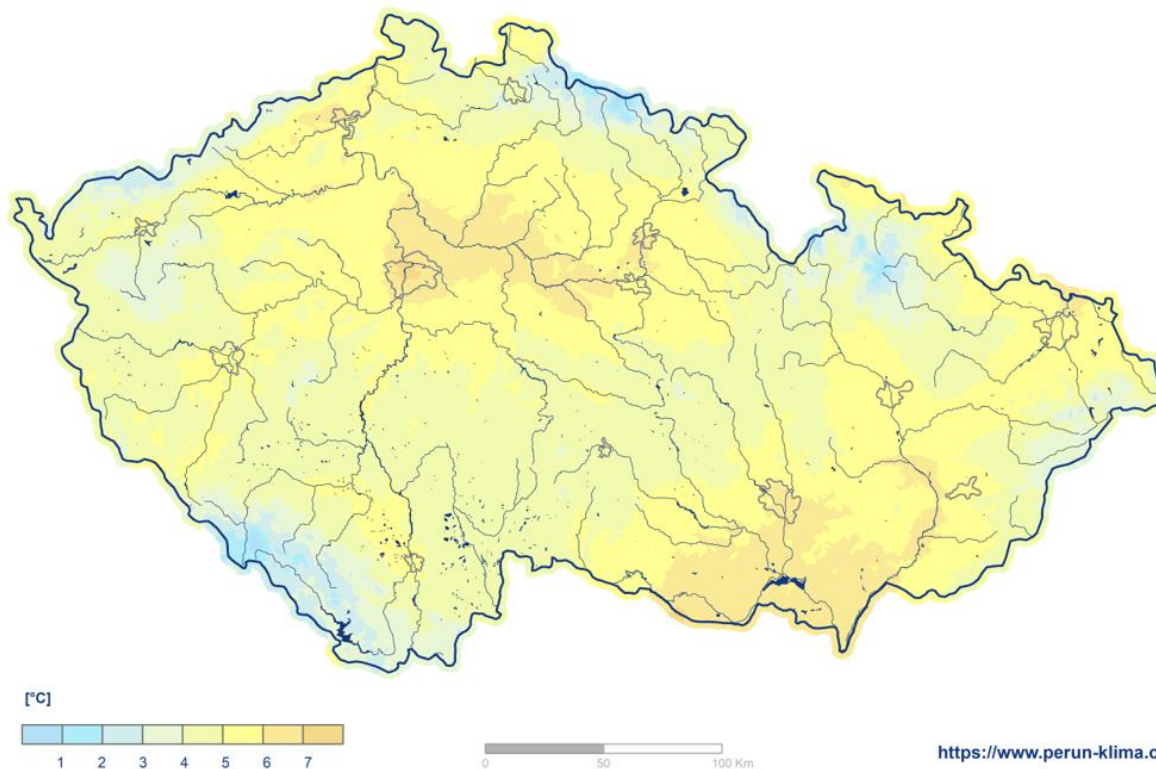
Obr. 8 Průměrná maximální roční teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5



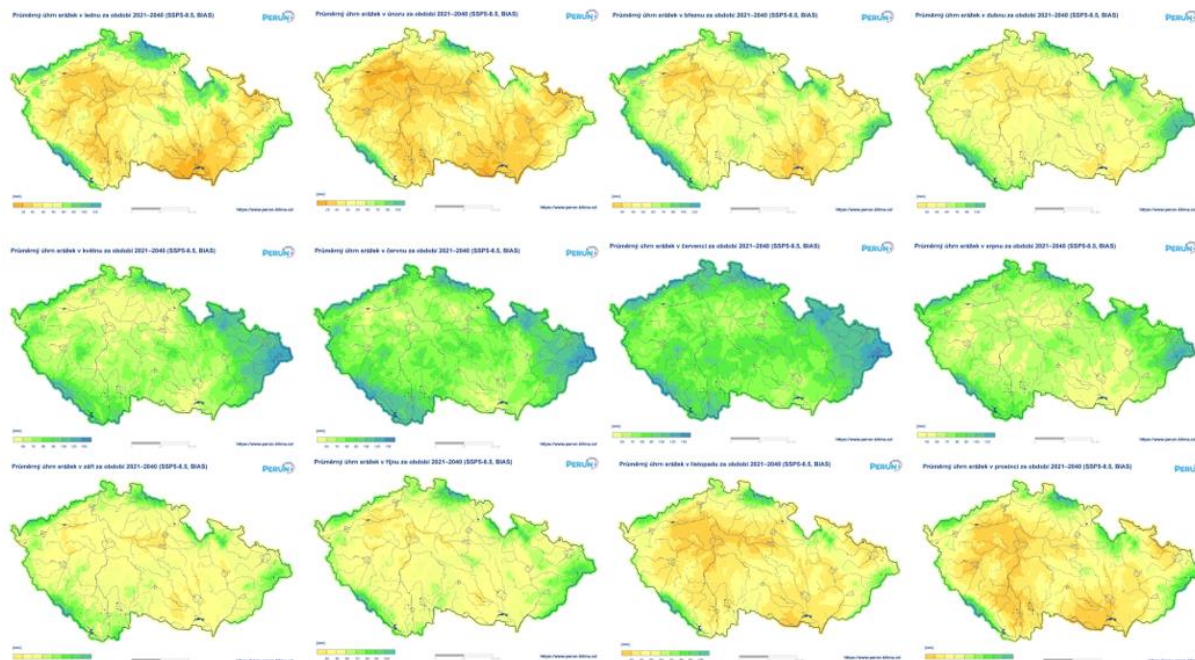
Obr. 9 Průměrná minimální měsíční teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5



Obr. 10 Průměrná minimální sezónní teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5



Obr. 11 Průměrná minimální roční teplota, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

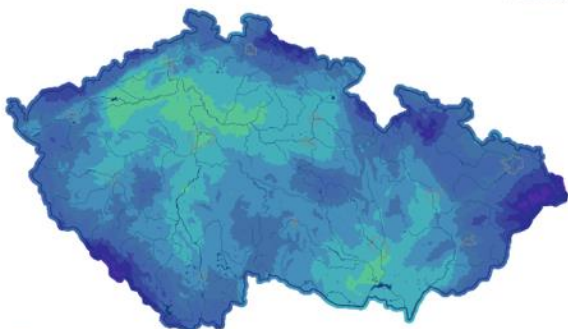


Obr. 12 Průměrný měsíční úhrn srážek, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

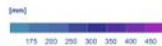
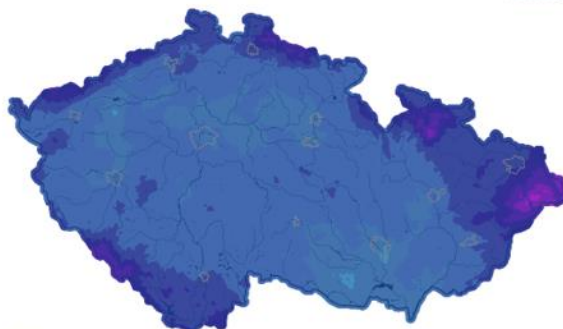
Průměrný úhrn srážek v jarním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



Průměrný úhrn srážek v letním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



<https://www.perun-klima.cz/>

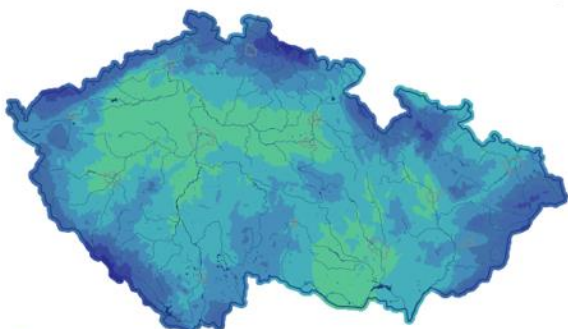


<https://www.perun-klima.cz/>

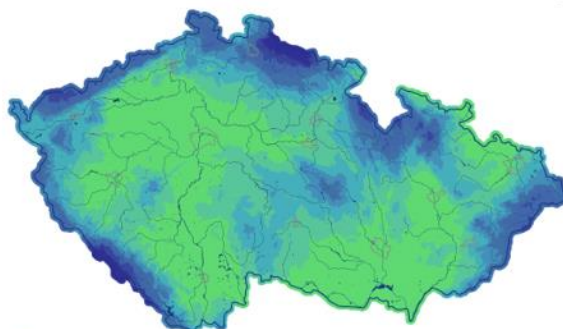
Průměrný úhrn srážek v podzimním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



Průměrný úhrn srážek v zimním období 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



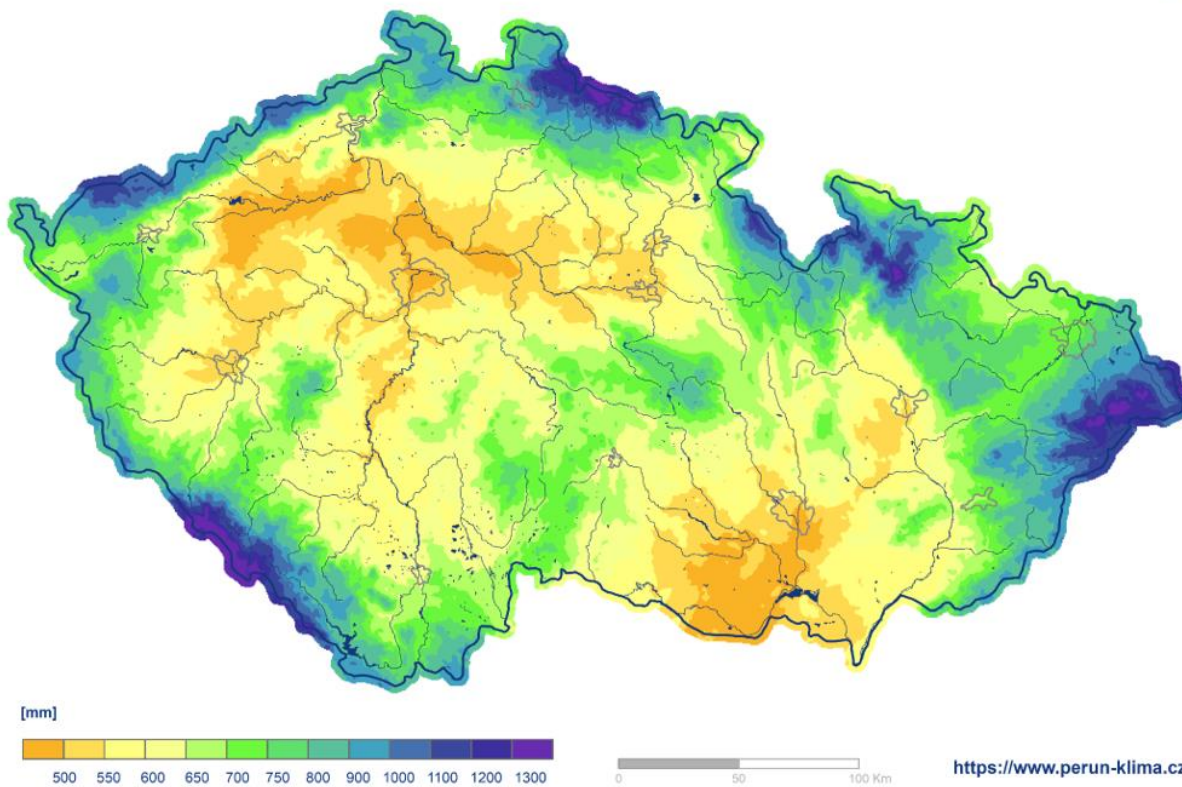
<https://www.perun-klima.cz/>



<https://www.perun-klima.cz/>

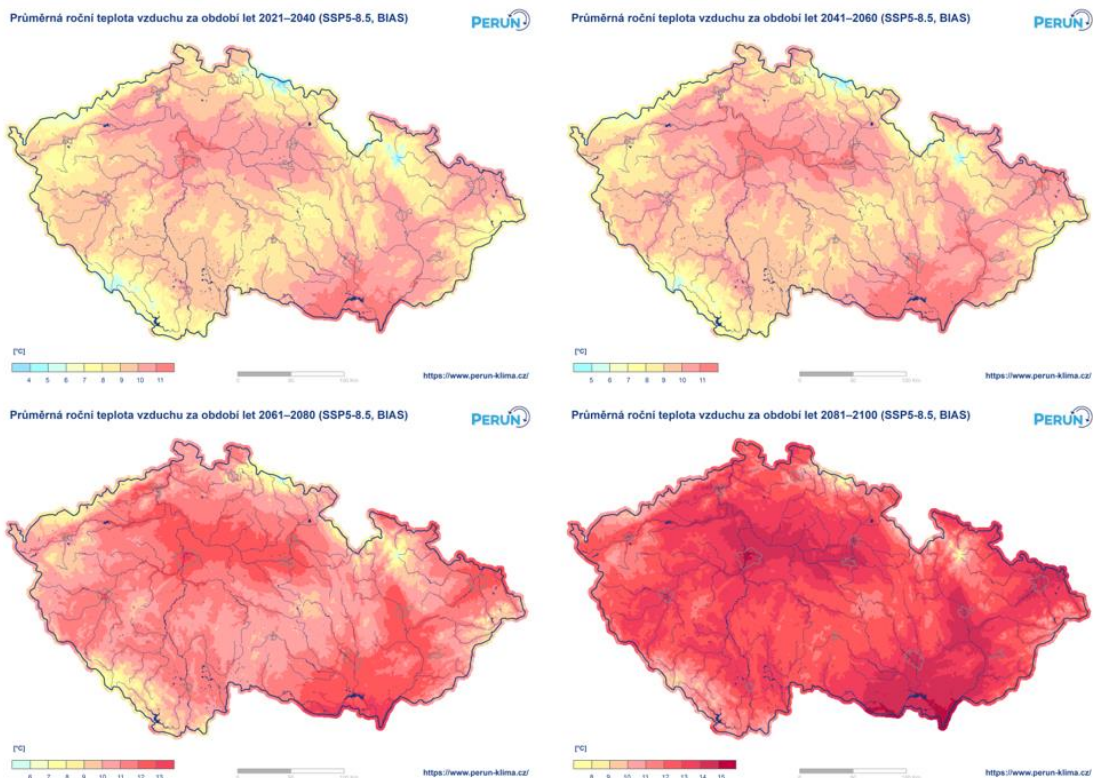
Obr. 13 Průměrný sezónní úhrn srážek, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

Průměrný roční úhrn srážek za období let 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)

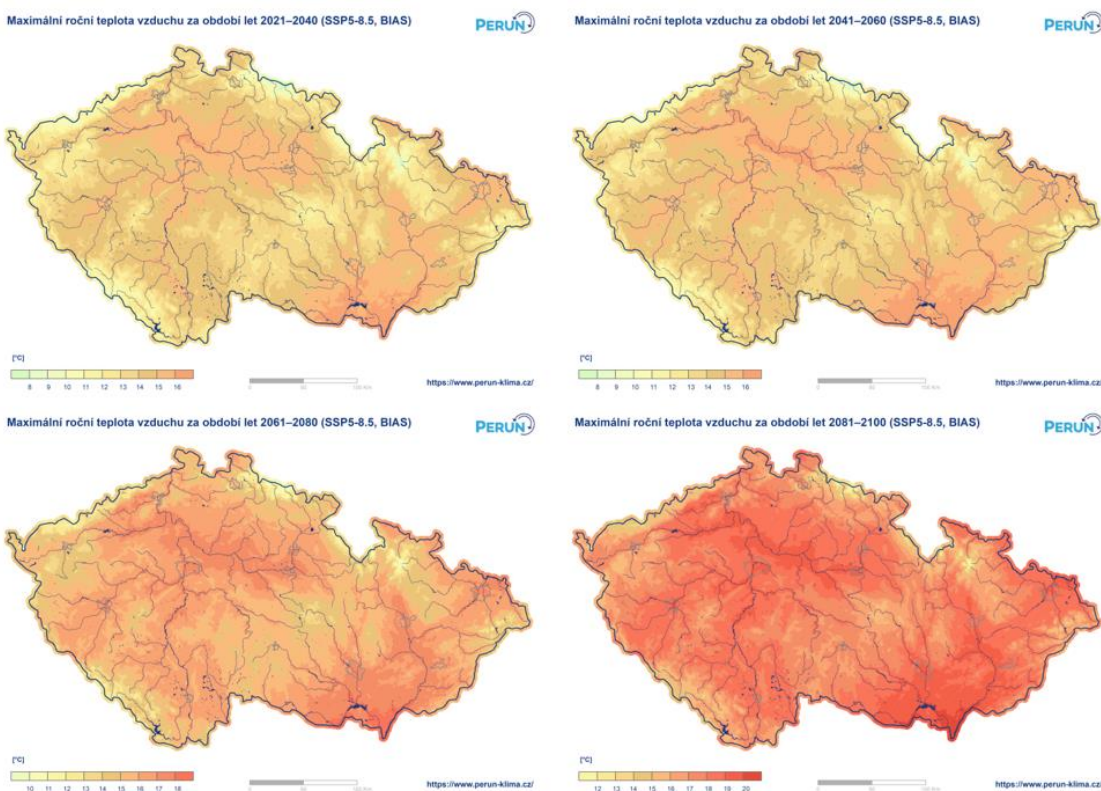


Obr. 14 Průměrný roční úhrn srážek, období 2021–2040, scénář SSP5-8.5

Následují mapy jen ročních charakteristik jako příklad pro všechna scénářová období 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100 pro tento scénář SSP5-8.5 (obr. 15 až 18).

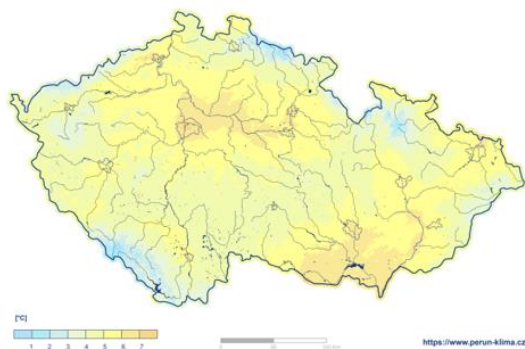


Obr. 15 Průměrná roční teplota v obdobích 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100, scénář SSP5-8.5

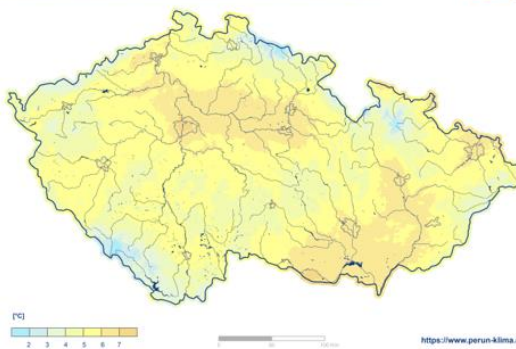


Obr. 16 Průměrná maximální roční teplota v obdobích 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100, scénář SSP5-8.5

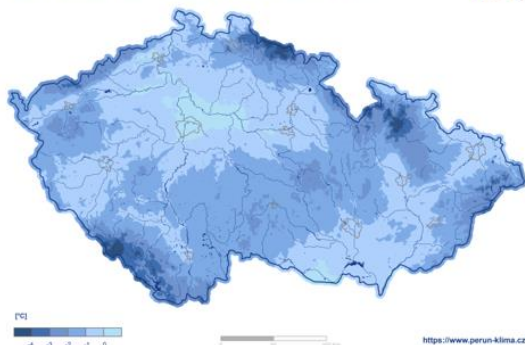
Minimální roční teplota vzduchu za období let 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



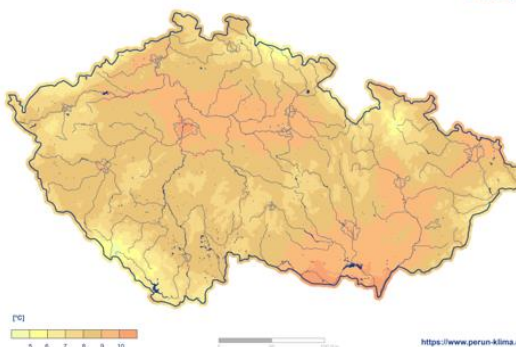
Minimální teplota vzduchu za období let 2041–2060 (SSP5-8.5, BIAS)



Minimální teplota vzduchu za období let 2061–2080 (SSP5-8.5, BIAS)

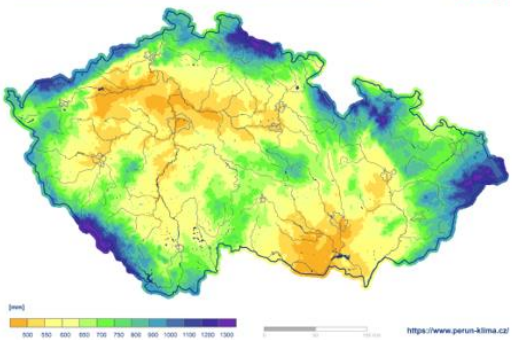


Minimální teplota vzduchu za období let 2081–2100 (SSP5-8.5, BIAS)

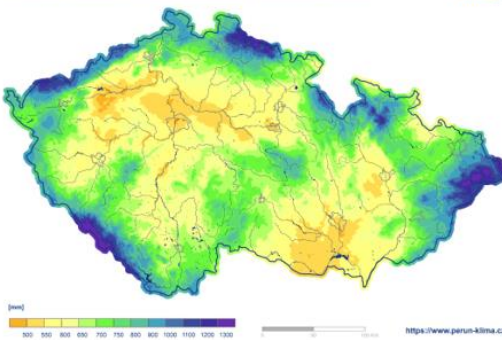


Obr. 17 Průměrná minimální roční teplota v obdobích 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100, scénář SSP5-8.5

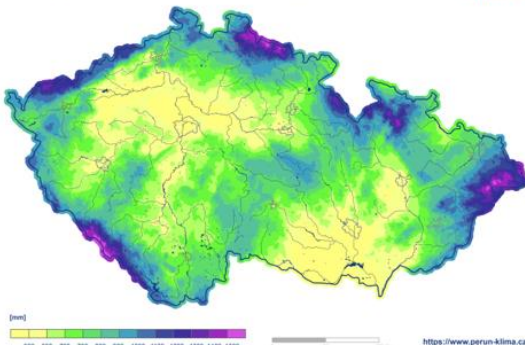
Průměrný roční úhrn srážek za období let 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



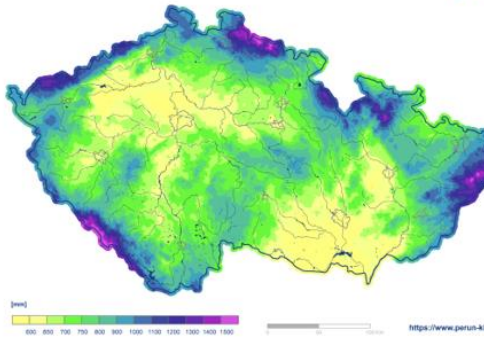
Průměrný roční úhrn srážek za období let 2041–2060 (SSP5-8.5, BIAS)



Průměrný roční úhrn srážek za období let 2061–2080 (SSP5-8.5, BIAS)



Průměrný roční úhrn srážek za období let 2081–2100 (SSP5-8.5, BIAS)



Obr. 18 Průměrný roční úhrn srážek v obdobích 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 a 2081–2100, scénář SSP5-8.5

K těmto základním mapám jsou k dispozici samozřejmě i mapy vybraných klimatologických indexů. Je však předpoklad, že jednotlivé řešitelské týmy si mapy ze základních připravených dat budou připravovat v souladu se svými metodickými postupy samostatně.

Výstupy pro veřejnost

Výše uvedené příklady map jsou připraveny jen v hranicích Česka, což by jejich použití omezovalo. Základní datové sady jsou k dispozici pro oblast, která pokrývá povodí 4. řádu a je následně rozšířena o 5 km. Pro veřejnost jsou připraveny výstupy v této doméně na adrese <https://www.perun-klima.cz/scenare>.

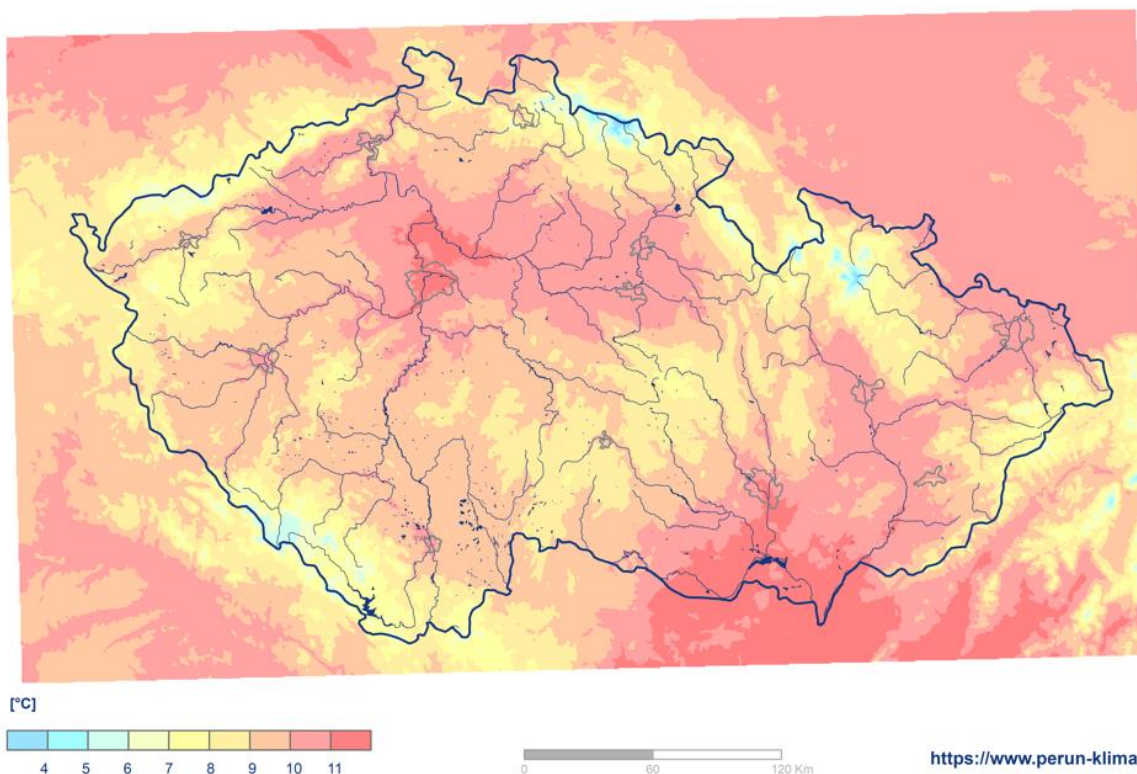
Tab. 3 Soubory připravené pro průměrnou teplotu

SSP2-4.5				SSP5-8.5			
T	Průměrná teplota			T	Průměrná teplota		
2021-2040	CSV	PNG	ASC	2021-2040	CSV	PNG	ASC
2041-2060	CSV	PNG	ASC	2041-2060	CSV	PNG	ASC
2061-2080	CSV	PNG	ASC	2061-2080	CSV	PNG	ASC
2081-2100	CSV	PNG	ASC	2081-2100	CSV	PNG	ASC

Ke stažení jsou připraveny tři typy souborů pro každý prvek (tab. 3 až 6):

- **PNG** – mapa, příklad na obr. 19,
- **CSV** - vypočtené měsíční průměry pro jednotlivé body v PERUN doméně (29154 bodů) a
- rastry ve formátu **ASC** - textový formát, který podporují mnohé GIS aplikace, v záhlaví je informace o velikosti buňky rastru, počet řádků a sloupců a souřadnice rastru.

Průměrná roční teplota vzduchu za období let 2021–2040 (SSP5-8.5, BIAS)



Obr. 19 Příklad mapy v doméně PERUN pro veřejnost

Tab. 4 Soubory připravené pro maximální teplotu

SSP2-4.5												
TMA	Průměr maximální teploty			Počet dní s maximální teplotou ≥ 25 °C (letní den)			Počet dní s maximální teplotou ≥ 30 °C (horký den)			Počet dní s maximální teplotou < 0 °C (ledový den)		
2021-2040	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2041-2060	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2061-2080	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2081-2100	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
SSP-8.5												
TMA	Průměr maximální teploty			Počet dní s maximální teplotou ≥ 25 °C (letní den)			Počet dní s maximální teplotou ≥ 30 °C (horký den)			Počet dní s maximální teplotou < 0 °C (ledový den)		
2021-2040	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2041-2060	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2061-2080	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2081-2100	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC

Tab. 5 Soubory připravené pro minimální teplotu

SSP2-4.5												
TMI	Průměr minimální teploty			Počet dní s minimální teplotou < 0 °C (mrazový den)			Počet dní s minimální teplotou ≥ 20 °C (tropická noc)					
2021-2040	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2041-2060	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2061-2080	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2081-2100	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
SSP5-8.5												
TMI	Průměr minimální teploty			Počet dní s minimální teplotou < 0 °C (mrazový den)			Počet dní s minimální teplotou ≥ 20 °C (tropická noc)					
2021-2040	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2041-2060	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2061-2080	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2081-2100	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC

Tab. 6 Soubory připravené pro úhrn srážek

SSP2-4.5												
SRA	Průměrný úhrn srážek			Počet dní se srážkou > 0 mm			Počet dní se srážkou ≥ 10 mm			Počet dní se srážkou ≥ 30 mm		
2021-2040	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2041-2060	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2061-2080	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2081-2100	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
SSP-8.5												
SRA	Průměrný úhrn srážek			Počet dní se srážkou > 0 mm			Počet dní se srážkou ≥ 10 mm			Počet dní se srážkou ≥ 30 mm		
2021-2040	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2041-2060	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2061-2080	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC
2081-2100	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC	CSV	PNG	ASC

Povinné výstupy DC 2.1

Z roku 2022 byly do roku 2023 přesunuty tyto tři povinné výstupy projektu:

- SS02030040-V37 DC 2.1 Vsouhrn
- SS02030040-V38 DC 2.1 S
- SS02030040-V39 DC 2.1 Nmap

Předložený souhrn (SS02030040-V37) shrnuje dosavadní postup řešení a dostupné výsledky pro řešitelské týmy i pro veřejnost. Řešení v rámci DC 2.1 bude pokračovat až do ukončení projektu v roce 2026 a bude zaměřeno na srovnávací analýzy dostupných RCM simulací (Meitner et al. 2023). Pro PERUN doménu srovnáme výstupy modelů z rodiny ALADIN-CLIMATE, EuroCORDEX, FPS Convection a EUCP projekt pro dva připravené RCP scénáře (SSP2-4.5 a SSP5-8.8) a různé řídicí GCM. Bude analyzována neurčitost scénářů vyplývající z variability mezi RCM modely, z variability mezi řídicími GCM modely, z rozdílů mezi RCP scénáři či z přirozené variability klimatu (Gutiérrez et al. 2018).

Dále bude postupně rozšiřována veřejná databáze výsledných scénářů (SS02030040-V38), která obsahuje aktuálně jen základní prvky.

Závěr

Předložená souhrnná zpráva shrnuje přípravu scénářů změny klimatu v Česku do roku 2100. V období od června 2020 byl připraven specializovaný hardware pro model ALADIN-CLIMATE/CZ, upraven model a provedeno několik historických a dva budoucí běhy modelu. Probíhá validace historických běhů se staničními i reanalyzovanými daty a pro odhady budoucího klimatu je připravována srovnávací analýza s jinými dostupnými scénáři. Výpočetní modelová kapacita bude pravděpodobně využita ještě pro jeden běh modelu podle třetího emisního scénáře. Řešení bude pokračovat až do konce roku 2026.

Literatura

Babuňková Uhlířová, I., Popová, J., Sokol, Z., 2022. Lightning Potential Index and its spatial and temporal characteristics in COSMO NWP model. *Atmospheric Research*, 268, 15 April 2022, 106025.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106025>

Gutiérrez, J. M., Maraun, D., Widmann, M., et al., 2018. An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International Journal of Climatology*, 39(9), 3750-3785. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1002/joc.5462>

Meitner, J., Štěpánek, P., Skalák, P., Dubrovský, M., Lhotka, O., Penčevová, R., Zahradníček, P., Farda, A., 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* 2023, 14, 1442.
<https://doi.org/10.3390/atmos14091442>

Squintu, A. A., Schrier, G., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Klein Tank, A., 2020. Comparison of homogenization methods for daily temperature series against an observation-based benchmark dataset. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, pp. 285-301, <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03018-0>

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Farda, A., Skalák, P., Trnka, M., Meitner, J., Rajdl, K., 2016. Projection of drought-inducing climate conditions in the Czech Republic according to Euro-CORDEX models, *Climate Research*, 70, 179–193, <https://doi.org/10.3354/cr01424>

Zacharov, P., Řezáčová, D., Brožková, R., 2022. Strukturovaná verifikace předpovědí srážek produkovaných současnou konfigurací modelu ALADIN-CZ. Meteorologické zprávy, 75, 3, 70-79.