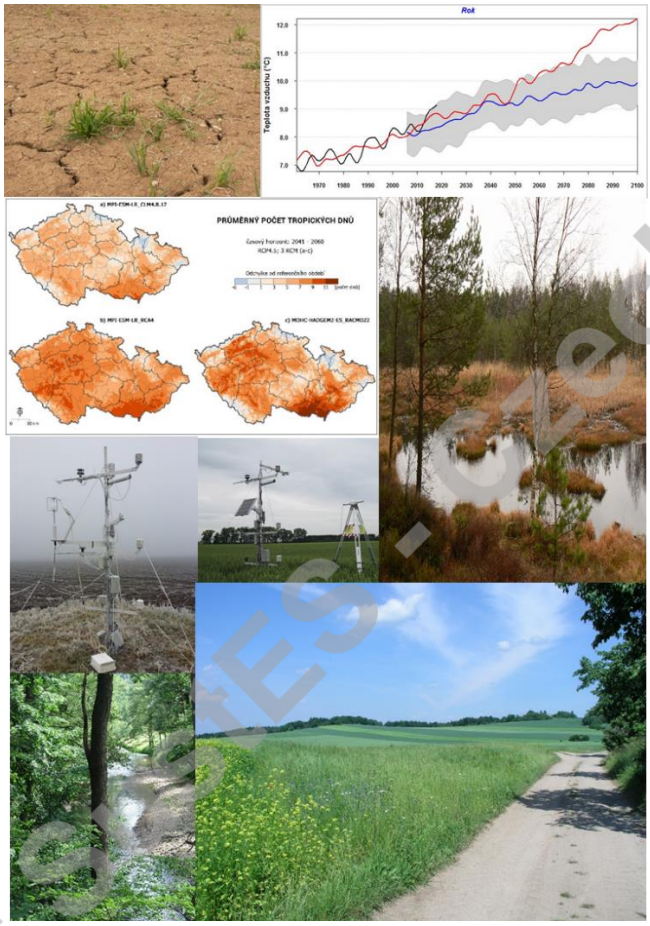
Očekávané klimatické podmínky v České republice

část I. Změna základních parametrů



Projekt SustES - Czechglobe

Petr Štěpánek a kol.

2019

**Petr Štěpánek, Miroslav Trnka, Jan Meitner, Martin Dubrovský,
Pavel Zahradníček, Ondřej Lhotka, Petr Skalák, Jan Kyselý,
Aleš Farda, Daniela Semerádová**

Očekávané klimatické podmínky v České republice

část I. Změna základních parametrů

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)“

Ústav výzkumu globální změny
Akademie věd České republiky
Brno
2019
ISBN. 978-8-87902-28-8

Projekt SustES - Czechglobe

Obsah:

Shrnutí ... 4

1 Úvod ... 6

2 Klimatická změna v celosvětovém kontextu ... 8

3 Klimatická změna v Evropě ... 10

4 Data a metody použité v této studii ... 12

4.1 Staniční měření ... 12

4.2 Modelové simulace ... 13

4.3 Zpracování GCM modelů ... 16

4.4 Zpracování RCM modelů ... 17

4.5 Koncept klimatické obálky, výběr modelů pro další zpracování ... 18

4.5.1 Regionální klimatické modely ... 19

4.5.2 Globální klimatické modely ... 26

5 Změna klimatu v ČR ... 29

5.1 Minimální očekávatelná změna na základě klimatické obálky ... 29

5.2 Teplota vzduchu ... 33

5.3 Srážkové úhrny ... 38

5.4 Vlhkost vzduchu ... 44

5.5 Sluneční radiace ... 45

5.6 Rychlost větru ... 47

5.7 Vybrané klimatologické charakteristiky ... 49

5.7.1 Vysoké teploty vzduchu ... 49

5.7.2 Nízké teploty vzduchu ... 52

5.7.3 Počty srážkových dnů ... 56

6 Závěr ... 65

Poděkování ... 65

Seznam tabulek ... 66

Seznam obrázků ... 66

Seznam literatury ... 70

Projekt SustES - Czechglobe

Shrnutí

Projekt SustES má za cíl vyvinout principiálně nový koncept určení národní adaptační strategie pro zajištění udržitelnosti ekosystémových služeb, a zvláště pak potravinové bezpečnosti (tj. zajištění dostatečného množství potravin odpovídající kvality) v podmínkách probíhajících klimatických i socioekonomických změn. Všechny aktivity projektu směřují k definování použitelných adaptačních strategií uvažující jak globální, tak i lokální faktory, které zemědělství a krajinu ČR budou v budoucnu ovlivňovat. Vývoj naší krajiny a zemědělství v ní totiž není a nebude dán reakcí na samotnou klimatickou změnu na našem území, ale změnami v celosvětovém agrárním sektoru i dopady na další sektory národního hospodářství. Míra naší budoucí úspěšnosti jako státu bude do jisté míry záviset na schopnosti odhadovat dopady klimatické změny v jiných částech světa a jejich důsledky zohledňovat v našich rozhodnutích.

Jedním ze zásadních poslání projektu je připravit aktualizované klimatologické údaje vymezující co nejpřesněji možný rozsah klimatické změny a výsledky zpřístupnit odborné i laické veřejnosti. Proto bylo připraveno shrnutí českém jazyce a zpřístupněno na www.klimatickazmena.cz.

V rámci celosvětového výzkumu vznikla v posledních 40 letech řada sofistikovaných klimatických modelů, které na základě funkčních vztahů klíčových fyzikálních, biogeochemických a biologických procesů popisují změnu klimatu i pro oblast střední Evropy a v České republice. Klimatické modely odhadují chování současného i budoucího klimatu pouze s jistou mírou přesnosti. Proto bylo v první fázi projektu věnováno značné úsilí výběru těch modelů, které pro území našeho regionu poskytují výsledky, které jsou fyzikálně konzistentní s pozorovanými daty. Výstupy takto vybraných klimatických modelů byly dále korigovány se znalostí reliéfu a dalších specifik našeho území. Odhad budoucího vývoje na základě objektivně validované sady klimatických modelů je prvním předpokladem návrhu odpovídající adaptační strategie. Smyslem adaptační strategie je vynakládat prostředky pouze na ta opatření, která jsou efektivní a nejsou ani zbytečně robustní nebo naopak málo ambiciózní.

V této (první) etapě je prezentována změna klimatu pomocí tzv. klimatické obálky, kdy z velkého množství vstupních regionálních (RCM) a globálních (GCM) klimatických modelů byly vybrány reprezentativní sady dobře popisující jak střední odhad očekávané klimatické změny, tak meze včetně tzv. „nevyhnutelné změny“. Tou rozumíme takovou změnu klimatických parametrů, která nastane téměř jistě.

Jelikož současný vývoj klimatu odpovídá nejvíce emisnímu scénáři RCP8.5 a v některých parametrech je tento nejdramatičtější scénář již překračován, byl k vyhodnocení použit

Projekt SustES - Czechglobe

právě tento výhled. Je ale nutné říci, že až do přelomu století nehraje volba emisního scénáře podstatnou roli. Jak lze vidět na obrázku 1, do roku 2050 je předpovídaný vývoj klimatu podobný bez ohledu na emisní scénář, a až za tímto časovým horizontem dochází k výraznějšímu rozcházení jednotlivých modelů. S největší pravděpodobností se naše území do poloviny století oteplí v průměru o 2 °C. V nejbližším období 2021–2040 lze očekávat nárůst o 1 °C. Do konce století tato minimální změna může činit 3 °C, pokud lidstvo neprovede redukci skleníkových plynů a nedojde ke zpomalení tempa nárůstu teplot vzduchu. Pro srážkové úhrny lze kromě zimy očekávat nezměněné hodnoty, případně jejich malý – statisticky nevýznamný – pokles, a to především na jaře a v létě. Stagnace srážek v kombinaci s vyšší teplotou vzduchu každopádně znamená mj. vyšší hodnoty evapotranspirace, a tedy značné riziko častějších a delších epizod sucha. Modely se shodují, že k nejmenšímu nárůstu srážek, či dokonce k jejich poklesu, dojde na jižní Moravě. To by vzhledem k tomu, že jde o nejteplejší oblast České republiky, vedlo k výraznému snížení dostupnosti vláhy a zásadnímu zhoršení zemědělské produkce v této oblasti.

Počet tropických dnů, které mají výrazný dopad na přírodu (vysušování krajiny) a lidský organismus (např. od pouhého nepohodlí po fatální zdravotní komplikace) podle ensemblového průměru z vybraných RCM simulací do budoucna rovněž poroste. V období 2021–2040 očekáváme nárůst počtu tropických dnů čtvrtinu, a do poloviny století dosažení dvojnásobku hodnot obvyklých v letech 1981–2010. Zde je nutné uvést, že v posledních letech sledujeme vyšší počet tropických dní oproti modelovým simulacím, kdy hodnoty v některých letech (průměr za celou ČR) již přesahují 20 dní (roky 1994 a 2003), a v roce 2015 bylo zaznamenáno téměř 27 dní. Počet tropických dnů bude narůstat o něco rychleji v Čechách oproti Moravě.

Podobně jako u srážkových úhrnů dochází u počtu dnů se srážkami (1, 10, 20 a 50 mm a více) k jejich nárůstu oproti současnosti. Počet dnů se srážkami nad 1 mm se příliš nezmění. Počet dní se srážkami většími než 10 resp. 20 mm v budoucnu dále poroste, a to zejména v zimě. Od poloviny století už je detekován i nárůst dnů se srážkami nad 50 mm.

V dalších etapách projektu, které budou bezprostředně následovat, budou nejdříve zpřístupněny detailní údaje o reprezentativnosti jednotlivých scénářů a klimatických modelů. Následně budou analyzovány extrémní jevy (vč. tzv. sdružených událostí), bude zde podrobněji popsána problematika sucha (vč. evapotranspirace) a dalších charakteristik potřebných jako podrobnější vstupy do návazných impaktových studií.

Projekt SustES - Czechglobe

1 Úvod

Projekt SustES má za cíl vyvinout principiálně nový koncept pro identifikaci rizik a adaptační strategie pro zajištění udržitelnosti ekosystémových služeb, a zvláště pak potravinové bezpečnosti (tj. zajištění dostatečného množství potravin odpovídající kvality) v podmínkách probíhajících klimatických i socioekonomických změn. Všechny aktivity projektu směřují k definování holisticky pojatých adaptačních strategií uvažující globální i lokální faktory originálním a inovativním způsobem.

Při přípravě projektu SustES bylo jasné, že založit naše strategická rozhodnutí v budoucnosti na základě sdružení simulovaných výstupů ze stále rostoucího počtu emisních scénářů (RCP) globálních klimatických modelů (GCM) i modelů regionálních (RCM) není praktické a ani technicky proveditelné. Velký soubor klimatických modelů snižuje vypovídací schopnost analýz pro použití v impaktových / adaptačních iteračních řetězcích efektivní, a proto to neslouží svému účelu, což je rozvoj soudržných, efektivních a robustních strategií. Zároveň GCM a RCM projekce pravděpodobně zkreslují zastoupení extrémních událostí, a tak je třeba zvážit další spolehlivé informace o rozsahu, závažnosti a četnosti extrémů v minulosti. Proto je v rámci projektu SustES nová koncepce "Climate change envelope – obálky změny klimatu CliChE", která nahrazuje tradiční a v současné době používaný přístup "climate scenario" nebo "scenario ensemble". CliChE bude hodnotit/vážit GCM/RCM na základě důkladného vyhodnocení jejich výkonů (s využitím množství pozorovaných klimatických dat) a zváží také pravděpodobnost realizace RCP (scénářů založených na nárůstu radiace) s použitím nejaktuálnějších dat. Současně ale ve druhém kroku přinese i masivní využití přístrojových pozorování, dokumentárních pramenů i proxy dat pro zpřesnění odhadu frekvence a intenzity extrémních jevů.

Tato práce přináší první část metodiky CliChE, a tou je:

1. Popis očekávaného rozsahu změny klimatu pro hlavní klimatické prvky.
2. Metodu objektivního výběru reprezentativního souboru RCM/GCM modelů pro impaktové analýzy.
3. Odhad nevyhnutelné změny klimatu, která slouží pro stanovení rozsahu tzv. „no-regret“ adaptace tedy míry adaptace, která téměř jistě nebude společností později vnímána jako znehodnocená investice.
4. Střední a maximální odhad pravděpodobného rozsahu změn klimatu, pro návrhy adaptačních opatření pro jevy/sektory/faktory, kde je aplikace „no-regret“ přístupu nevhodná.

Celá studie se soustředí na Českou republiku a kombinuje regionální i globální klimatické modely v podobě dostupné na počátku roku 2019. Tyto podklady pak budou využívány všemi

Projekt SustES - Czechglobe

ostatními týmy projektu SustES, ale předpokládá se a bude podporováno využívání těchto dat ze strany dalších vědeckých týmů.

Projekt SustES - Czechglobe

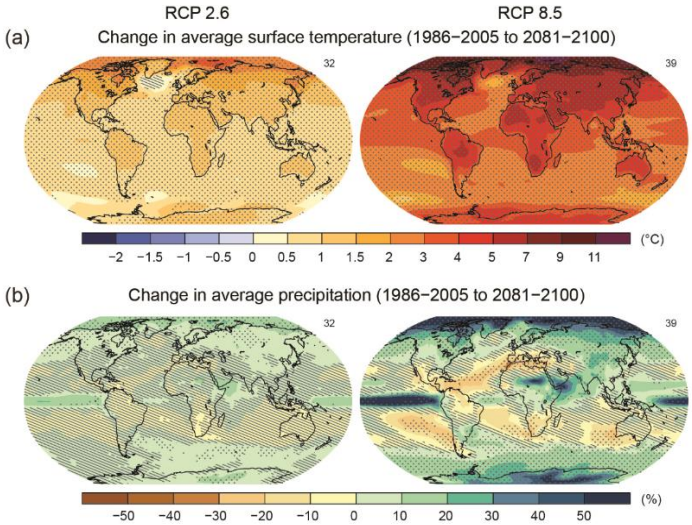
2 Klimatická změna v celosvětovém kontextu

Probíhající globální změna klimatu je předmětem všeobecného velkého zájmu laické i odborné veřejnosti. Aktuální poznatky o jejím průběhu shrnují vždy jednou za několik let hodnotící zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change, dále jen IPCC). Poslední hodnotící zpráva IPCC vydaná v roce 2013 shrnuje několik hlavních pozorovaných projevů změny klimatu souvisejících s nárůstem koncentrací skleníkových plynů v atmosféře (IPCC, 2013). Mezi ty se řadí globální zvýšení průměrné teploty vzduchu, oteplování oceánů a zvyšování jejich hladiny, tání většiny velkých pevninských ledovců a úbytek mořského zalednění v Arktidě.

Globální průměrná roční teplota vzduchu se mezi roky 1880 až 2012 zvýšila o přibližně 0,8 °C (IPCC, 2013); pro rok 2017 se přitom odhad nárůstu oproti preindustriálnímu období pohybuje kolem 1 °C (IPCC, 2018). Oteplování atmosféry je výraznější na severní než na jižní polokouli a podobně je výraznější nad pevninou než nad hladinou oceánu. Od poloviny 20. století přibývá teplých (a ubývá studených) dní jak co do jejich četnosti, tak intenzity (IPCC, 2013). Horké vlny se vyskytují častěji, jsou výraznější a mají delší trvání. Vývoj srážkových úhrnů od počátku 20. století naproti tomu neposkytuje tak jednoznačný obrázek o změně. V některých částech světa se roční úhrny snížily (např. v řadě oblastí kolem Středozemního moře), jinde se zvýšily (např. ve Skandinávii), změny však většinou nejsou statisticky významné.

V průběhu 21. století předpokládají globální klimatické modely z CMIP5 ansámblu (CMIP5 je 5. fáze mezinárodního projektu Coupled Model Intercomparison Project, jehož cílem je poskytnout nejnovější informace o proměnách klimatu Země prostřednictvím simulací globálních klimatických modelů) další nárůst průměrné teploty vzduchu. Míra předpokládaného oteplení je různá napříč jednotlivými modely a uvažovanými scénáři budoucích koncentrací skleníkových plynů v atmosféře a liší se rovněž geograficky (viz např. obrázek SPM.8 z IPCC AR5 WG1 Summary for Policymakers). Na konci 21. století (2081–2100) vzroste globální průměrná roční teplota vzduchu oproti konci 20. století (1986–2005) dle středního odhadu o 1,0 °C (scénář RCP2.6) nebo 1,8 °C (scénář RCP4.5) popř. až 3,7 °C (scénář RCP8.5), viz obr. 2-1. Největší oteplení se předpokládá v mírných a vysokých zeměpisných šířkách severní polokoule. Signál změny srážek mezi modely není jednotný (některé modely předpokládají nárůst, jiné zase úbytek celkových ročních úhrnů srážek) a je výraznější u scénářů předpokládající větší oteplení. Velmi zjednodušeně lze říci, že pokles srážek modely předpokládají v místech jejich současného nedostatku, a naopak předpokládají jejich nárůst tam, kde i v současném klimatu jsou srážky relativně hojné. Dobrá shoda mezi modely je v případě nárůstu srážek ve vysokých zeměpisných šířkách obou polokoulí.

Projekt SustES - Czechglobe

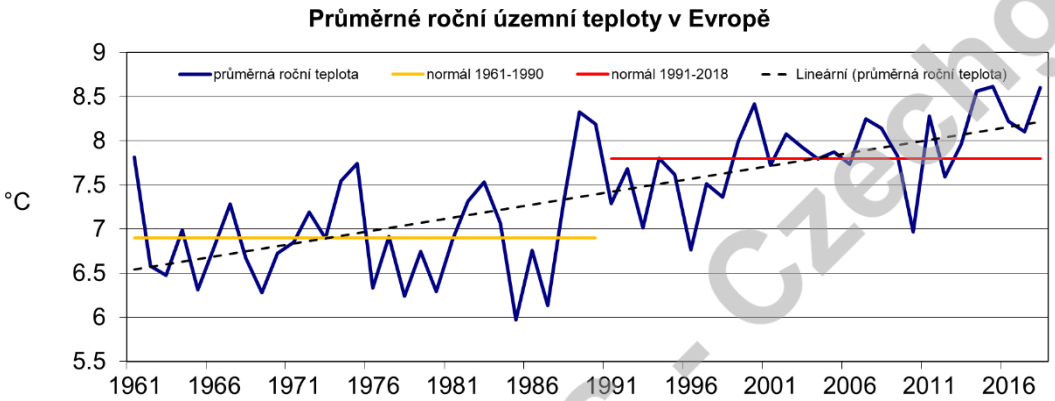


Obr. 2-1. ***Střední změna teplot (nahoře) a srážek (dole) na konci 21. století dle globálních klimatických modelů z CMIP5 ansámblu pro scénáře RCP2.6 (nalevo) a RCP8.5 (napravo) (převzato z IPCC AR5 WG1 SMP).***

Projekt SustES - Czechglobe

3 Klimatická změna v Evropě

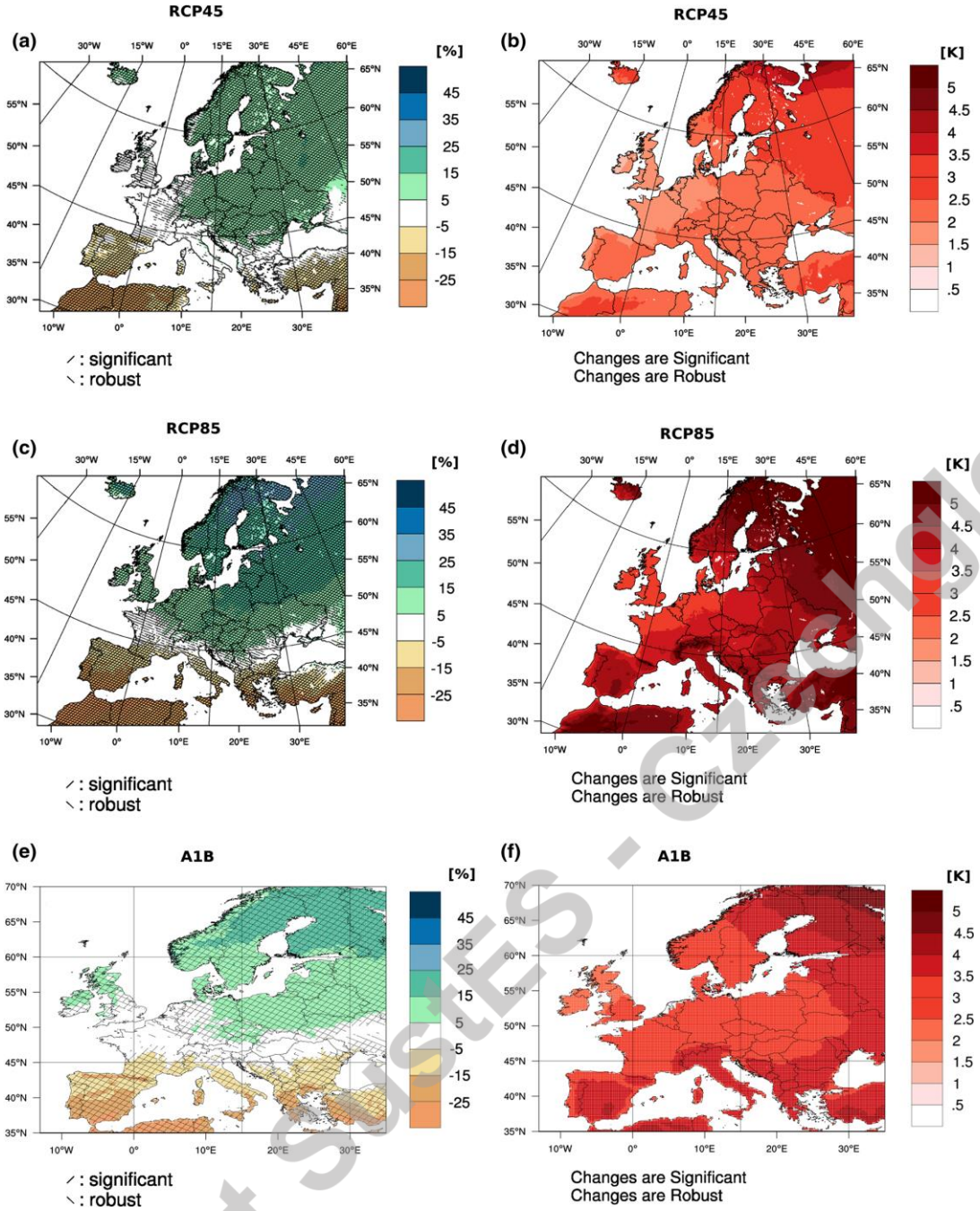
Oteplování planety je patrné rovněž z pozorovaných měření v Evropě. Průměrná roční teplota vzduchu se mezi roky 1961 a 2018 zvyšuje tempem 0,3 °C za desetiletí, přičemž za posledních 28 let (1991–2018) narostla oproti průměru 1961–1990 podobně jako v ČR o 0,9 °C (obr. 3-1). Změna srážek v Evropě není opět uniformní, nicméně více srážek v průběhu roku za období od roku 1961 pozorujeme ve Skandinávii či severně od našeho území.



Obr. 3-1. ***Změna průměrné roční teploty vzduchu v Evropě podle E-OBS datasetu.***

Podrobnější výhled vývoje teplot a srážek na území Evropy vychází ze simulací regionálních klimatických modelů. Tyto simulace patří do evropské části globálního CORDEX experimentu (obr. 3-2). V případě evropského CORDEX experimentu (Euro-CORDEX) proběhlo pomocí regionálních modelů zjemnění výstupů z globálních modelů až do sítě 0,11°, což odpovídá prostorovému rozlišení přibližně 12,5 km. Projekce Euro-CORDEX modelů (Jacob et al. 2014) potvrzují nárůst teploty vzduchu v Evropě o 1,5–4,5 °C (scénář RCP4.5), resp. o 2,5–5,5 °C (scénář RCP8.5) na konci 21. století (2071–2100) vůči referenčnímu období 1971–2000. Na většině evropského kontinentu by měly narůst roční úhrny srážek, nejvíce přitom v severní a severovýchodní Evropě. Naopak ve Středozemí jsou simulovány nižší roční úhrny srážek. Oproti dřívějším odhadům by oblast mírného nárůstu srážek měla být větší, než se dosud předpokládalo.

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 3-2. ***Změna průměrného úhrnu srážek (vlevo) a teploty vzduchu (vpravo) na konci 21. století (2071–2100) vůči konci 20. století (1971–2000) dle Euro-CORDEX modelů a scénářů RCP4.5 a RCP8.5. Pro srovnání jsou v posledním řádku rovněž zobrazeny projekce starší generace modelů dle scénáře A1B.***

Projekt SustES - CzechGlobe

4 Data a metody použité v této studii

4.1 Staniční měření

Pro porovnání výstupů klimatických modelů byla využita staniční měření. K tomu byla použita statisticky zkontrolovaná meteorologická data ČHMÚ zakoupená Ústavem výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. Každá časová řada obsahuje chyby měření, nehomogenity a také chybějící hodnoty. Aby byl omezen vliv těchto problémů na výsledky analýzy, vybrané časové řady prošly kontrolou kvality dat, byla testována jejich nehomogenita a případné detekované zlomy v časových řadách byly opraveny. Na závěr byly interpolačními metodami doplněny všechny chybějící údaje. Zpracování proběhlo v denním kroku.

Kontrola kvality dat kombinuje více přístupů, které zaručují lepší výsledek jak v detekci skutečných chyb, tak v rámci snížení počtu falešných detekcí. Byla použita metoda a software MetQC, který byl vyvinut a dokončen v rámci projektu Copernicus climate services (C3Surf). Kromě výpočtu mezikvartilových odchylek je testovaná stanice podrobena porovnání s okolními stanicemi a také s vypočtenou tzv. „očekávanou“ hodnotou z těchto okolních stanic. Takto detekované chyby jsou v datovém souboru nahrazeny chybějící hodnotou.

Po kontrole kvality dat dochází k detekci nehomogenit v časové řadě. To je prováděno v měsíčních datech pomocí Alexandersonova SNHT testu (Alexandersson 1986) a Maronna a Yohai bivariate testu (Maronna, Yohai 1978). Detekované nehomogenity jsou poté porovnány s metadaty. Oprava nehomogenit probíhá v denním kroku pomocí metody DAP (Distribution Adjusting by Percentiles, Štěpánek et al., 2009), která je založena na opravě pomocí jednotlivých percentilů a vychází z metody pro korekci regionálních klimatických modelů (Deque, 2007).

Po kontrole kvality dat a homogenizaci je přikročeno k doplnění chybějících hodnot. To funguje na principu prostorového doplnění za použití interpolačních metod. Ty zohledňují geografické aspekty každé stanice. Vše bylo provedeno pomocí software ProClimDB (www.climahom.eu). Více o použitých metodách a výsledcích lze najít v relevantní odborné literatuře (například Štěpánek et al. 2011a, 2011b, Štěpánek et al. 2013).

Následně byla data interpolována v denním kroku do gridových vrstev s rozlišením 500x500 m pomocí vlastní interpolační metody založené na regresním krigingu. Jako projekce pro vstupní digitální model terénu, a tedy i pro samotné výstupy, byl zvolen v Evropě používaný systém EPSG 3035 (ETRS89/ETRS-LAEA). Nadmořská výška použitá jako prediktor v regresi byla v případě srážek a slunečního svitu shlazena, naopak v případě maximální a minimální teploty vzduchu, větru a vlhkosti vzduchu byl používán neshlazený terén. Jinak u tzv. pomocných prediktorů jako je drsnost terénu, sklon a expozice, bylo

Projekt SustES - Czechglobe

použito shlazení u všech prvků. Tímto způsobem bylo vyprodukováno více než 100 tis. výsledných gridových vrstev a kolem 1 milionu pomocných výstupů.

4.2 Modelové simulace

Globální klimatické modely (GCM) jsou matematické modely cirkulace atmosféry a oceánu a jsou základním nástrojem pro pochopení klimatu a jeho vývoje v minulosti i do budoucnosti. V průběhu posledních 50 let vývoje GCM tyto modely získaly schopnost simulovat nejen samotnou cirkulaci atmosféry či oceánu, nýbrž děje spjaté s kryosférou, zemským povrchem, vegetací na souši či biochemií oceánu. Současná generace GCM, která byla použita v poslední hodnotící zprávě IPCC AR5, bývá též nazývána jako Earth System Model (ESM). Takový model v sobě již zahrnuje kompletní koloběh uhlíku nejen v atmosféře, nýbrž i v rámci biochemických a s mořským životem spjatých procesů v oceánu nebo v rámci ekologie suchozemských rostlin a změny zemského pokryvu. Z důvodů vzrůstající komplexity GCM – ESM rovněž rostou i výpočetní nároky těchto modelů na počítačovou techniku, a proto i dnes zůstává horizontální prostorové rozlišení výpočetní sítě těchto modelů velmi hrubé, cca okolo 100 km či více. To znamená, že GCM modely nejsou stále dobře schopny postihnout všechny procesy v klimatickém systému, které se odehrávají na jemnější prostorové škále. Území České republiky stále zůstává v GCM representováno jako severní předhůří či svah Alp. Tato nedokonalá representace vede k hledání dalších cest, jak získat informaci o simulovaném podnebí na regionální či lokální úrovni.

Jednou z cest „zjemnění“ GCM je tzv. „dynamický downscalling“, neboli zpřesnění výpočtu GCM na menším území pomocí regionálního klimatického modelu (RCM). Tento přístup je analogií cesty používané v numerické předpovědi počasí, kdy předpověď z globálního modelu je dále modifikována jiným předpovědním modelem nad omezenou oblastí (např. střední Evropa) a na krajích této oblasti lokální model přebírá informaci z modelu globálního. Horizontální prostorové rozlišení RCM se za posledních cca 15 let zlepšilo ze zhruba 50 km až na jednotky kilometrů. Samotné vyšší rozlišení modelu nejen lépe postihne procesy spjaté se zemským povrchem, ale především zlepší zastoupení tzv. klimatických extrémů v simulovaných datech. Simulace současné generace RCM, které byly vypracovány pro Evropu v rámci evropské části celosvětového CORDEX experimentu, nabízí rozlišení 12,5 km. Jak již bylo naznačeno, síla a univerzálnost poskytované informace z klimatických modelů spočívá v co možná nejpřesnější možné reprodukci fyzikálních a fyzikálně biologických procesů, které probíhají v přírodě. Současný stav lidského poznání je ovšem omezený, jak co se týká přesné znalosti chování klimatu, tak i postupů numerické matematiky, které se využívají v rámci modelu. Dalším limitujícím faktorem je i dostupný výpočetní čas nutný pro běh modelu, protože jeho výpočty jsou tak náročné, že dokáží vytížit i nejsilnější superpočítače a v zásadě svými nároky v maximálních konfiguracích předbíhají možnosti současné výpočetní techniky. Všechny tyto skutečnosti jsou pak odpovědné za vznik různých

Projekt SustES - Czechglobe

nahodilých i systematických chyb ve výsledcích klimatických modelů, které obratem omezují jejich vypovídací schopnost a vnášejí do výsledků výpočtů značnou nejistotu. Je nasnadě, že vzhledem k různým formulacím výpočtů (včetně jejich přesnosti) v jednotlivých modelech a dalších odlišnostech např. v časovém a prostorovém rozlišení se pak výstupy modelů vzájemně liší, často i velmi signifikantně.

Z těchto důvodů se statistická klimatologie zabývá vývojem metod statistické korekce sloužících k potlačování vlivu systematických chyb na výsledky modelů. Zde je třeba zdůraznit, že se jedná opravdu jen o potlačení chyby, a nikoliv její celkovou eliminaci, ta není v současnosti možná a zřejmě tomu tak bude i v budoucnosti. Konkrétní popis statistické korekce použité na výstupy modelů této studie je veden na konci této kapitoly. Zde se budeme věnovat jednotlivým typům potenciálních chyb, které musíme zohlednit.

Zřejmě nejvýraznějšími chybami jednotlivých modelů jsou problémy s reprodukcí průměrných hodnot jednotlivých meteorologických prvků. Tento problém plyne zpravidla z nepřesností ve formulacích jednotlivých fyzikálních procesů v atmosféře. Typicky se jedná o nadhodnocování (méně často podhodnocování) srážek. Podobný problém se může vyskytnout u teplot, kde kromě chyb spojených s parametrizací mohou hrát roli i vstupní fyzikální parametry, zejména charakteristiky zemského povrchu, jakými je zejména albedo, ale třeba i jeho tepelná vodivost a kapacita. Tyto problémy jsou často vázané i na prostorové rozlišení modelu, protože tyto fyzikální parametry jsou velmi prostorově variabilní a tuto variabilitu není možné dostatečně přesně reprezentovat ve výpočetní síti modelu, která musí být z povahy věci vždy nesouvislá („finite size“) v protikladu vůči plně spojité přírodě. Tento typ chyby lze zpravidla potlačit s využitím metod statistické korekce a není fatální pro využití modelových výsledků. Problematickými typy chyb je ovšem anomální roční, vzácněji denní chod meteorologických prvků, které indikují, že matematicko-fyzikální aparát modelu má příliš velké potíže reprodukovat skutečné chování klimatu. Tento typ chyby už zpravidla vede k zamítnutí modelových výsledků pro jejich využití v dalším výzkumu. Podobně vážný problém pak představuje i špatná prostorová korelace mezi modelem reprodukovaným a skutečným meteorologickým polem, které indikuje, že modelové výpočty přinejmenším pro postiženou oblast na zemském povrchu nejsou v pořádku a neměly by být dále využívány.

Hledání příčin těchto chyb v jednotlivých modelech je velmi obtížný úkol, kterým se při vývoji modelu zabývají jednotlivé modelářské týmy. Jedná se například o „stárnutí“ fyzikálních parametrizací, které jsou např. dobře schopné popisovat dění a reprodukovat skutečný stav v hrubých rozlišeních modelu (např. prostorový krok 100 km), ale selžou ve vysokém rozlišení (10 km). Typickým případem je fyzikální parametrizace srážek: v hrubém rozlišení lze použít parametrizaci založenou na statistickém popisu, ve vysokém rozlišení, kde rychle stoupá význam rozlišené konvekce a georeliéfu pouhý statistický přístup selže a je třeba použít přesnější a podrobnější schéma, které je ovšem náročnější na kalibraci i výpočetní čas. Problémem je zejména fakt, že tyto chyby nevystupují v modelu jednotlivě, ale chyby

Projekt SustES - Czechglobe

jednotlivých fyzikálních parametrizací spolu vzájemně interagují a mohou se různě potlačovat anebo zesilovat. Nepříjemný fakt představuje zejména vzájemná kompenzace chyb, protože není ve výstupech modelu přímo identifikovatelná, ale projeví se nečekaně, pokud je vývojem z modelu odstraněna její „kompenzující protichyba“. Tento komplexní vzájemný vztah fyzikálních parametrizací a jejich chyb je zřejmě největším problémem při vývoji klimatických modelů.

Další velkou skupinou příčin jsou problémy spojené s kvalitou a časovým vývojem vstupních fyzikálních dat, zejména fyzikálních vlastností povrchu. Pro ilustraci náročnosti lze zmínit například vliv drsnosti zemského povrchu, která má dominantní vliv na transport vlhkosti a tepla z přízemní vrstvy do volné atmosféry. Zde modeláři zápolí s přesným popisem charakteru povrchu v urbanizovaných centrech, v lesních oblastech (kde se například drsnost mění i podle stavu vegetace). Na tuto drsnost má ale vliv třeba i sněhová pokrývka (snižuje ji). Samostatným tématem je pak např. drsnost mořské hladiny, která přímo závisí na výšce vln. Je tedy zřejmé, že pokud má model špatnou rychlost větru nad mořem, tak má špatně výšku vlnobití, a tedy i drsnost mořského povrchu. Následkem je špatně spočítaný transport vlhkosti do vyšších vrstev atmosféry, kde je mořská vlhkost unášena velkoprostorovým prouděním např. nad pevninu, kde se pak chyba projeví ve špatně spočítané množství oblačnosti a následně srážek i hodnot slunečního svitu. Chyby tedy modelem do značné míry „putují“ a interagují a tento mechanismus je pak odpovědný za nejistotu v modelových výstupech.

K těmto příčinám je pak nutné připočítat i navazující nejasnosti spočívající v neznalosti budoucího vývoje charakteristik zemského povrchu. Nelze přesně říci, jaký bude rozsah urbanizace, nízké vegetace v kulturní krajině či plochy lesů. Modely sami o sobě neznalost těchto informací nemohou kompenzovat a nahradit. Navíc v současné době není ve většině modelů dobře ošetřen i samotný vývoj těchto prvků v rámci modelových výpočtů. Modely nedokážou prozatím vyhodnotit např. skutečnost, že se v určité lokalitě změní podmínky (např vlivem sucha) natolik, že stávající vegetace (např. smrkový les) úplně vymizí. I to je předmětem současného vývoje, ilustrací náročnosti řešených vědeckých problémů a potřeby koordinace a spolupráce s odborníky různých vědeckých disciplín.

Tyto skutečnosti je třeba mít na paměti při interpretaci a dalším využívání modelových výsledků spolu se skutečností, že v našem ansámblu jsou zahrnuty i modely různě komplexní a často značně odlišné. Na druhé straně platí, že klimatické modely představují „state-of-the-art“, tedy zohledňují nejvyšší úroveň poznání fyzikálních procesů v atmosféře a dalších částech klimatického systému, jakého kdy lidstvo dosáhlo, a tyto poznatky jsou při modelování využity.

Před samotnou analýzou modelových výstupů byly z řad odstraněny chyby modelu, tedy byla provedena tzv. korekce biasu. Výstupy jednotlivých klimatických modelů byly nejprve validovány pomocí měření na stanicích, na základě tohoto porovnání byla poté provedena korekce aktuálního biasu daného modelu, a to pro všechny zpracovávané meteorologické

Projekt SustES - Czechglobe

prvky (klimatické charakteristiky). Korekce na chybu modelu (bias) se provádí proto, aby modelové výstupy odpovídaly realitě zkoumaného území, přičemž v prvním kroku jsou porovnány výstupy modelů v kontrolním běhu se skutečnými naměřenými údaji. Na základě zjištěných rozdílů jsou modely opraveny pomocí kvantilové korekce (např. Déque et al., 2007, používáme upravenou verzi tohoto principu), konkrétně variabilní korekcí podle percentilů, aby byly modelové simulace plně kompatibilní se staničními měřenými údaji. Po korekci jsou vypočteny stejné klimatické charakteristiky jako pro současné klima. Výstupy modelů byly dále interpolovány do gridové vrstvy s rozlišením 500 m pro vyhodnocení prostorového rozložení zkoumaných veličin.

4.3 Zpracování GCM modelů

Pro další práci bylo analyzováno celkem 27 globálních klimatických (GCM) modelů z CMIP5 ansámblu, jejichž měsíční data vybraných základních meteorologických prvků (teplota, srážky, vítr, tlak) pro tzv. „historický kontrolní běh“ (minimálně 1971-2005) a projekci klimatu dle RCP8.5 scénáře (2006-2100) byla dostupná na přelomu let 2018 a 2019 na datových nódech Earth System Grid Federation (ESGF) anebo v databázi World Data Center for Climate (WDCC) hostované v German Climate Computing Center (DKRZ) v Hamburku. Takto bylo identifikováno celkem 30 GCM. Seznam modelů spolu s dalšími doplňkovými informacemi uvádí tab. 4-1.

Projekt SustES - Czechglobe

Tab. 4-1. ***Globální klimatické modely uvažované ve studii.***

Model (GCM)	verze	poznámka
ACCESS1-0	r1i1p1	
ACCESS1-3	r1i1p1	
BCC-CSM1-1	r1i1p1	vyloučen při validaci
BCC-CSM1-1-M	r1i1p1	vyloučen při validaci
BNU-ESM	r1i1p1	vyloučen při validaci
CanESM2	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
CESM1-CAM5	r1i1p1	
CNRM-CM5	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	
GFDL-CM3	r1i1p1	
GFDL-ESM2G	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
GFDL-ESM2M	r1i1p1	
GISS-E2-H	r1i1p1	
GISS-E2-H-CC	r1i1p1	
GISS-E2-R	r1i1p1	
GISS-E2-R-CC	r1i1p1	
HadGEM2-AO	r1i1p1	
HadGEM2-CC	r2i1p1	
HadGEM2-ES	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
IPSL-CM5A-LR	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
IPSL-CM5B-LR	r1i1p1	
MIROC5	r1i1p1	vyloučen při validaci, řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
MIROC-ESM	r1i1p1	
MIROC-ESM-CHEM	r1i1p1	
MPI-ESM-LR	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11
MPI-ESM-MR	r1i1p1	
MRI-CGCM3	r1i1p1	vyloučen při validaci
MRI-ESM1	r1i1p1	
NorESM1-M	r1i1p1	řídící model pro Euro-CORDEX EUR-11

4.4 Zpracování RCM modelů

Podobným způsobem jako GCM do studie vstoupilo celkem 19 simulací regionálních klimatických modelů (RCM) o vysokém prostorovém horizontálním rozlišení 0,11 stupně (~ 12,5 km), u nichž byla dostupná denní data pro „historický kontrolní běh“ (minimálně 1971–2005) a projekce budoucího vývoje klimatu (2006–2100) dle alespoň jednoho RCP

Projekt SustES - Czechglobe

scénáře. Výběr odpovídá dostupnosti zmíněných dat v závěru roku 2018 na datových nódech Earth System Grid Federation (ESGF).

Tato podmínka vyloučila využití simulací RCM RegCM4 řízených čtyřmi různými GCM, neboť tato data nebyla dosud zveřejněna na ESGF a zároveň v projekcích klimatu končí rokem 2070 (nikoliv 2100). Staženy a dále analyzovány nebyly ani simulace klimatické adaptace předpovědního modelu počasí WRF, neboť se jedná o mladý komunitní model (ve smyslu využití pro modelování klimatu) a není zde garantována jednotnost všech interních nastavení modelu v rámci jednotlivých simulací. Všechny zde použité simulace RCM mají původ v evropské části mezinárodní CORDEX iniciativy, tzv. Euro-CORDEXu. Seznam modelů spolu s dalšími doplňkovými informacemi uvádí tab. 4-2.

Tab. 4-2. ***Regionální klimatické modely uvažované ve studii.***

RCM	řídící GCM	kontrolní běh	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	označení v textu
ALADIN53	CNRM-CM5	od r. 1950	x	x	x	CNRM-CM5_ALADIN53
ALARO0	CNRM-CM5	od r. 1950	x	x	x	CNRM-CM5_ALARO0
CLM4.8.17	CNRM-CM5	od r. 1950		x	x	CNRM-CM5_CLM4.8.17
	EC-EARTH	od r. 1950	x	x	x	EC-EARTH_CLM4.8.17
	MOHC-HADGEM2-ES	od r. 1950		x	x	MOHC-HADGEM2-ES_CLM4.8.17
	MPI-ESM-LR	od r. 1950		x	x	MPI-ESM-LR_CLM4.8.17
HIRHAM5	EC-EARTH	od r. 1951	x	x	x	EC-EARTH_HIRHAM5
	MOHC-HADGEM2-ES	od r. 1951			x	MOHC-HADGEM2-ES_HIRHAM5
	NCC-NORESM1-M	od r. 1951		x	x	NCC-NORESM1-M_HIRHAM5
RACMO22E	EC-EARTH	od r. 1950		x	x	EC-EARTH_RACMO22E
	MOHC-HADGEM2-ES	od r. 1950	x	x	x	MOHC-HADGEM2-ES_RACMO22E
RCA4	CNRM-CM5	od r. 1970		x	x	CNRM-CM5_RCA4
	EC-EARTH	od r. 1970	x	x	x	EC-EARTH_RCA4
	IPSL-CM5A-MR	od r. 1970		x	x	IPSL-CM5A-MR_RCA4
	MOHC-HADGEM2-ES	od r. 1970	x	x	x	MOHC-HADGEM2-ES_RCA4
	MPI-ESM-LR	od r. 1970	x	x	x	MPI-ESM-LR_RCA4
REMO2009	MPI-ESM-LR	od r. 1950	x	x	x	MPI-ESM-LR_REMO2009
REMO2015	GFDL-ESM2G	od r. 1948	x			GFDL-ESM2G_REMO2015
	IPSL-CM5A-LR	od r. 1948	x			IPSL-CM5A-LR_REMO2015

4.5 Koncept klimatické obálky, výběr modelů pro další zpracování

V současné době jsou pro území České republiky k dispozici desítky simulací, ať už regionálních klimatických modelů (RCM) z mezinárodních koordinovaných aktivit jako

Projekt SustES - Czechglobe

CORDEX (Giorgi a Gutowski 2015) nebo ENSEMBLES (van der Linden a Mitchell 2009) či z jiných experimentů a případových studií, např. CECILIA (Belda et al. 2015). Pro aplikace, kde nevadí hrubší prostorové rozlišení, lze použít velké množství globálních klimatických modelů (GCM) poskytovaných v rámci projektu CMIP5 (Taylor et al. 2012) nebo staršího CMIP3 (Meehl et al. 2007). K dispozici je tedy přes sto modelových simulací, a tedy i možných budoucích vývojů klimatických charakteristik. S tímto množstvím není možné v dopadových studiích pracovat, a proto je třeba vybrat určitou omezenou referenční množinu modelů. Výběr referenční množiny klimatických modelů pro dopadové studie nikdy nelze provést zcela objektivně. I při snaze o co největší omezení subjektivity musí do výběru modelů vstoupit lidský faktor, a to minimálně v rozsahu volby validačních charakteristik a souvisejících metod.

4.5.1 Regionální klimatické modely

Z projektu CORDEX bylo získáno 19 RCM (viz tab. 4-2), které byly podrobeny validaci oproti pozorovaným klimatickým charakteristikám:

i) korelace ročního chodu dlouhodobých měsíčních průměrů,

ii) prostorová variabilita a korelace dlouhodobých sezónních průměrů v létě a zimě,

iii) simulace vztahů mezi extrémně vysokou teplotu v létě a extrémně nízkou teplotou v zimě a atmosférickou cirkulací.

V rámci validace byla jako doplňková informace rovněž zvažovaná vzdálenost modelu od středu ansámblu v RCP8.5 simulaci v období 2021–2040 a 2041–2060 pro jednotlivé prvky. Vzdálenost od středu ansámblu $DIST_m$ pro zvolený prvek P modelu m je definovaná jako

$$DIST_m = \sum_{i=1}^{N} \frac{\sum_{j=1}^{4} \left(\frac{P_{ijm} - \overline{P_{ij}}}{\sigma_{ij}} \right)^2}{N},$$

kde

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{M} \left(P_{ijm} - \overline{P_{ij}} \right)^2}{M}},$$

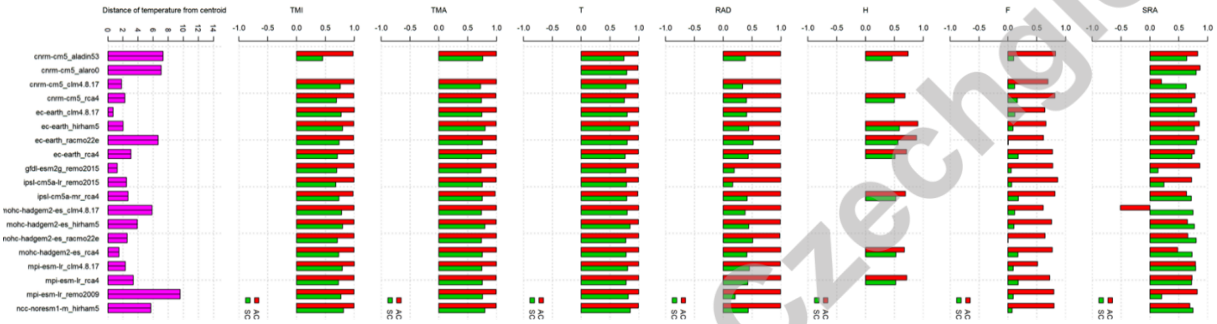
a kde dále N vyjadřuje počet uzlových bodů modelu, index j udává číslo sezony a m je počet modelů. Pruh nad P_{ij} představuje průměr a σ_{ij} směrodatnou odchylku prvku P ze všech

Projekt SustES - Czechglobe

modelů. Tato vzdálenost pak byla použita později pro rozhodování při výběru středního modelu, který dobře representuje ansámblový průměr.

Vyhodnocení dle kritéria zohledňujícího atmosférickou cirkulaci odhalilo, že skóre všech RCM je velmi podobné a mezi modely nejsou větší rozdíly, s výjimkou simulací RCM řízených francouzským GCM IPSL-CM5A. I tyto simulace s mírně horším skóre jsou však přípustné pro další využití. Další rozbor se tedy zaměřil na první dvě validační kritéria uvedená výše.

Výsledky pro tato dvě kritéria pro všech 7 meteorologických prvků shrnuje obr. 4-1, na němž je rovněž doplněna informace o vzdálenosti od centra ansámblu (ve scénářové RCP8.5 simulaci) pro teplotu vzduchu.

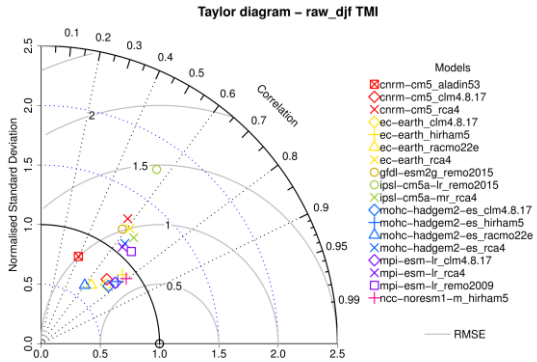


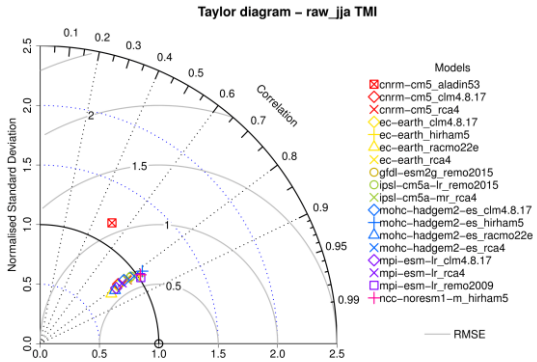
Obr. 4-1. ***Vzdálenost od středu ansámblu pro jednotlivé RCM pro teplotu vzduchu (levý panel) a dále průměrná korelace ročního chodu (AC, červená) a prostorová korelace (SC, zelená) nad ČR pro minimální, maximální a průměrnou teplotu vzduchu (TMI, TMA, T) a dále pro globální záření (RAD), relativní vlhkost (H), rychlost větru (F) a úhrn srážek (SRA).***

Na základě těchto charakteristik bylo vyřazeno 7 RCM z důvodu kritických chyb v simulaci historického klimatu. Tyto kritické chyby by se s velkou pravděpodobností projevovaly i v budoucím klimatu, a tak by zařazení těchto RCM nepřispělo k poznání míry budoucích změn a neurčitostí. Mezi 7 vyřazených RCM patří modely (název je kódován jako „GCM_RCM“):

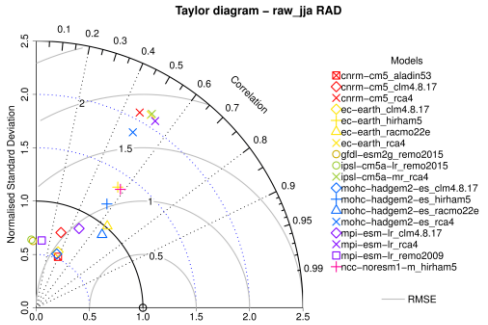
- CNRM-CM5_ALARO0 (2. řádek na obr. 4-1): kromě průměrné teploty a srážek nejsou k dispozici žádné další meteorologické prvky
- CNRM-CM5_ALADIN53 (1. řádek na obr. 4-1): velmi nízké prostorové korelace minimálních teplot v létě i v zimě (viz rovněž Taylorovi diagramy níže), pole relativní vlhkosti v zimě špatně simulováno,

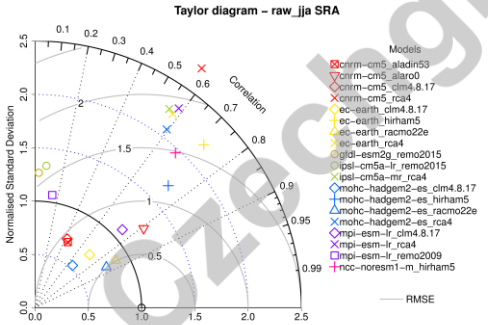
Projekt SustES - Czechglobe





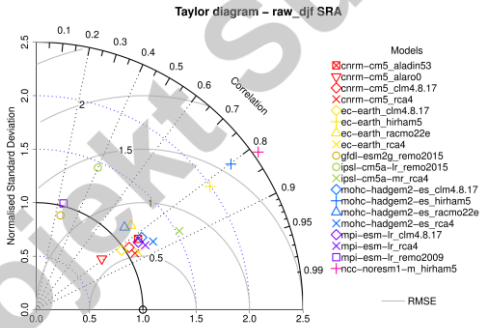
- CNRM-CM5_CLM4.8.17 (3. řádek na obr. 4-1): velmi nízká korelace ročního chodu srážek (obr. 4-1, sloupec AC), malá prostorová korelace pole srážek a radiace v létě (viz Taylorovi diagramy níže),





- MOHC-HadGEM2-ES_CLM4.8.17 (12. řádek na obr. 4-1): opačný roční chod srážek (obr. 4-1, sloupec AC),

- MPI-ESM-LR_REMO2009: velmi nízké prostorové korelace srážek v létě i zimě (viz Taylorův diagram nahoře vpravo a dole vlevo), výrazně nižší než ostatní modely, velmi nízká korelace radiace v létě,

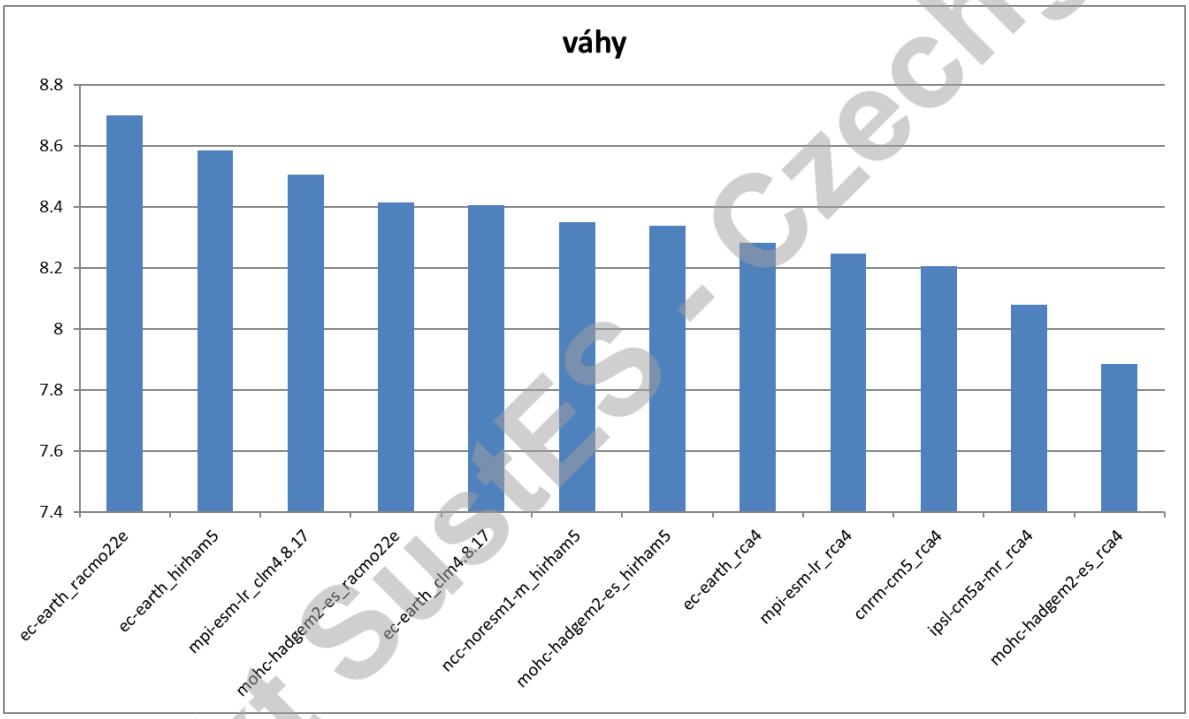


- GFDL-ESM2G_REMO2015: velmi nízké prostorové korelace srážek v létě i zimě, výrazně nižší než ostatní modely (viz Taylorovi diagramy výše), velmi nízká korelace radiace v létě (viz Taylorův diagram výše), další drobnější problémy s maximální teplotou v létě,

Projekt SustES - Czechglobe

- IPSL-CM5A-LR_REMO2015: velmi nízké prostorové korelace srážek v létě i zimě, výrazně nižší než ostatní modely (viz Taylorovi diagramy výše), velmi nízká korelace radiace v létě (viz Taylorův diagram výše), další drobnější problémy s maximální teplotou v létě a zároveň i problém se zimní minimální teplotou.

V případě 12 zbylých RCM byly dále spočítány váhy, s nimiž modely mohou vstoupit do dalších analýz. Váhy byly spočteny z průměrných prostorových korelací teploty, srážek a globální radiace a dále z korelací ročního chodu těchto prvků. Váhy vyšly pro jednotlivé RCM velice podobné (viz obr. 4-2 níže), z čehož plyne, že v další práci je lepší jednotlivé RCM nevážit a výběr užší množiny RCM provést dle jiných kritérií. Tento přístup podporuje i literatura – vážením se vnáší nová nejistota (Christensen et al. 2010).

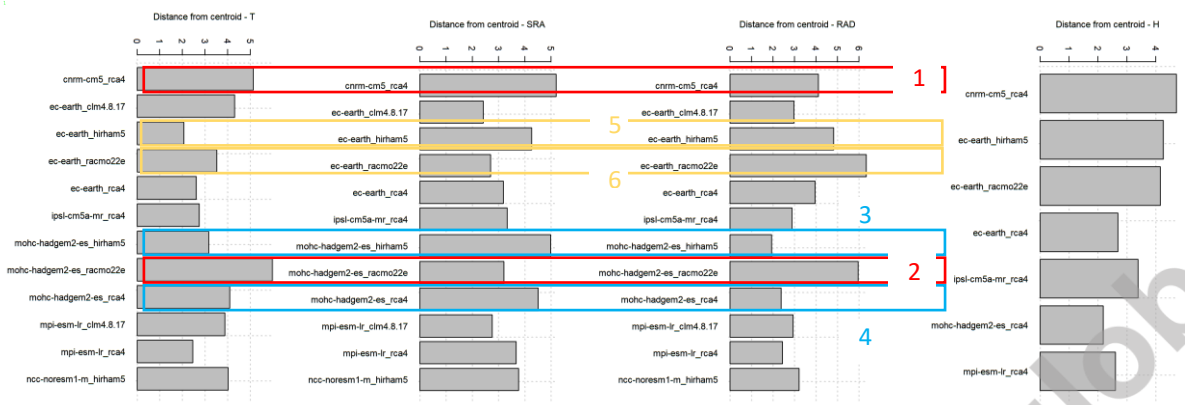


Obr. 4-2. ***Vypočtené váhy ansámblu 12 RCM, které prošly validací.***

Z těchto 12 RCM, ve kterých nebyla shledána žádná kritická chyba, byl nejdřív vybrán střední model na základě míry budoucích změn teploty, srážek a dopadajícího slunečního záření, tedy meteorologických prvků klíčových pro impaktové studie. Jako metrika byla vybrána vzdálenost modelu od středu ansámblu spočtená z bias-korigovaných dat dle scénáře RCP8.5 a se zohledněním dostupnosti relativní vlhkosti (ta u některých simulací chybí, dostupná specifická vlhkost je bohužel hůře využitelná veličina). Výběr probíhal pomocí postupné eliminace od nejhorších modelů. Na základě teploty vzduchu (T) byly vyřazeny modely 1 a 2 (viz obr. 4-3), na základě srážek (SRA) modely 3 a 4 a na základě globálního záření (RAD)

Projekt SustES - Czechglobe

modely 5 a 6. Ze zbylých tří simulací (EC-EARTH_RCA4, IPSL-CM5A-MR_RCA4 a MPI-ESM-LR_RCA4), které mají dostupnou relativní vlhkost, byla jako středová zvolena simulace MPI-ESM-LR_RCA4.

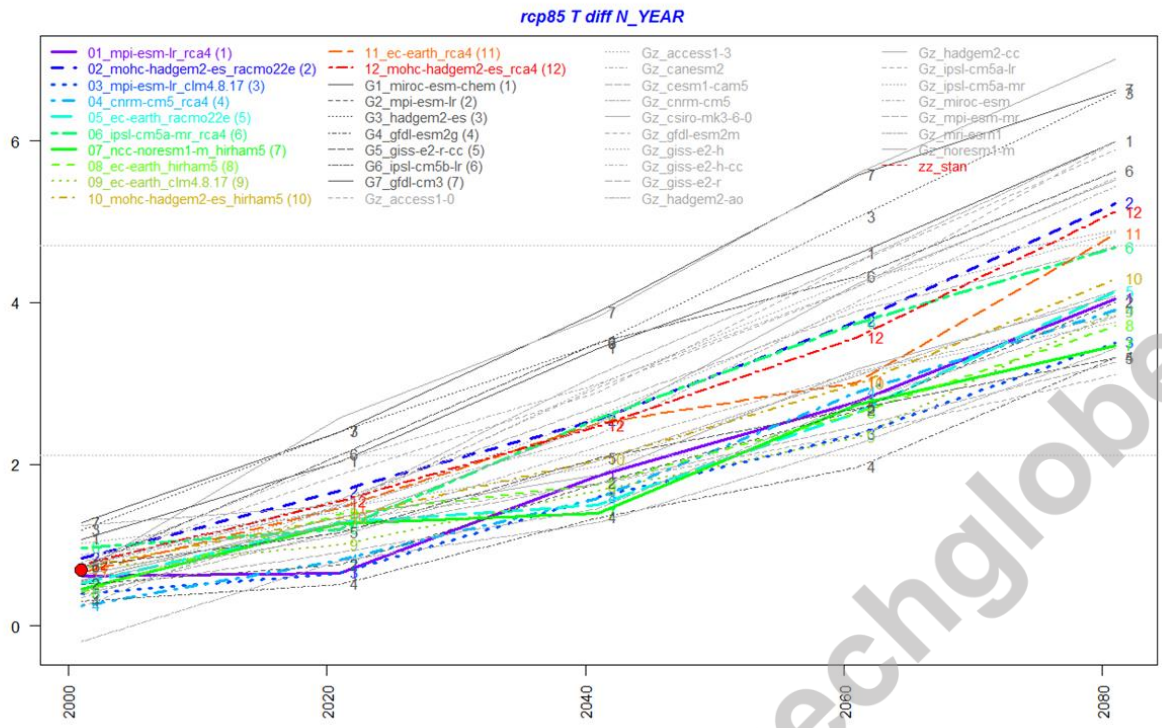


Obr. 4-3. ***Vzdálenosti od středu ansámblu pro 12 RCM pro různé meteorologické prvky s označením modelů, které byly v jednotlivých krocích detekce středního modelu vyřazeny z výběru.***

Kromě tohoto středního RCM byly pro potřeby modelování dopadů vybrány další čtyři modely – nejteplejší, nejchladnější, nejsušší a nejvlhčí, které reprezentují extrémní (méně pravděpodobné) scénáře. V některých případech byl vybrán až druhý nejextrémnější model z důvodu zastoupení co největšího množství různých RCM a GCM v této skupině pěti modelů. Ačkoliv se totiž v některých charakteristikách mohou stejné RCM řízené různými GCM (i různé RCM řízené stejným GCM) na první pohled chovat rozdílně, tyto simulace obvykle sdílejí stejné chyby a nedostatky, které se projevují až při pohledu na jednotlivé sezony nebo během posuzování komplexnějších jevů (charakteristiky vln veder, období sucha či extrémně velkých úhrnů srážek). Je potřeba rovněž podotknout, že výběr modelů se může lišit v různých obdobích. Byl dáván důraz především na období kolem poloviny tohoto století.

Výběr nejteplejšího a nejstudenějšího modelu byl proveden s uvážením vzdálenosti od středu ansámblu a také vizuálně dle grafu změny teploty vzduchu (obr. 4-4). Při výběru bylo zohledněno, aby se co nejméně opakoval jak GCM, tak určitý RCM model, a aby následně u srážek byl jeden model úrovní nad středním a jeden pod středním modelem (vlhčí, resp. sušší než střední model). Tímto způsobem byl identifikován model "nejteplejší" (a zároveň vlhčí), MOHC-HADGEM-ES_RACMO22E (2), a model „nejstudenější" (a zároveň sušší), MPI-ESM-LR_CLM4.8.17 (3).

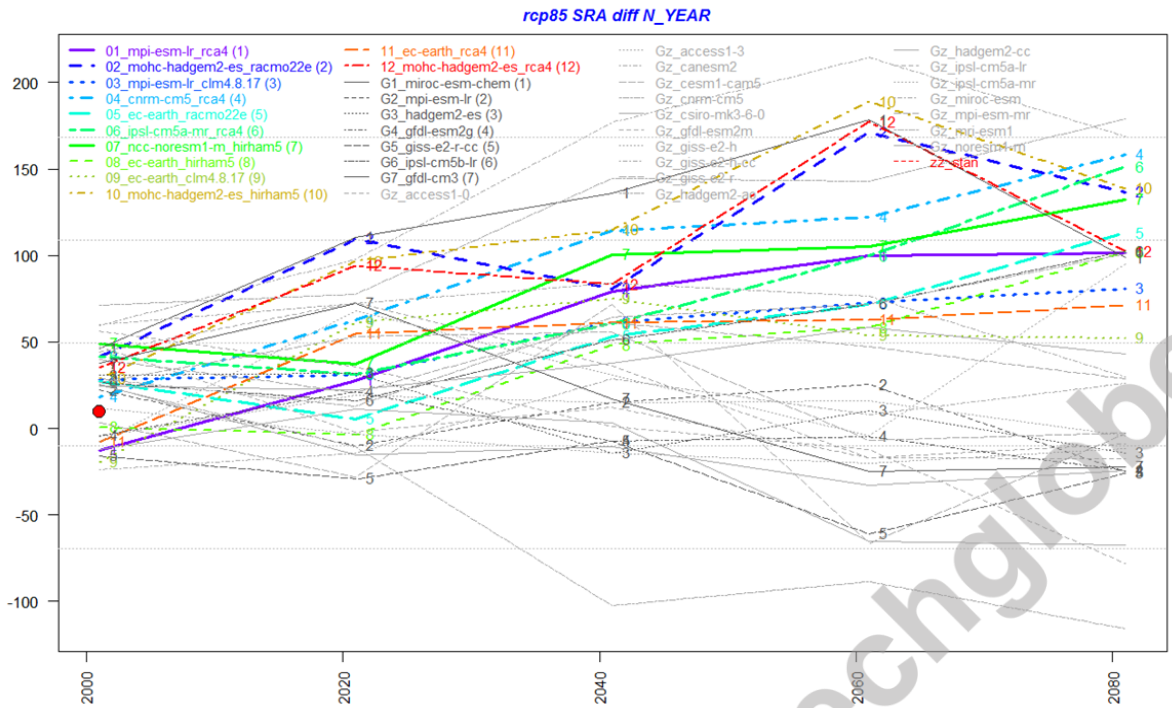
Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 4-4. ***Rozdíl budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a současného (1981–2010) klimatu pro teplotu vzduchu (ve °C), pro GCM (šedě) a RCM (barevně) simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001-2018.***

Výběr nejvlhčího a nejsuššího modelu byl opět proveden dle grafu změn srážkových úhrnů (obr. 4-5) a předchozích vzdáleností od středu ansámblu modelů, ohled byl brán, pokud bylo možné, i na různorodost GCM–RCM (jistě už se musí něco opakovat) a toho, aby zpětně u teploty vzduchu byl jeden model úrovní nad středním a jeden pod středním modelem, jakkoliv ne vždy výrazně v průběhu celého 21. století. Jako model „nejvlhčí“ byl identifikován model CNRM-CM5_RCA4 (4), jako model „nejsušší“ pak EC-EARTH_RACMO22E (5).

Projekt SUSES - Czechglobe



Obr. 4-5. ***<u>Rozdíl</u> budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a současného (1981–2010) klimatu pro srážkové úhrny (v mm), pro GCM (šedě) a RCM (barevně) simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001-2018.***

Výběr dalších dvou modelů do sady o celkovém počtu 7 RCM byl zvoleny dle grafu změn srážek a teploty vzduchu, a dále počtu tropických dnů a počtu dnů s velkými srážkovými úhrny. Byly vybrány modely s jiným chováním změn od předešlých modelů. Ohled byl brán, pokud bylo možné, i na různorodost GCM–RCM a toho, aby zpětně u teploty a srážek byl jeden model úrovní nad středním a jeden pod středním modelem. Takto byly nakonec identifikovány modely IPSL-CM5A-MR_RCA4 (6) a NCC-NORESM1-M-HIRHAM5 (7)

Z 12 modelů, které úspěšně prošly validací, bylo tedy do užšího výběru vybráno následujících 7 modelů (jako doporučení pro používání k různým účelům v impaktových studiích):

- MPI-ESM-LR-RCA4 (1): Representuje v projekcích T (teplota vzduchu) i SRA (srážkové úhrny) ansámblový průměr (ENSmean).
- MOHC-HADGEM-ES_RACMO22E (2): Nejteplejší model, zároveň vlhčí než ENSmean.
- MPI-ESM-LR_CLM4.8.17 (3): Nejstudenější model, zároveň sušší než ENSmean.
- CNRM-CM5_RCA4 (4): Není vždy zcela nejvlhčí, ale je konzistentně vlhčí než ENSmean, teplotně blízký ENSmean.

Projekt SusIES - Czechglobe

- EC-EARTH_RACMO22E (5): v první polovině století druhý nejsušší model, postupně se blíží ENSmean, teplotně blízký ENSmean.
    - IPSL-CM5A-MR_RCA4 (6): Jeden z nejteplejších modelů hlavně v polovině století, kdy vykazuje také nejvíce tropických dnů. Srážkově v první polovině století pod ENSmean (sušší), na konci století ale vlhčí než ENSmean. Jediný zástupce s řídícím GCM IPSL-CM5A.
- NCC-NORESM1-M_HIRHAM5 (7): Spíše studenější a vlhčí model. Vlhčí v důsledku velkého počtu dní s menšími než extrémními srážkami. Jediný zástupce RCM a GCM v celém ansámblu užšího výběru 7 modelů.

Všech 12 RCM včetně podmnožiny užšího výběru 7 RCM shrnuje tab. 4-3.

Tab. 4-3 ***Regionální klimatické modely doporučené pro další analýzy včetně označení sedmice modelů z podvýběru.***

RCM	řídící GCM	číslo ve výběru	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CLM4.8.17	EC-EARTH		x	x	x
	MPI-ESM-LR	3		x	x
HIRHAM5	EC-EARTH		x	x	x
	MOHC-HADGEM2-ES				x
	NCC-NORESM1-M	7		x	x
RACMO22E	EC-EARTH	5		x	x
	MOHC-HADGEM2-ES	2	x	x	x
RCA4	CNRM-CM5	4		x	x
	EC-EARTH		x	x	x
	IPSL-CM5A-MR	6		x	x
	MOHC-HADGEM2-ES		x	x	x
	MPI-ESM-LR	1	x	x	x

4.5.2 Globální klimatické modely

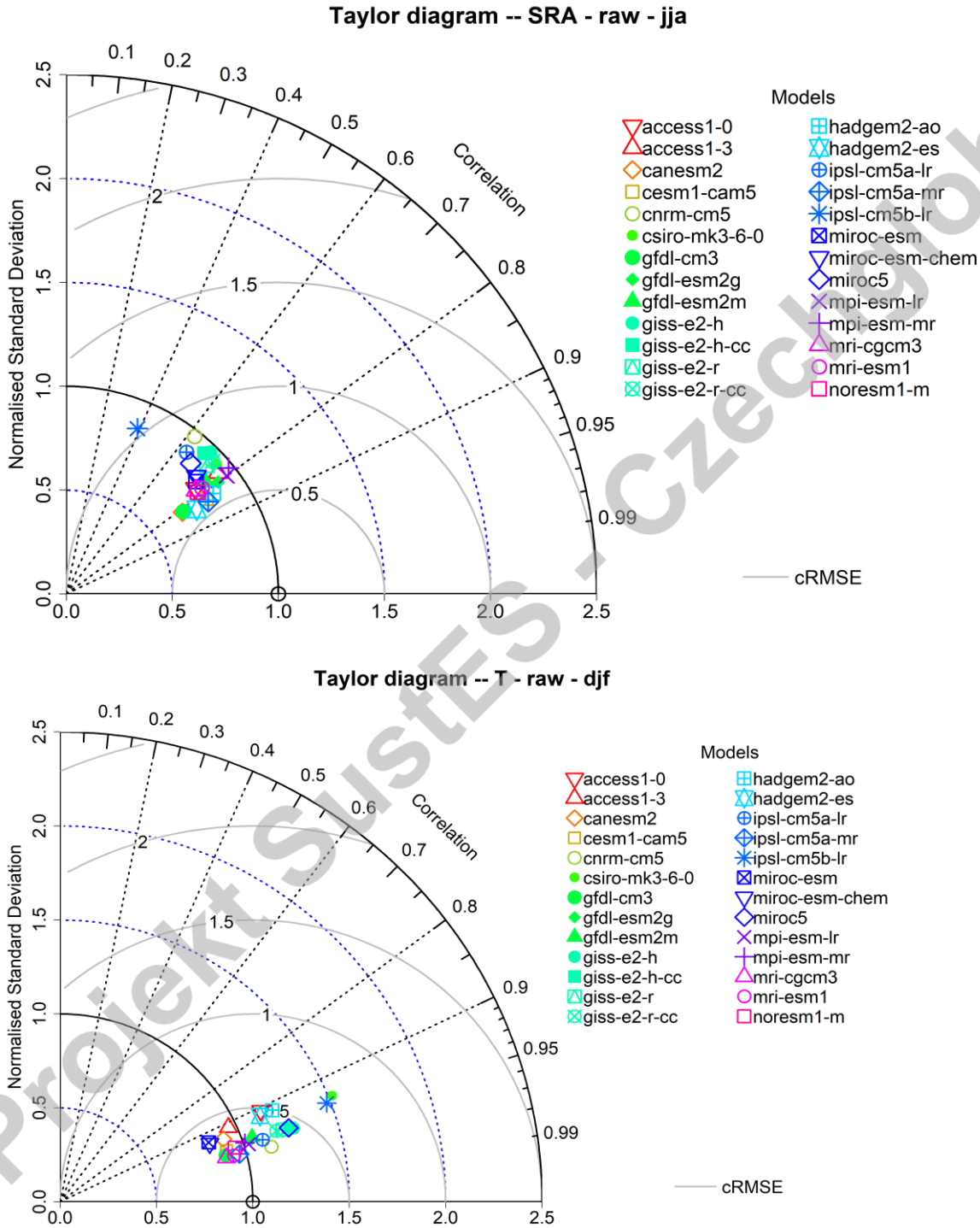
Podobně jako pro RCM, tak i pro GCM jsme pro výběr užší množiny modelů provedli nejdříve validaci. Ta identifikovala pětici modelů označených již v tab. 4-1, které bylo nutné vyloučit z dalšího zpracování.

V případě modelů BNU-ESM, BCC-CSM1-1, BCC-CSM1-1-M byl ze starších dat zjištěn opačný roční chod srážek. Zároveň se ukázalo, že tato data (ani pro další meteorologické prvky) již nejsou veřejně dostupná pro stažení a další zpracování.

Projekt SustES - Czechglobe

Model MIROC5 vykazoval malé korelace v ročním chodu i prostorových korelacích srážek i teploty. V rámci celého ansámblu GCMs byla navíc projekce klimatu pro 21. století dle scénáře RCP8.5 velmi odlehlá od ostatních modelů.

Nakonec model IPSL-CM5B-LR má velmi nízkou prostorovou korelaci srážek v létě, dále vysokou hodnotu RMSE u teploty vzduchu v zimě (viz obr. 4-6).



Obr. 4-6. ***Taylorův diagram pole srážek v létě (nahoře) a pole teploty vzduchu v zimě (dole) pro 27 GCM.***

Projekt SustES - Czechglobe

Z 25 GCM, které prošly validací, byla vybrána reprezentativní sedmice, reprezentující ansámblový průměr a rozptyl (tyto charakteristiky byly spočítány právě z 25 modelů) s následujícími podmínkami. Sedmice modelů:

- nesmí obsahovat GCM, které nemají dostupná denní data,
- musí representovat mezi-modelovou variabilitu v rámci celé množiny 25 GCM,
- musí mít vysoké Q-skóre (byla použita modifikace původního Q-skore podle Dubrovský et al., 2015),
- ze sedmice lze použít i užší pětici, trojici a případně jen střední model,
- musí obsahovat aspoň jeden střední model,
- musí obsahovat aspoň dva modely řídící RCM v Euro-CORDEX simulacích,
- měla by obsahovat takové modely, jejichž projekce dle RCP8.5 scénáře splňují následující podmínky:

[A] (alespoň) pro jeden model platí: $\Delta T < \Delta Tlow$ and $\Delta P < \Delta Plow$

[B] (alespoň) pro jeden model platí: $\Delta T < \Delta Tlow$ and $\Delta P > \Delta Phigh$

[C] (alespoň) pro jeden model platí: $\Delta T > \Delta Thigh$ and $\Delta P < \Delta Plow$

[D] (alespoň) pro jeden model platí: $\Delta T > \Delta Thigh$ and $\Delta P > \Delta Phigh$

Poslední podmínku lze také vyjádřit slovy, že hledáme model „studenější a sušší“, dále model „studenější a vlhčí“, dále model „teplejší a sušší“ a nakonec model „teplejší a vlhčí“, přičemž tyto přívlastky vystihují velikost signálu klimatické změny teploty a srážek s ohledem na ansámblový průměr.

Tímto způsobem byla nalezena tato sedmice GCM:

- NorESM1-M +
- MPI-ESM-LR + HadGEM2-ES +
- GISS-E2-H + MRI-ESM1 +
- CanESM2 + GFDL-CM3.

První model (NorESM1-M) představuje střed ansámblu všech GCM. Modely MPI-ESM-LR + HadGEM2-ES vystupují jako řídící GCM pro několik Euro-CORDEX RCM simulací. To ostatně nakonec platí i pro vybraný střední model, který rovněž řídí jeden z Euro-CORDEX RCMs. Modely GISS-E2-H + MRI-ESM1 zajistí splnění podmínky na pokrytí mezimodelové variability a modely CanESM2 + GFDL-CM3 umožní splnit poslední uvedenou podmínku výběru.

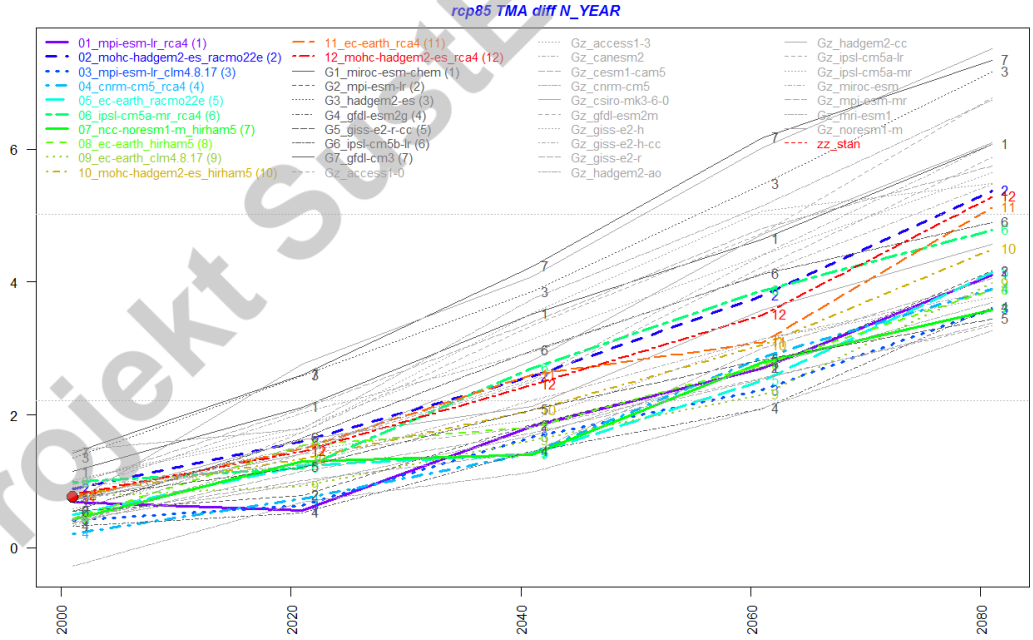
Projekt SustES - Czechglobe

5 Změna klimatu v ČR

5.1 Minimální očekávatelná změna na základě klimatické obálky

Na základě vybraných modelů (12 RCM a 7 GCM model) klimatické obálky („CliChE“ – climate change envelope, ve smyslu pravděpodobnosti, viz např. Mastrandrea et al., 2010) lze relativně spolehlivě (oproti původnímu souboru všech modelů, ve kterém jsou v modelech mnohdy přítomny značné chyby), tak lze stanovit minimální očekávatelnou změnu různých klimatických veličin. Protože GCM modely byly zpracovány pouze pro emisní scénář RCP8.5, je rovněž vyhodnocení těchto změn provedeno s ohledem na tento scénář.

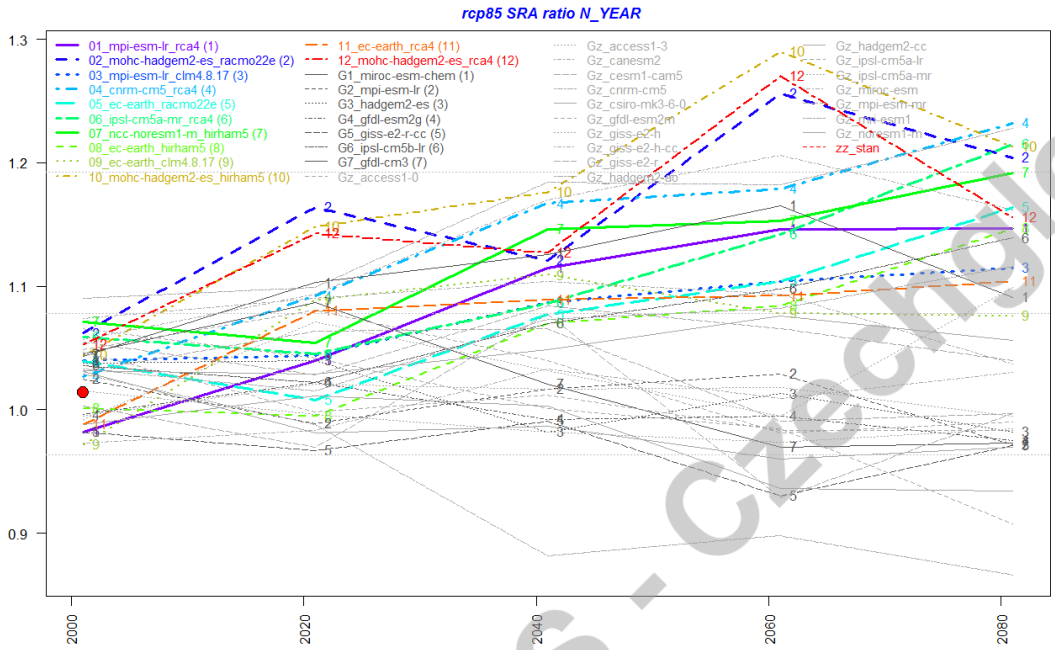
Pro teplotu vzduchu (obr. 4-4 v předešlé kapitole, na obr. 5-1 je pro ilustraci uvedena průměrná denní maximální teplota vzduchu, která vykazuje stejnou změnu, stejně jako průměrná minimální teplota; absolutní maxima a minima jsou potom uvedeny v následující kapitole) RCM modely dávají obecně nižší změnu než GCM modely, ale RCM se stále pohybují v rámci „spektra“ GCM. Měření na stanicích je v souladu jak s GCM, tak s RCM simulacemi. V rámci celé ČR můžeme na konci tohoto století podle všech modelů očekávat nárůst teploty vzduchu v rámci scénáře RCP8.5 minimálně o 3 °C oproti referenčnímu období 1981–2010 (v největším extrému až o 6 °C). V půlce století lze očekávat změnu minimálně téměř 2 °C, v příštím dvacetiletí (2021–2040) je to potom změna o 1 °C. Pokud bychom uvažovali ansámblový průměr, očekávaná změna je zhruba ještě o další 1 °C vyšší.



Obr. 5-1. ***<u>Rozdíl</u> budoucího (20letí od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro průměrnou denní maximální teplotu vzduchu (ve °C), pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.***

Projekt SustES - Czechglobe

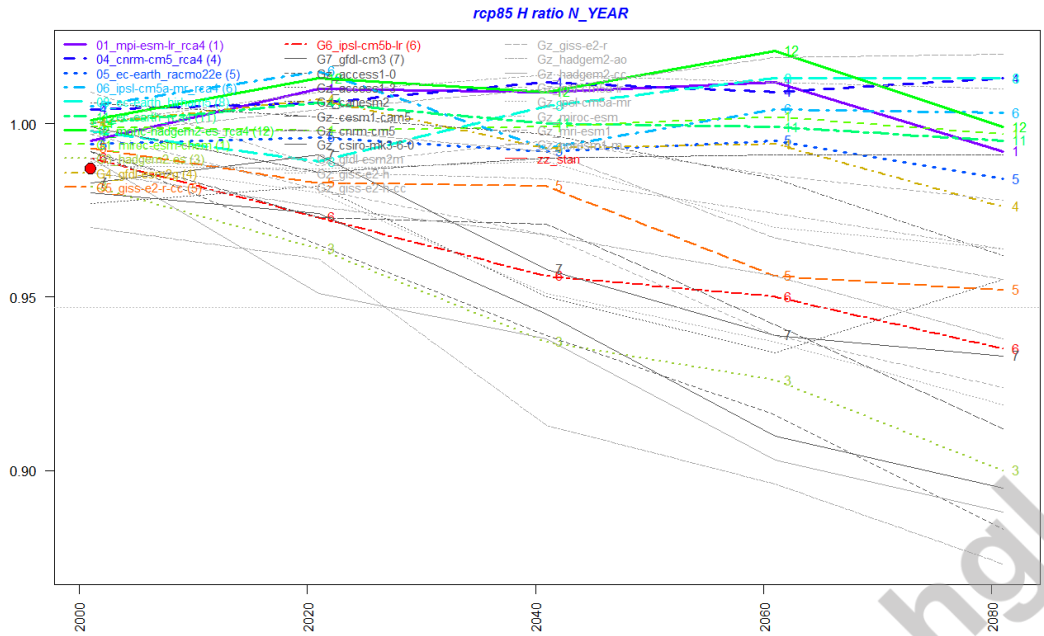
Pro srážkové úhrny GCM modely neudávají ve většině případů žádnou změnu, zatímco RCM zaznamenávají pozvolný růst srážek během tohoto století (nicméně změna RCM modelů se pohybuje stále v rámci hodnot plynoucích z GCM vstupů). Minimálně tedy lze očekávat nezměněné srážkové úhrny, případně jejich malý pokles – statisticky nevýznamný (což ale v kombinaci s vyšší teplotou vzduchu každopádně znamená mj. vyšší hodnoty evapotranspirace).



Obr. 5-2. ***Poměr budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro srážkové úhrny, pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.***

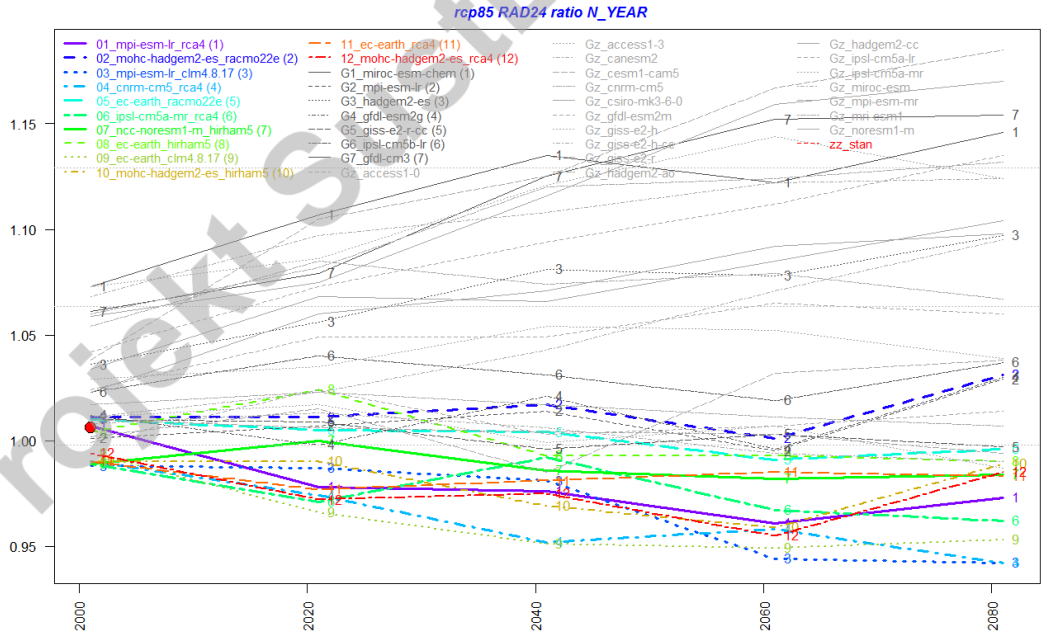
U vlhkosti vzduchu lze do budoucna očekávat její nižší hodnoty. Zatímco u RCM nedochází k žádné změně nebo mírnému poklesu (u RCM očekáváme vyšší srážky do budoucna, ale zároveň vyšší teplotu vzduchu), tak naopak podle většiny GCM modelů se celkové srážkové úhrny nezmění, což spolu s vyšší teplotou znamená i nižší relativní vlhkost vzduchu (na hodnoty 95 až 90 %).

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-3. ***<u>Poměr</u> budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro relativní vlhkost vzduchu, pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.***

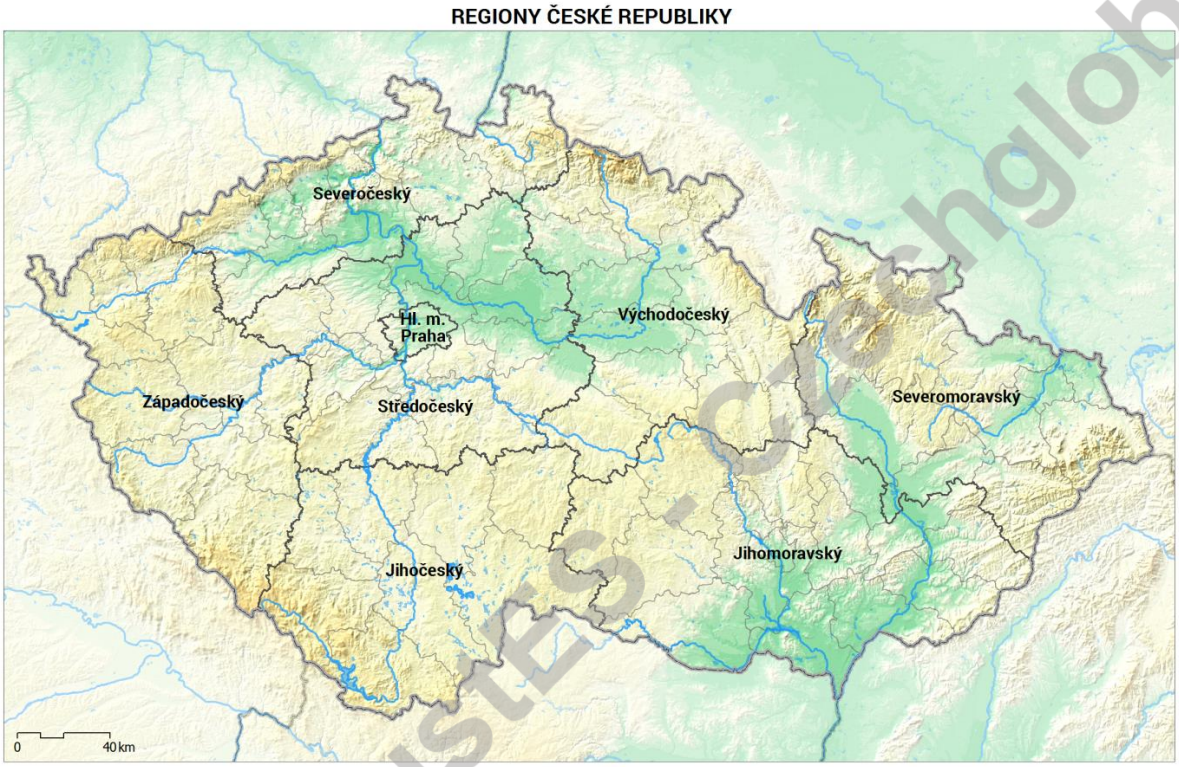
Pro sluneční radiaci se jednotlivé modely různí, GCM udávají ve většině případu spíše její nárůst, zatímco RCM modely spíše stagnaci nebo mírné snižování (statisticky nevýznamné). Staniční měření (pro začátek tohoto století) jsou spíše v souladu s těmito RCM simulacemi. Tzn. u sluneční radiace podle RCM neočekáváme žádnou významnou změnu do budoucna.



Obr. 5-4. ***<u>Poměr</u> budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro sluneční radiaci, pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.***

Projekt SustES - Czechglobe

Jelikož pro impaktové studie je potřebná podrobná prostorová informace, jsou v dalších kapitolách pro vyhodnocení použity pouze RCM modely, které jsou dostupné v denním časovém kroku pro dva scénáře RCP4.5 a RCP8.5. Jsou použity RCM modely, jejichž hodnoty byly korigovány za účelem odstranění biasu klimatických modelů. Časový vývoj je prezentován pro celou ČR, pro roční hodnoty a jednotlivé klimatologické sezóny (zima – prosinec až únor, jaro – březen až květen, léto – červen až srpen, podzim – září až listopad). Protože však v rámci České republiky dochází k prostorové diferenciaci, pro 20letí jsou prezentovány i významné prostorové rozdíly mezi jednotlivými regiony (viz obr. 5-5). Prezentované regiony odpovídají zhruba bývalému krajskému členění (které na rozdíl od nového členění bylo rovněž v souladu s členěním přírodním, např. podle povodí).

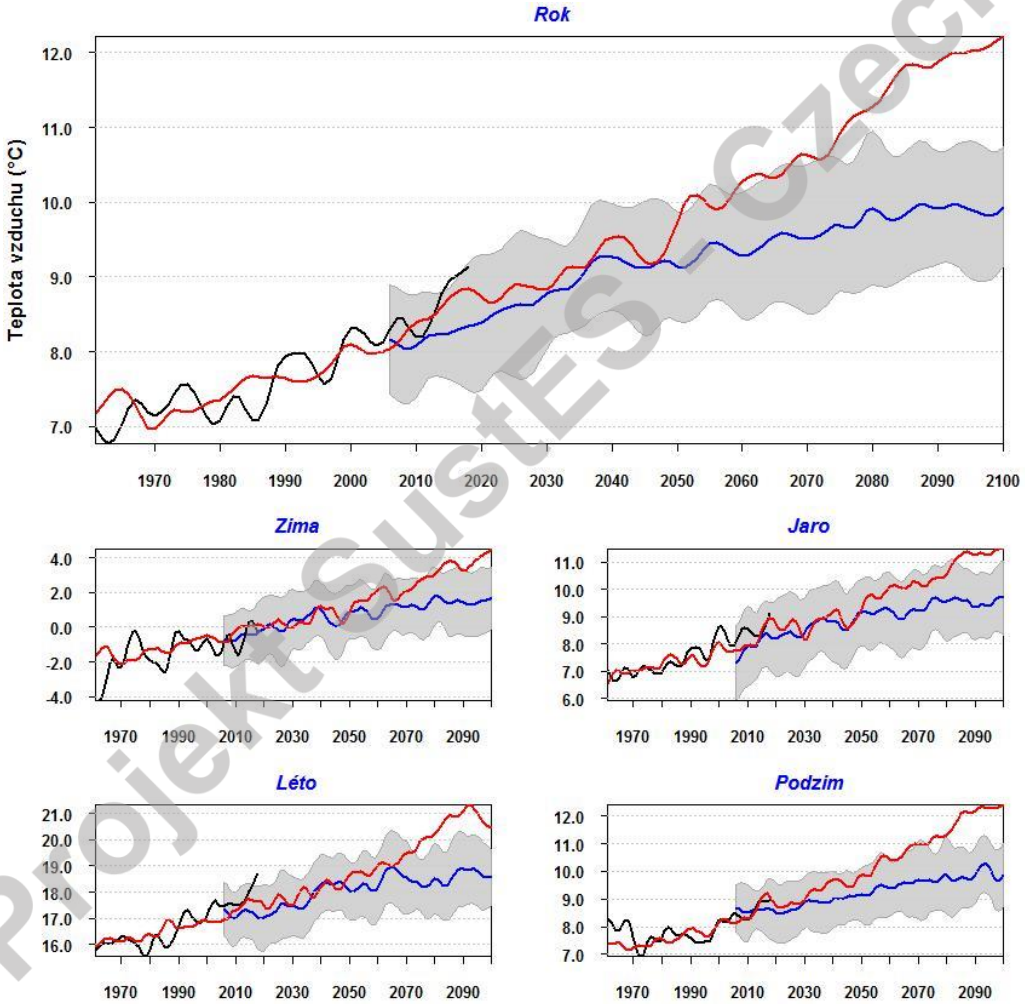


Obr. 5-5. ***Členění na regiony použité v této studii pro vyhodnocení prostorových rozdílů v rámci České republiky.***

Projekt SustES - CzechGlobe

5.2 Teplota vzduchu

Teplota vzduchu se bude do budoucna měnit podle ansámblového průměru z vybraných 12 RCM simulací podle RCP4.5 tak, že na konci tohoto století lze očekávat nárůst teploty oproti současnému klimatu o 2 °C, podle RCP8.5 dokonce o 4 °C, v půlce tohoto století potom zhruba o 1,5 °C, resp. o 2 °C. Euro-CORDEX simulace jsou k disposici od roku 2006 (do roku 2005 jde o tzv. kontrolní běh), staniční měření (tedy realita) jsou naopak k disposici až do roku 2018, v období 2006–2018 tedy dochází k překryvu skutečných a simulovaných údajů. V případě teploty vzduchu je patrný vyšší růst v reálném světě, než vychází podle modelových simulací (obr. 5-6). Obdobná tendence spíše k „horším“ hodnotám reality oproti modelům je patrná i u dalších klimatických charakteristik, jak bude ukázáno později.



Obr. 5-6. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro teplotu vzduchu, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.***

Projekt SustES - Czechglobe

U teploty vzduchu jsou patrné rostoucí trendy pro blízkou (1981–2040) i vzdálenou (1981–2100) budoucnost, a to pro RCP2.6, RCP4.5 i RCP8.5. V rámci středně vzdálené i vzdálené budoucnosti (2021–2060, resp. 2061–2100) teplota vzduchu roste významně pouze u RCP8.5, u RCP2.6 jsou trendy již statisticky nevýznamné. V případě RCP4.5 jsou pro středně vzdálenou budoucnost významné ve všech sezonách a roce kromě zimy, u vzdálené budoucnost pouze u roku a jara. V rámci celého období 1981–2100 jsou trendy v případě teploty vzduchu pouze rostoucí (pro rok a všechny sezony) a ve všech případech statisticky významné (na hladině významnosti p=0,05).

Tab. 5-1. ***Teplota vzduchu pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje skutečnost – měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny rozdíly oproti současnosti (1981–2010).***

Začátek	**Konec**	**Scénář**	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim
1981	2010	stan	**7.9**	-1.2	7.9	16.9	7.9	*Rozdíl:*				
2001	2020	stan	**8.5**	-0.8	8.4	17.8	8.5	**0.6**	0.4	0.5	0.8	0.6
2001	2020	RCP26	**8.3**	-0.5	7.9	17.2	8.6	**0.4**	0.7	0.0	0.2	0.7
2001	2020	RCP45	**8.2**	-0.6	7.9	17.1	8.5	**0.3**	0.7	0.0	0.1	0.6
2001	2020	RCP85	**8.4**	-0.3	8.1	17.3	8.5	**0.5**	0.9	0.2	0.4	0.6
2021	2040	RCP26	**9.0**	-0.1	8.6	18.1	9.5	**1.2**	1.2	0.7	1.2	1.6
2021	2040	RCP45	**8.8**	0.4	8.6	17.5	8.7	**1.0**	1.7	0.7	0.6	0.8
2021	2040	RCP85	**9.0**	0.4	8.6	17.7	9.1	**1.1**	1.6	0.7	0.8	1.2
2041	2060	RCP26	**9.2**	0.3	9.0	18.0	9.4	**1.3**	1.5	1.2	1.0	1.5
2041	2060	RCP45	**9.3**	0.6	9.0	18.2	9.2	**1.4**	1.8	1.1	1.3	1.3
2041	2060	RCP85	**9.7**	1.2	9.4	18.6	9.9	**1.9**	2.4	1.5	1.6	2.0
2061	2080	RCP26	**9.2**	0.3	9.1	18.0	9.6	**1.4**	1.6	1.2	1.0	1.7
2061	2080	RCP45	**9.6**	1.2	9.3	18.6	9.6	**1.7**	2.5	1.4	1.6	1.7
2061	2080	RCP85	**10.7**	2.3	10.2	19.5	10.9	**2.8**	3.5	2.3	2.6	3.0
2081	2100	RCP26	**9.1**	0.3	8.8	18.2	9.2	**1.3**	1.5	0.9	1.2	1.3
2081	2100	RCP45	**9.9**	1.5	9.6	18.6	9.8	**2.0**	2.7	1.7	1.7	1.9
2081	2100	RCP85	**11.9**	3.8	11.3	20.9	12.1	**4.0**	5.0	3.4	3.9	4.2

V případě extrémních teplot vzduchu dojde rovněž k jejich nárůstu, a to především u minimálních teplot vzduchu. Současné období (2001–2020) vykazuje u absolutních teplotních minim i maxim zhruba o 1 °C vyšší hodnoty oproti referenčnímu období (1981–2010; hodnota pro celou ČR je -18 °C u teplotních minim pro celý rok, u teplotních maxim je to 32 °C), přičemž maximální teploty jsou ve skutečnosti v současném období vyšší oproti modelům, kdežto u minimálních teplot je tomu naopak (modely udávají vyšší hodnoty). Do budoucna lze očekávat zvyšování hodnot především u teplotních minim, kdy pro konec století je rozdíl oproti referenčnímu období o 10 °C (RCP8.5) nebo o 6 °C (RCP4.5), v půlce tohoto století je to 6,1 °C, resp. 4,5 °C (růst především zimě a dále na jaře). U absolutních

Projekt SustES - Czechglobe

maxim se očekává nárůst teploty vzduchu na konci století o 4 °C (RCP8.5) nebo o 2 °C (RCP4.5), v půlce století potom 1,5 °C, resp. 1 °C (růst především zimě a dále v létě).

Teplotní minima rostou téměř dvakrát rychleji v porovnání s teplotními maximy (v ročních hodnotách za období 1981–2100 je to 0,25 °C / 10 let pro RCP4.5 a 0,47 °C / 10 let pro RCP8.5 pro teplotní maxima, zatímco u teplotních minim je to dokonce 0,46 °C /10 let pro RCP4.5 a 0,91 °C / 10 let pro RCP8.5). U teplotních maxim dochází k nárůstu především v zimě a v létě, zatímco u teplotních minim je to především v zimě a na jaře (viz tab. 5-2).

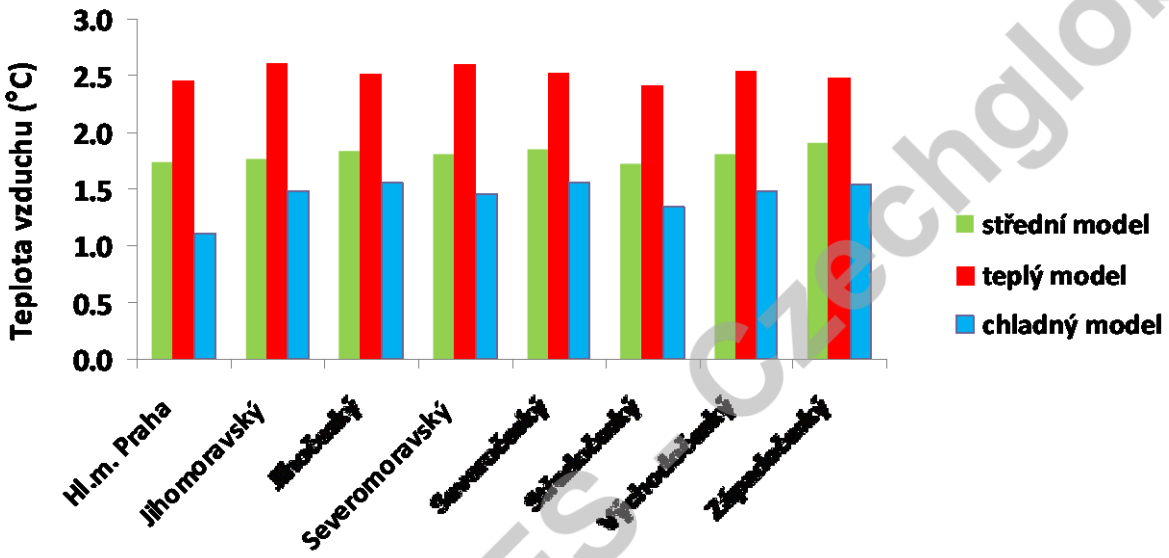
Tab. 5-2. ***Trendy v absolutních teplotních maximech a minimech pro různá období a různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Uvedeny jsou pouze lineární trendy statisticky významné na hladině významnosti p=0,05.***

				Absolutní teplotní maxima					Absolutní teplotní minima				
Začátek	**Konec**	**Délka**	**Scénář**	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim
1981	2020	40	0_stan	**0.062**		0.069	0.062						
1981	2020	40	RCP26			0.048			**0.112**	0.090		0.033	
1981	2020	40	RCP45	**0.027**	0.042	0.028		0.041	**0.072**	0.081		0.026	
1981	2020	40	RCP85	**0.050**	0.061	0.034	0.050	0.039	**0.061**	0.054	0.067	0.037	0.041
1981	2040	60	RCP26	**0.038**	0.031	0.040	0.039	0.041	**0.052**	0.045		0.029	0.044
1981	2040	60	RCP45	**0.030**	0.049	0.031	0.029	0.032	**0.067**	0.072	0.045	0.030	0.036
1981	2040	60	RCP85	**0.036**	0.045	0.030	0.035	0.024	**0.068**	0.067	0.053	0.030	0.044
1981	2100	120	RCP26	**0.010**	0.020	0.012	0.010	0.011	**0.027**	0.020	0.032	0.012	0.019
1981	2100	120	RCP45	**0.025**	0.039	0.021	0.025	0.026	**0.046**	0.047	0.041	0.022	0.027
1981	2100	120	RCP85	**0.047**	0.054	0.037	0.046	0.047	**0.091**	0.088	0.053	0.036	0.042
2021	2060	40	RCP26										
2021	2060	40	RCP45	**0.039**	0.053		0.039	0.043	**0.055**	0.057	0.054	0.023	
2021	2060	40	RCP85	**0.033**	0.049		0.034	0.057	**0.117**	0.101	0.055	0.040	0.037
2061	2100	40	RCP26										
2061	2100	40	RCP45		0.034	0.027		0.044					
2061	2100	40	RCP85	**0.081**	0.085	0.060	0.075	0.080	**0.121**	0.115	0.052	0.039	0.052

Prostorového rozložení teplot vzduchu v současném a budoucím klimatu pro tři RCM (chladný, střední a teplý) ukazuje obr. 5-8. Podle prostorového rozložení změn teploty vzduchu v budoucím klimatu na základě středního modelu (MPI-ESM-LR_RCA4) se předpokládají největší změny především v horských oblastech, naopak v nižších polohách očekáváme změny menší (obr. 5-9). Z regionů České republiky za celé období až do roku 2100 naroste teplota vzduchu nejvíce v západních, severních a jižních Čechách. Naopak na Moravě a ve středních Čechách bude změna nepatrně nižší. Teplejší model (MOHC-HADGEM2-ES_RACMO22E) má prostorovou změnu rovnoměrněji rozdělenou a není zde patrná výšková diferenciace. Podle tohoto modelu jsou moravské regiony nepatrně teplejší

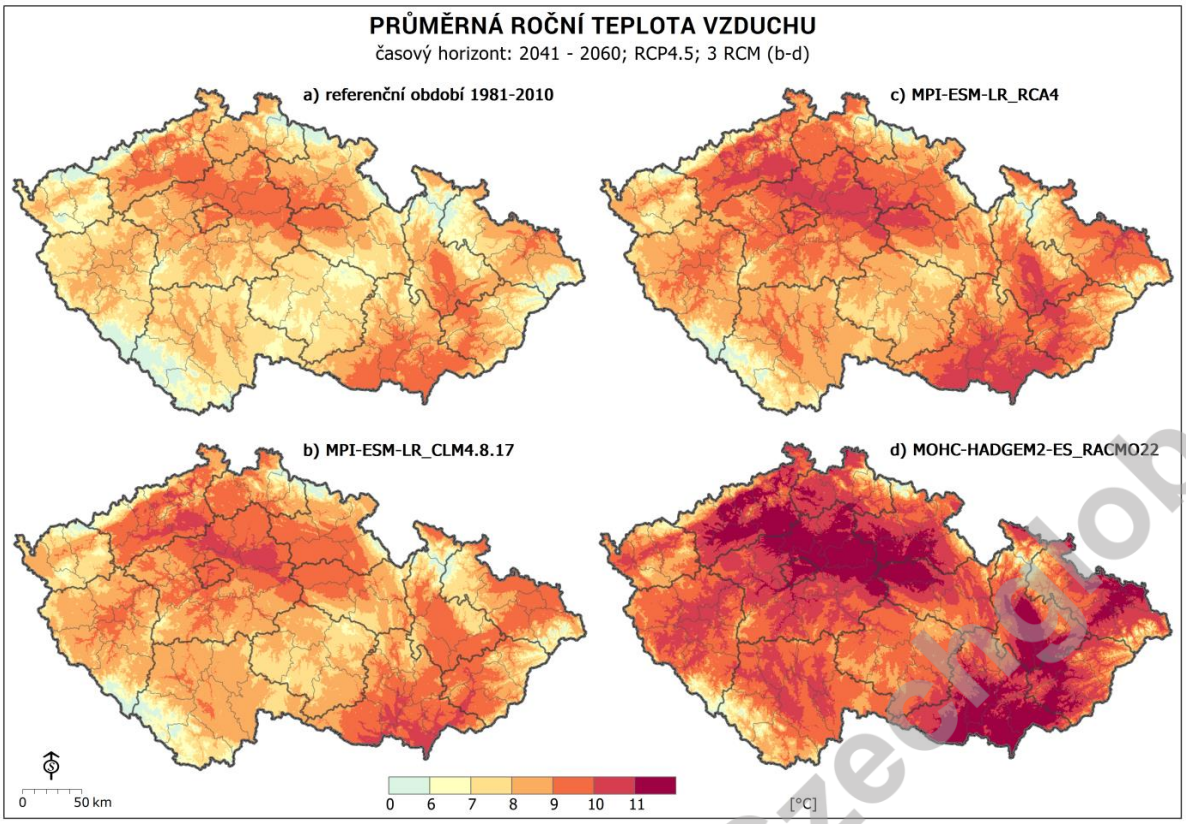
Projekt SustES - Czechglobe

než české, ale rozdíl je nevýznamný. U chladného modelu (MPI-ESM-LR_CLM4.8.17) opět sledujeme výškovou rozdílnost změny teploty vzduchu. V horských oblastech je podle modelů očekávaný vyšší nárůst teplot vzduchu. Stejně jako u středního odhadu predikuje i „chladný“ model nejvyšší nárůst teploty vzduchu v západních, jižních a severních Čechách. K nejmenší změně má dojí v oblasti středních Čech (obr. 5-7). Celkové rozpětí očekávané změny teploty vzduchu v blízké budoucnosti (2021-2060) pro jednotlivé regiony (vymezené na obr. 5-5) napříč RCP4.5 a RCP8.5 a různými modely ukazuje obr. 5-10.

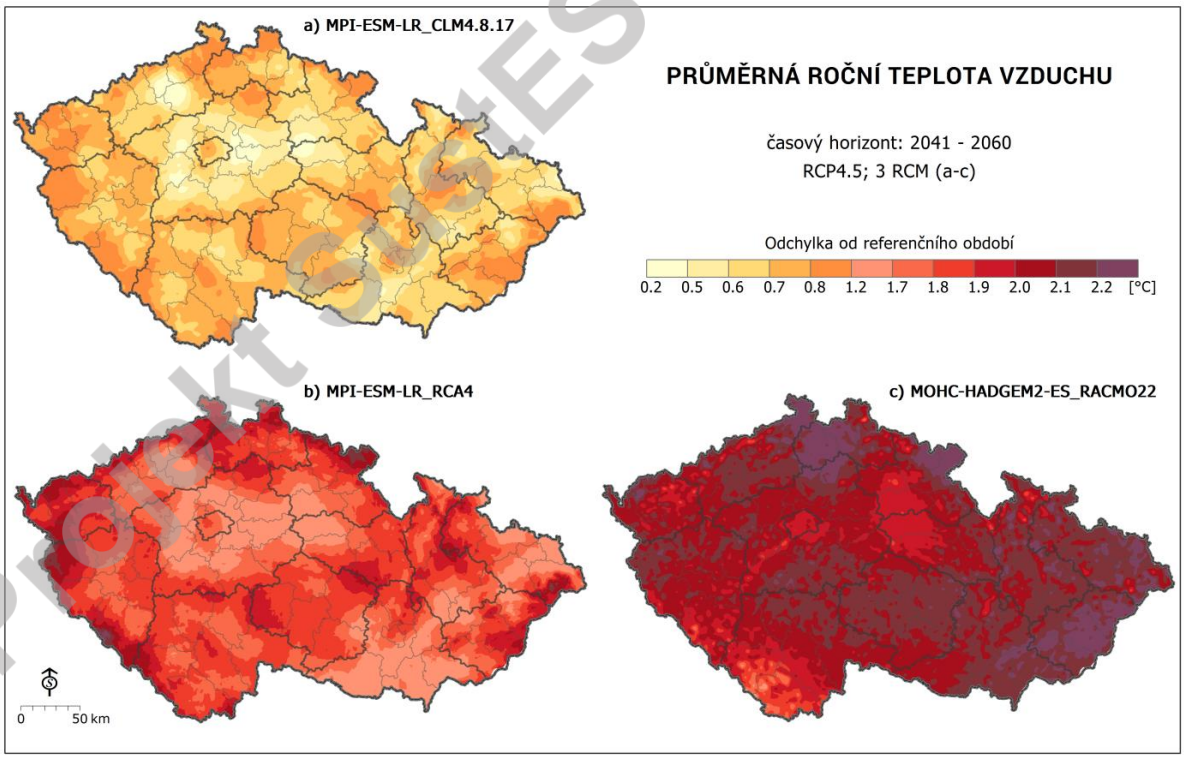


Obr. 5-7. ***Odhadovaná změna teploty vzduchu podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

Projekt SustES - Czechglobe

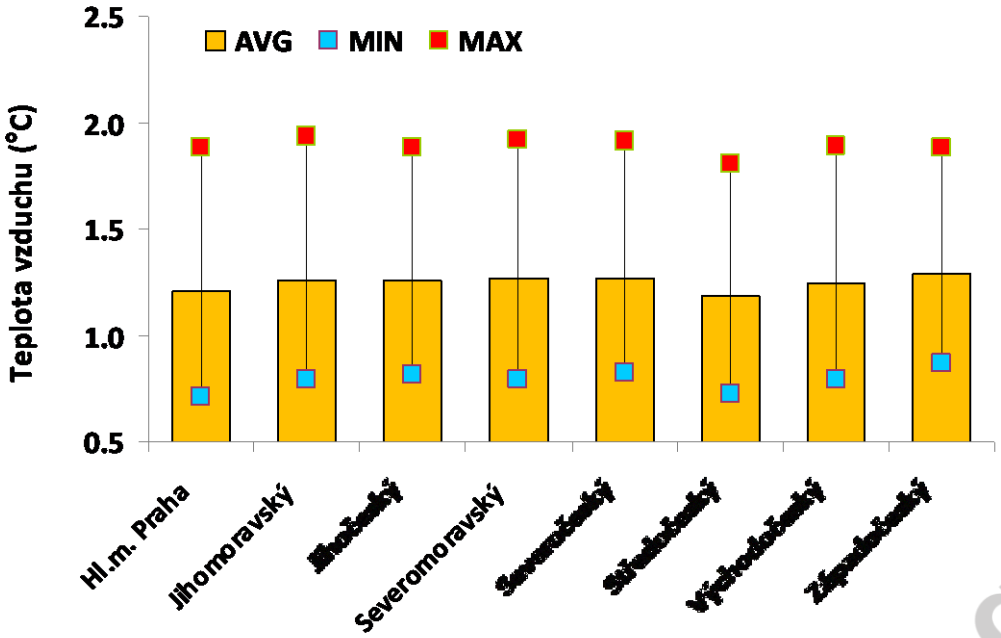


Obr. 5-8. ***Teplota vzduchu pro referenčnímu období 1981–2010 a podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.***



Obr. 5-9. ***Rozdíl predikované teploty vzduchu podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.***

Projekt SustES - Czechglobe

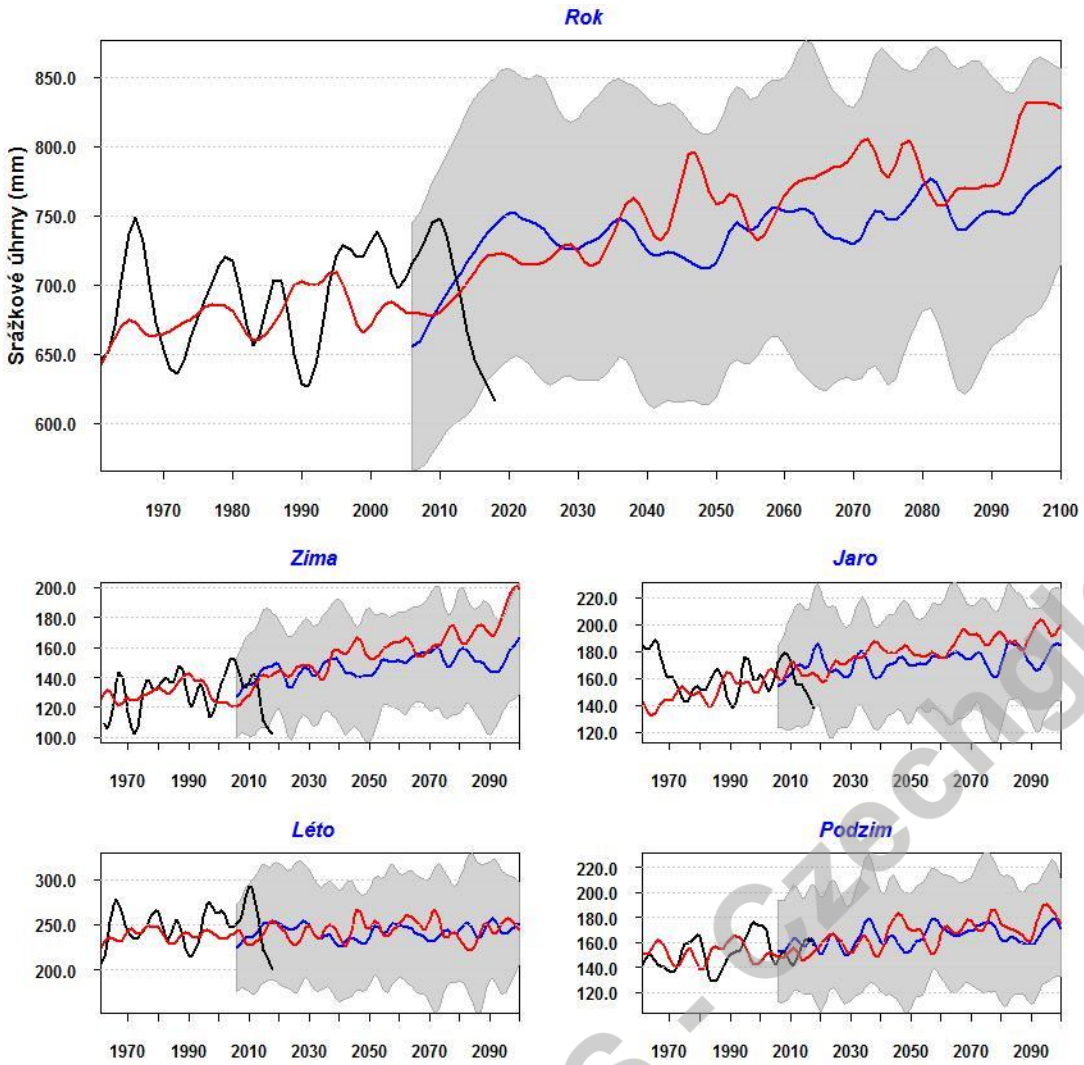


Obr. 5-10. ***Průměrná změna teploty vzduchu podle 3 modelů (střední, teplý a studený) pro období 2021–2060 (délka 40 let) podle dvou emisních scénářů RCP4.5 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

5.3 Srážkové úhrny

Srážkové úhrny podle ensemblového průměru z vybraných 12 RCM simulací budou růst až do konce století. Zde je potřeba podotknout, že v GCM výstupech panuje ohledně změn srážkových úhrnů značná nejistota, RCM modely se shodují s některými GCM výstupy, ale pak je skupina GCM, které nedávají žádnou změnu ve srážkách. Podle RCM srážky porostou do konce století průměrně o 10 % pro RCP4.5 a dokonce o 13 % podle RCP8.5 v porovnání s referenčním obdobím 1981–2010 (v absolutních číslech to znamená nárůst ročního průměru o 90 mm pro RCP8.5 a 60 mm pro RCP4.5 na konci tohoto století, přičemž republikový průměr v referenčním období je 703 mm, viz tab. 5-3). Zatímco zimní, jarní a podzimní srážky porostou, tak letní srážky budou ubývat, což bude mít v kombinaci s vyššími teplotami vzduchu nepříznivý dopad mj. na výskyt sucha. Tak jako u teploty vzduchu jsme ve skutečnosti (srovnání staničních měření a modelových výstupů) zaznamenávali vyšší teploty vzduchu v současném období (2001–2020), tak v případě srážkových úhrnů je tomu naopak, v posledních letech naopak měříme méně srážek oproti modelovým simulacím (obr. 5-11).

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-11. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro srážkové úhrny, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.***

Projekt SusES - Czechglobe

Tab. 5-3. ***Srážkové úhrny pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny podíly a dále rozdíly oproti současnosti (1981–2010).***

Začátek	**Konec**	**Scénář**	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim
1981	2010	stan	**703**	135	162	251	154	***Podíl:***					***Rozdíl:***				
2001	2020	stan	**702**	132	159	253	156	**1.00**	0.98	0.98	1.01	1.01	**-1**	-3	-3	2	2
2001	2020	RCP26	**727**	147	172	250	156	**1.03**	1.09	1.06	1.00	1.01	**24**	12	10	-1	2
2001	2020	RCP45	**701**	135	169	241	156	**1.00**	1.00	1.04	0.96	1.02	**-2**	0	7	-10	3
2001	2020	RCP85	**698**	131	165	240	151	**0.99**	0.97	1.02	0.96	0.98	**-4**	-4	3	-11	-3
2021	2040	RCP26	**707**	158	174	217	159	**1.01**	1.17	1.07	0.87	1.03	**5**	23	12	-33	5
2021	2040	RCP45	**738**	145	167	242	163	**1.05**	1.07	1.03	0.96	1.06	**36**	10	5	-9	9
2021	2040	RCP85	**729**	147	174	241	158	**1.04**	1.09	1.07	0.96	1.03	**26**	12	12	-10	4
2041	2060	RCP26	**733**	139	182	253	158	**1.04**	1.03	1.12	1.01	1.03	**30**	4	20	2	4
2041	2060	RCP45	**730**	145	172	239	163	**1.04**	1.08	1.06	0.95	1.06	**27**	10	10	-12	10
2041	2060	RCP85	**754**	159	178	245	168	**1.07**	1.18	1.10	0.98	1.09	**51**	24	16	-6	14
2061	2080	RCP26	**712**	148	178	243	143	**1.01**	1.10	1.10	0.97	0.93	**10**	13	15	-7	-10
2061	2080	RCP45	**746**	154	173	240	170	**1.06**	1.14	1.07	0.96	1.11	**43**	19	11	-11	16
2061	2080	RCP85	**789**	164	190	251	174	**1.12**	1.21	1.17	1.00	1.13	**86**	29	28	0	21
2081	2100	RCP26	**716**	149	162	236	168	**1.02**	1.10	1.00	0.94	1.10	**13**	14	0	-15	15
2081	2100	RCP45	**762**	153	180	247	166	**1.09**	1.13	1.11	0.99	1.08	**60**	18	18	-4	12
2081	2100	RCP85	**792**	178	192	241	175	**1.13**	1.32	1.19	0.96	1.14	**89**	43	30	-10	21

Srážkové úhrny rostou od současnosti do blízké budoucnosti (1981–2040). Pokud uvažujeme samostatně pouze blízkou a vzdálenou (2061–2100) budoucnost, trendy již nejsou statisticky významné (na hladině významnosti p=0,05), viz tab. 5-4. Naproti tomu, pokud budeme analyzovat lineární trendy pro roční maxima denních srážkových úhrnů, je situace odlišná, neboť jak podle RCP4.5, tak i podle RCP8.5 maxima porostou (a jsou statisticky významná).

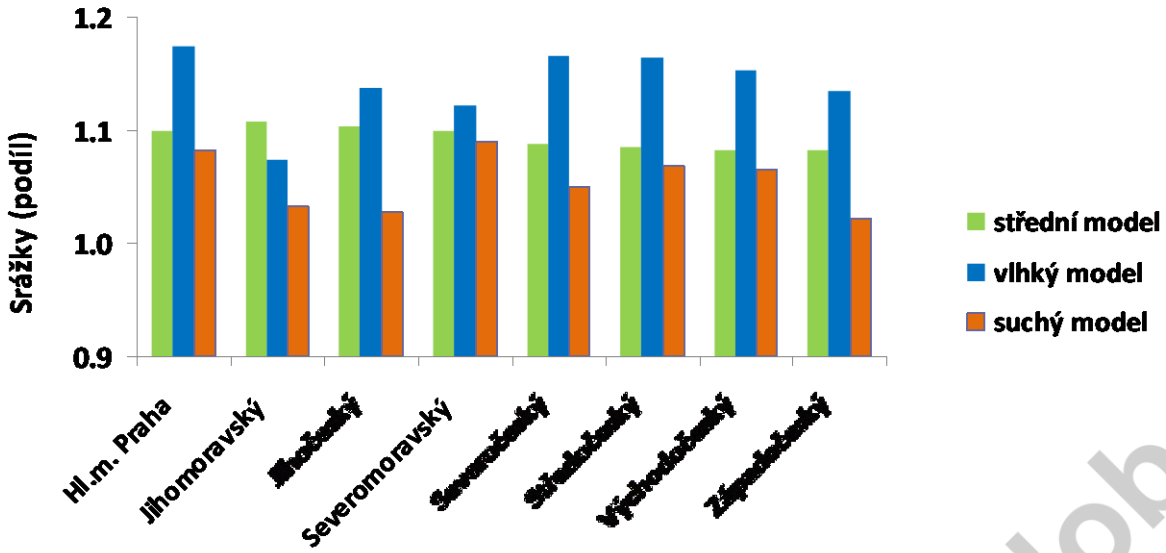
Projekt SustES - Czechglobe

Tab. 5-4. ***Trendy v ročních srážkových úhrnech a ročních maximech denních úhrnů pro různá období a různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Uvedeny jsou pouze lineární trendy statisticky významné na hladině významnosti p=0,05.***

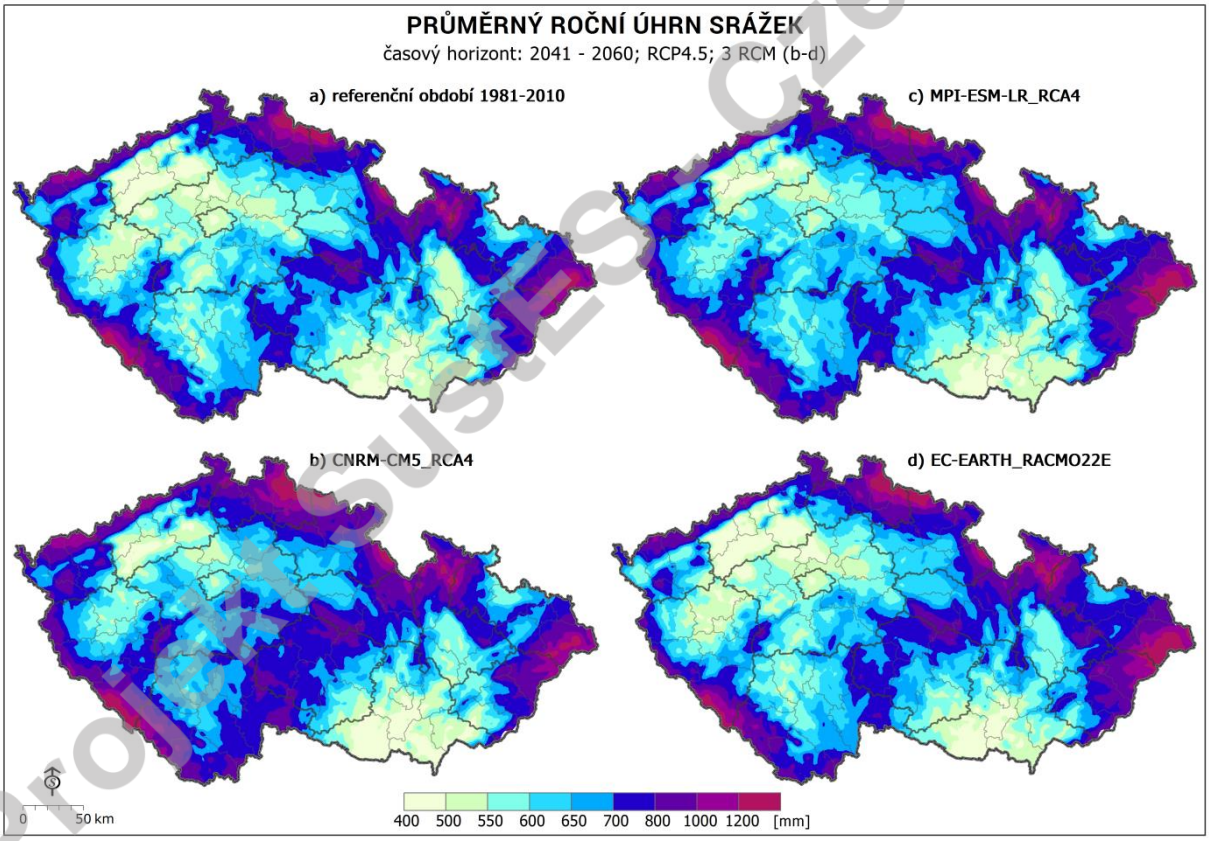
				Roční srážkové úhrny					Roční maxima denních úhrnů				
Začátek	**Konec**	**Délka**	**Scénář**	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim	**Rok**	Zima	Jaro	Léto	Podzim
1981	2020	40	0_stan										
1981	2020	40	RCP26	**2.722**	0.772	1.013					0.149		
1981	2020	40	RCP45	**1.335**		0.885					0.100		
1981	2020	40	RCP85	**1.161**		0.596			**0.078**		0.102	0.080	
1981	2040	60	RCP26	**1.083**	0.620	0.701					0.090		
1981	2040	60	RCP45	**1.420**	0.341	0.412			**0.071**	0.032	0.056	0.045	0.059
1981	2040	60	RCP85	**1.346**	0.349	0.581			**0.086**	0.024	0.079	0.059	0.046
1981	2100	120	RCP26								0.026		
1981	2100	120	RCP45	**0.763**	0.226	0.224		0.155	**0.057**	0.023	0.037	0.040	0.027
1981	2100	120	RCP85	**1.241**	0.476	0.407		0.259	**0.097**	0.049	0.069	0.058	0.051
2021	2060	40	RCP26				1.667				0.141		
2021	2060	40	RCP45								0.062		
2021	2060	40	RCP85		0.554				**0.096**	0.074			
2061	2100	40	RCP26										
2061	2100	40	RCP45						**0.135**				
2061	2100	40	RCP85		0.853				**0.125**	0.081			

Pro rozložení prostorových změn srážkových úhrnů platí, že podle středního modelu (MPI-ESM-LR_RCA4) by srážky na území republiky neměly klesnout, naopak by měly mírně vzrůst. K nejmenší změně má dojít na jižní Moravě a v severních Čechách. Naopak největší změny jsou indikované v západních a jižních Čechách, kde by průměrný nárůst srážek měl být o 6–10 %. U vlhkého modelu (CNRM-CM5_RCA4) je prostorová změna více variabilní. Rozdíly mezi regiony jsou zde velké. Model dokonce podle RCP4.5 předpokládá úbytek srážek na jižní Moravě (viz obr. 5-13 a 5-14). Pro období 2021–2040 predikuje tento model srážky o 7 % nižší v této oblasti. Naopak v jižních a východních Čechách mohou vzrůst srážkové úhrny až o 16 %. Podle modelu reprezentující sušší klima než střední model (EC-EARTH_RACMO22E), tak v prvním období 2021–2040 by skoro polovina republiky měla mít méně srážek než v současném klimatu. Nejvíce postižena by byla oblast jižní a střední Moravy a pak západ Čech. V dalších letech počítá i tento model s nárůstem srážek na většině území republiky. Největší by měl být na severní Moravě, a to až o 9 %.

Projekt SusIES - Czechglobe

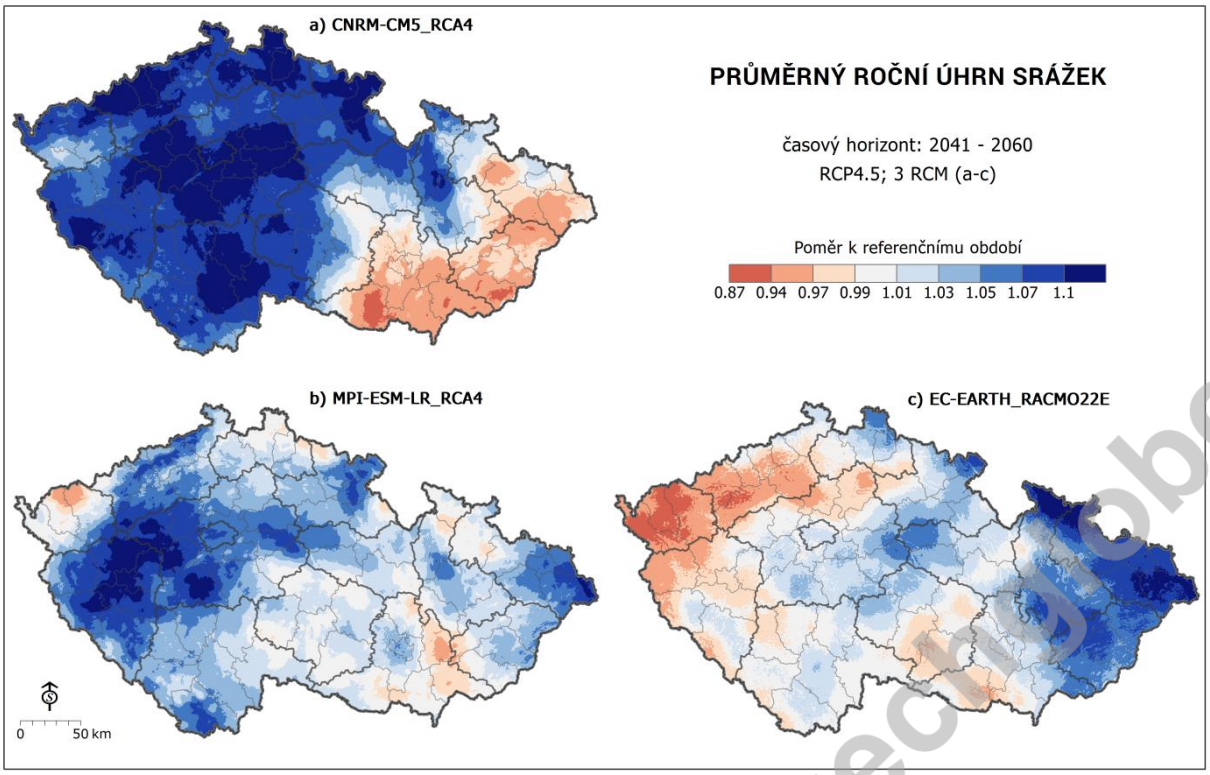


Obr. 5-12. ***Odhadovaná změna roční sumy srážek podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

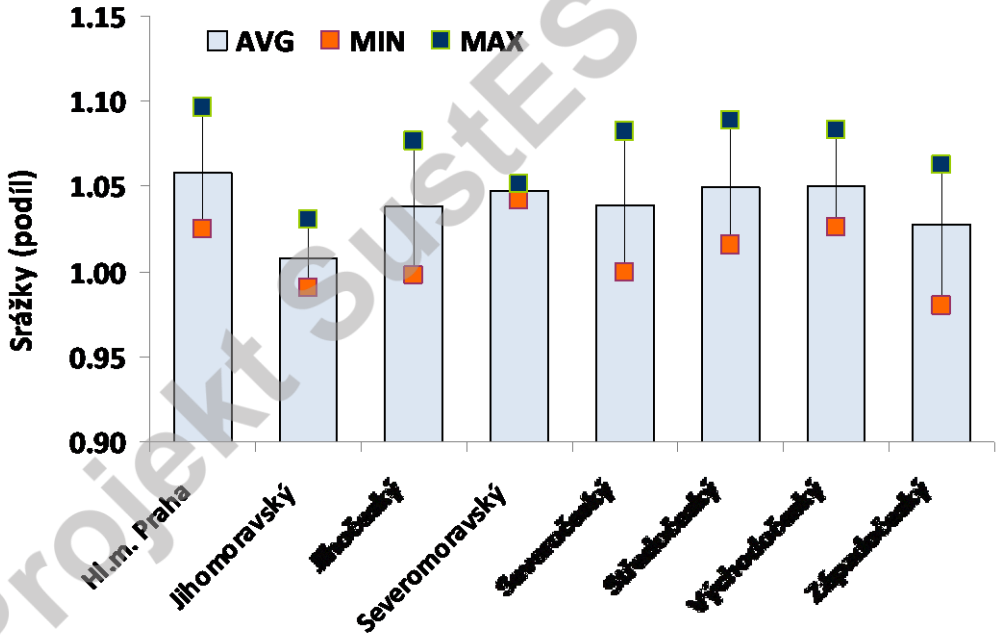


Obr. 5-13. ***Srážkové úhrny pro referenčnímu období 1981–2010 a podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.***

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-14. ***Rozdíl predikované roční sumy srážek podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.***



Obr. 5-15. ***Průměrná změna (podíl) srážkových úhrnů podle 3 modelů (střední, teplý a studený) pro období 2021–2060 (délka 40 let) podle dvou emisních scénářů RCP4.5 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

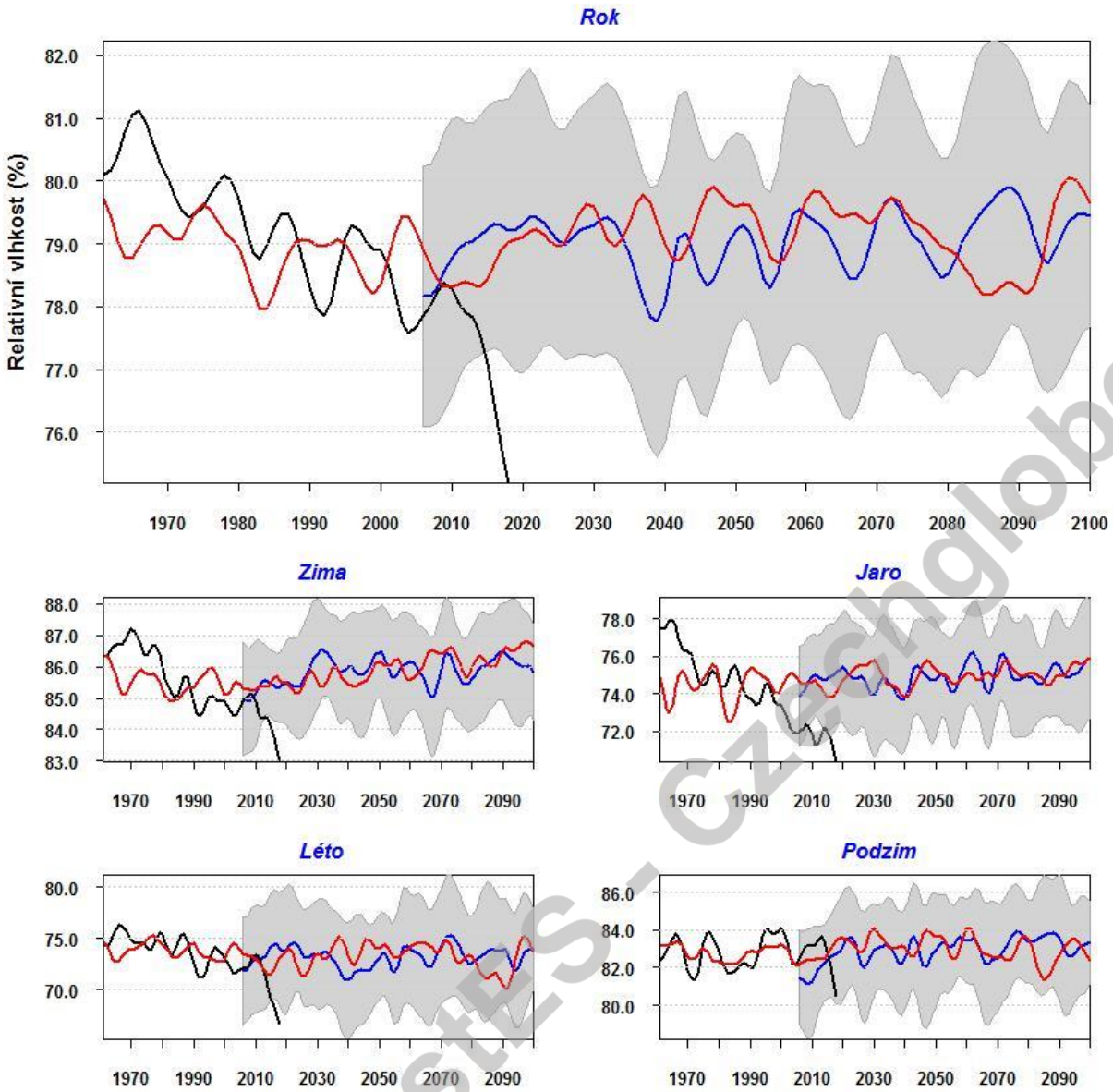
Projekt SustES - CzechGlobe

5.4 Vlhkost vzduchu

U relativní vlhkosti vzduchu zaznamenáváme v posledních měřených letech pokles hodnot oproti modelovým simulacím (obr. 5-16). Jelikož se oproti modelům měří méně srážek, a naopak se zaznamenaly vyšší teploty vzduchu, tak je tento závěr s výše uvedeným konzistentní.

V budoucím klimatu se podle RCM simulací relativní vlhkost nemění, neboť vyšší teploty jsou doprovázeny i vyššími srážkovými úhrny. Pokud jde o lineární trendy a uvažujeme celé období 1981–2100, tak v blízké budoucnosti lze očekávat pro zimu, jaro a podzim nepatrný nárůst hodnot (zhruba o procento), a tento nárůst je za celé toto období statisticky významný. V létě a na podzim naopak zaznamenáváme nepatrný (již statisticky nevýznamný) pokles hodnot relativní vlhkosti vzduchu.

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-16. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro relativní vlhkost vzduchu, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.***

5.5 Sluneční radiace

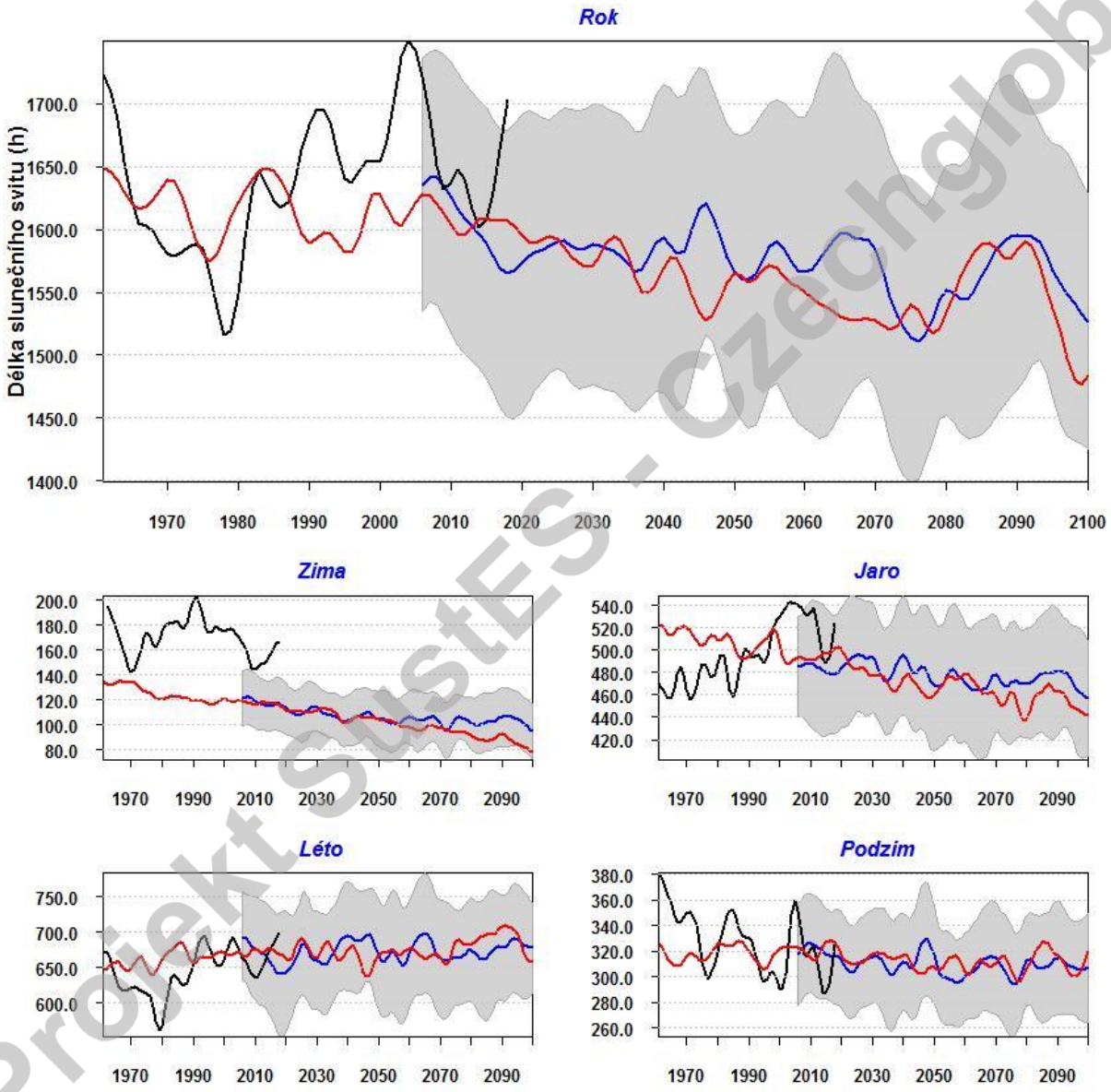
Sluneční radiace je vyhodnocená spolu s délkou slunečního svitu, neboť hodnoty si navzájem odpovídají.

V posledním období (2001–2020) zaznamenáváme vyšší měřené hodnoty sluneční radiace oproti těm simulovaným v regionálních modelech (především v zimě a dále na jaře, viz obr.

Projekt SustES - Czechglobe

5-17), což může být jeden z důvodů i zaznamenané vyšší teploty vzduchu oproti modelům. Naproti tomu globální modely dávají do budoucna ve většině případů stejné hodnoty nebo nárůst globální radiace (a slunečního svitu): v létě RCM modely simulují do budoucna stejné hodnoty, GCM potom stejné nebo rostoucí hodnoty, na jaře a v zimě RCM modely simulují pokles hodnot, GCM bud klesající nebo stejné hodnoty.

Pro zimu, jaro a podzim do budoucna zaznamenáváme statisticky významný pokles hodnot sluneční radiace, v létě podle RCM simulací zůstanou hodnoty konstantní.



Projekt SustES - Czechglobe

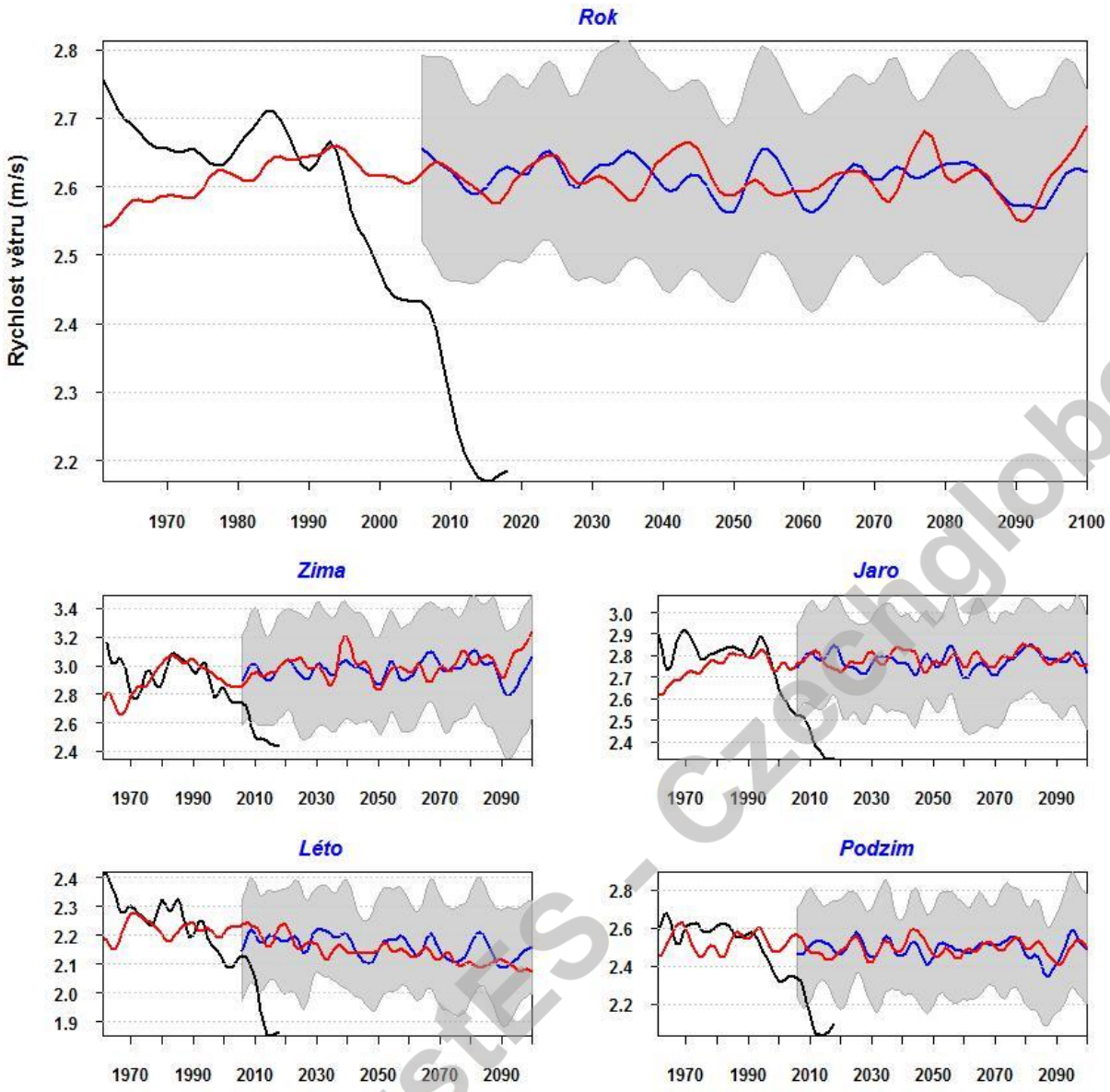
Obr. 5-17. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro délku slunečního svitu, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.***

5.6 Rychlost větru

V případě rychlosti větru zaznamenáváme velký rozdíl měřených údajů s těmi modelovanými (obr. 5-18). Zatímco modelové údaje nemají žádný trend, tedy drží stejnou úroveň, tak u měřených údajů zaznamenáváme dramatický pokles hodnot v posledních letech. Tento pokles měřené rychlosti větru je zaznamenán po celé Evropě (nazývá se wind stilling, viz např. McVicar et al. 2008, Zahradníček et al., 2019). O přesných důvodech se mezi experty spekuluje. V našem případě k tomu jistě přispěly dvě vlny automatizace: miskový anemometr (WAA) a dále ultrasonický anemometr (WMT a WS) oproti původnímu subjektivnímu odhadování rychlosti větru podle Beaufortovy stupnice. Vliv může mít mj. vyšší drsnost terénu (vlivem zalesňování v okolí stanic). V tomto případě mohou mít modely výhodu oproti staničním měřením, neboť jsou z pohledu tvorby řad časově homogenní (např. vliv změny přístrojů měření).

V případě rychlosti větru nezaznamenáváme žádné statisticky významné lineární trendy (pokud jde o modelové simulace) kromě léta, kde se očekává do budoucna snížení rychlostí větru. V zimě, na jaře a na podzim hodnoty nepatrně porostou.

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-18. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro rychlost větru, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.***

Projekt SustES - Czechglobe

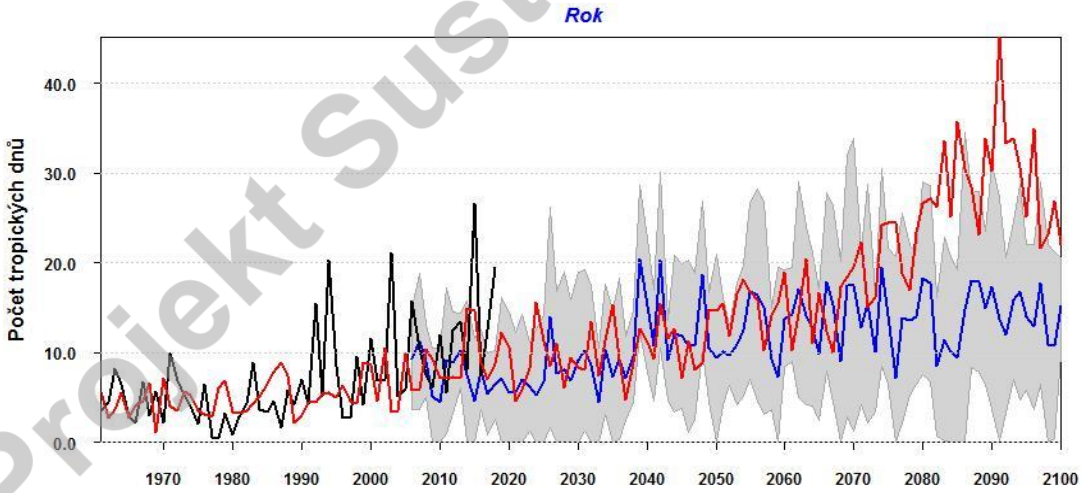
5.7 Vybrané klimatologické charakteristiky

5.7.1 Vysoké teploty vzduchu

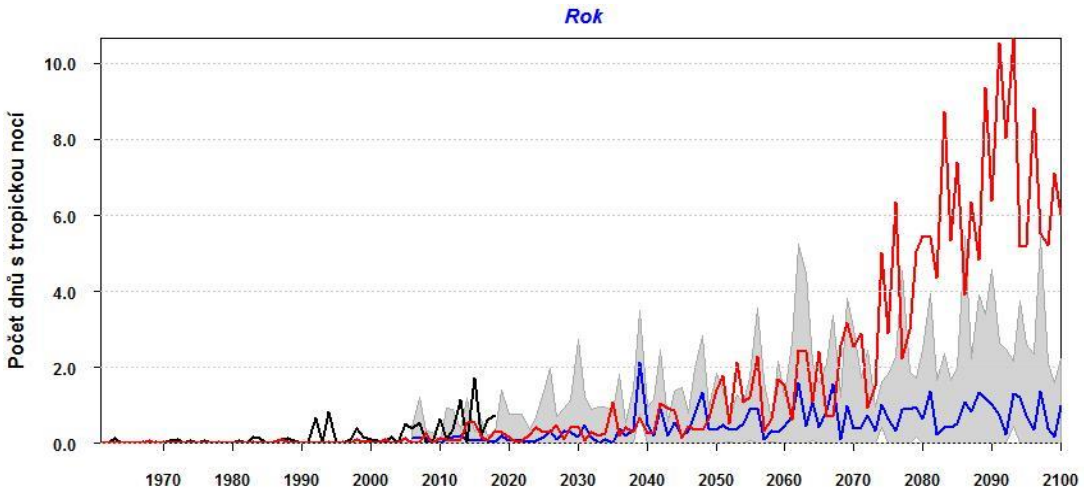
V této kapitole jsou hodnoceny počty tropický dnů (maximální teplota vzduchu dosáhne 30 °C a více) a počty dnů s tropickou nocí (minimální teplota vzduchu byla alespoň 20 °C).

Počet tropických dnů do budoucna podle ensemblového průměru z vybraných 12 RCM simulací poroste. V případě RCP4.5 očekáváme dvojnásobný počet tropický dní na konci tohoto století (v porovnání s referenčním obdobím 1981–2010 s průměrným počtem 8 dní za rok). Pro scénář RCP8.5 je výhled, že počet tropických dnů na konci století dosáhne téměř 30 dní (průměr za dvacetiletí), viz tab. 5-5. Především v posledních letech sledujeme vyšší počet tropických dní oproti modelovým simulacím, kdy hodnoty v některých letech (průměr za celou ČR) již přesahují 20 dní (roky 1994 a 2003), a v roce 2015 bylo zaznamenáno téměř 27 dní (obr. 5-19 nahoře).

Počet dnů s tropickou nocí naroste z dnešního výjimečného výskytu až na několik událostí za rok (podle RCP8.5), viz obr. 5-19 dole. Jak u počtu tropických dnů, tak u dnů s tropickou nocí zaznamenáváme statisticky významný rostoucí trend (p=0,05).



Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-19. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro počet tropických dnů (nahoře) a počet dnů s tropickou nocí (dole). Neshlazeno.***

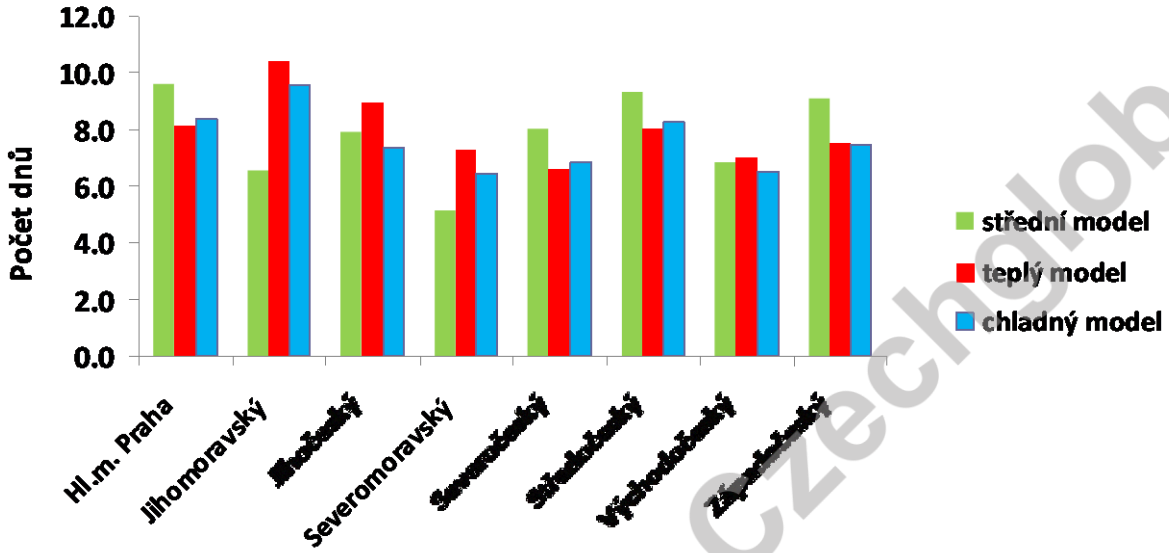
Tab. 5-5. ***Počet tropických dnů (nalevo) a počet dnů s tropickou nocí (napravo) pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Jsou také uvedeny podíly a rozdíly oproti současnosti (1981–2010).***

			Počet tropických dnů			Počet dnů s tropickou nocí		
Začátek	**Konec**	**Scénář**	**Rok**	**Rok**	**Rok**	**Rok**	**Rok**	**Rok**
1981	2010	stan	7.6	***Podíl:***	***Rozdíl:***	0.2	***Podíl:***	***Rozdíl:***
2021	2040	RCP26	11.9	1.56	4.3	0.6	3.23	0.4
2021	2040	RCP45	9.0	1.17	1.3	0.3	1.58	0.1
2021	2040	RCP85	9.6	1.25	1.9	0.3	1.75	0.1
2041	2060	RCP26	9.3	1.22	1.7	0.4	2.17	0.2
2041	2060	RCP45	12.3	1.61	4.7	0.5	2.66	0.3
2041	2060	RCP85	13.4	1.75	5.7	1.0	5.21	0.8
2061	2080	RCP26	9.8	1.28	2.1	0.5	2.88	0.4
2061	2080	RCP45	14.2	1.86	6.6	0.8	4.00	0.6
2061	2080	RCP85	18.1	2.37	10.5	2.7	14.22	2.5
2081	2100	RCP26	11.1	1.45	3.4	0.7	3.64	0.5
2081	2100	RCP45	14.0	1.83	6.4	0.8	4.21	0.6
2081	2100	RCP85	29.5	3.87	21.9	6.7	35.35	6.5

Podle středního modelu (MPI-ESM-LR_RCA4) bude počet tropických dnů větším tempem narůstat v Čechách než na Moravě. Největší posun již od prvního období (20letí) je předpokládán ve středních Čechách. Naopak k nejmenší změně dojde na severní Moravě. Model reprezentující teplejší odhad (MOHC-HADGEM2-ES_RACMO22E) má prostorové rozložení jiné. Nejvíce těchto dnů připadá na jižní Moravu a shodně na střední Čechy (obr. 5-21). Průměrná změna za celé období (2021–2100) je pro jižní Moravu od 7 do 16 dnů podle

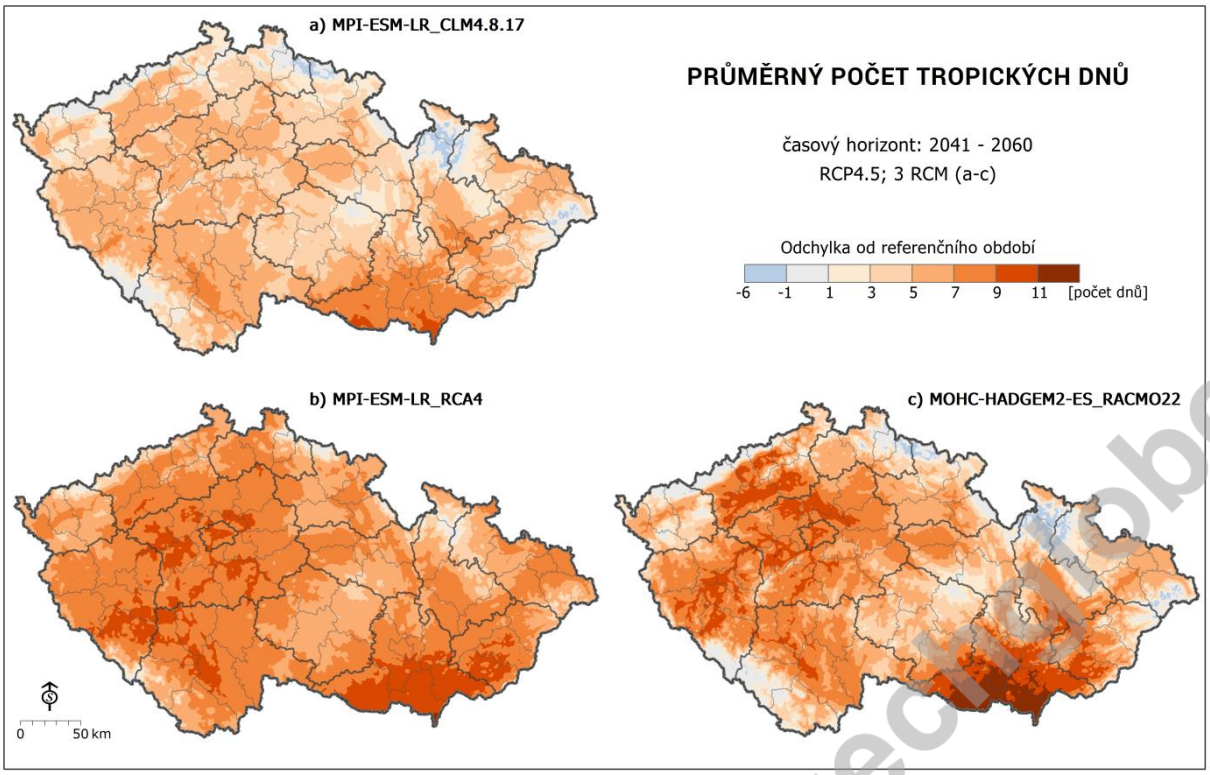
Projekt SustES - Czechglobe

emisního scénáře RCP4.5 a RCP8.5, oproti 8–12 dnům reprezentovaných středním odhadem. Chladný model (MPI-ESM-LR_CLM4.8.17) má velice podobné prostorové rozložení změny jako teplý model. Tedy nejvyšší průměrná změna 6–12 dní je předpokládána na jižní Moravě a podobně i ve středních Čechách. Naopak na severní Moravě a východních Čechách má být průměrný nárůst nejmenší, a to v rozmezí 4–8 dnů.



Obr. 5-20. ***Odhadovaná změna počtu tropických dnů podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

Projekt SustES - Czechglobe

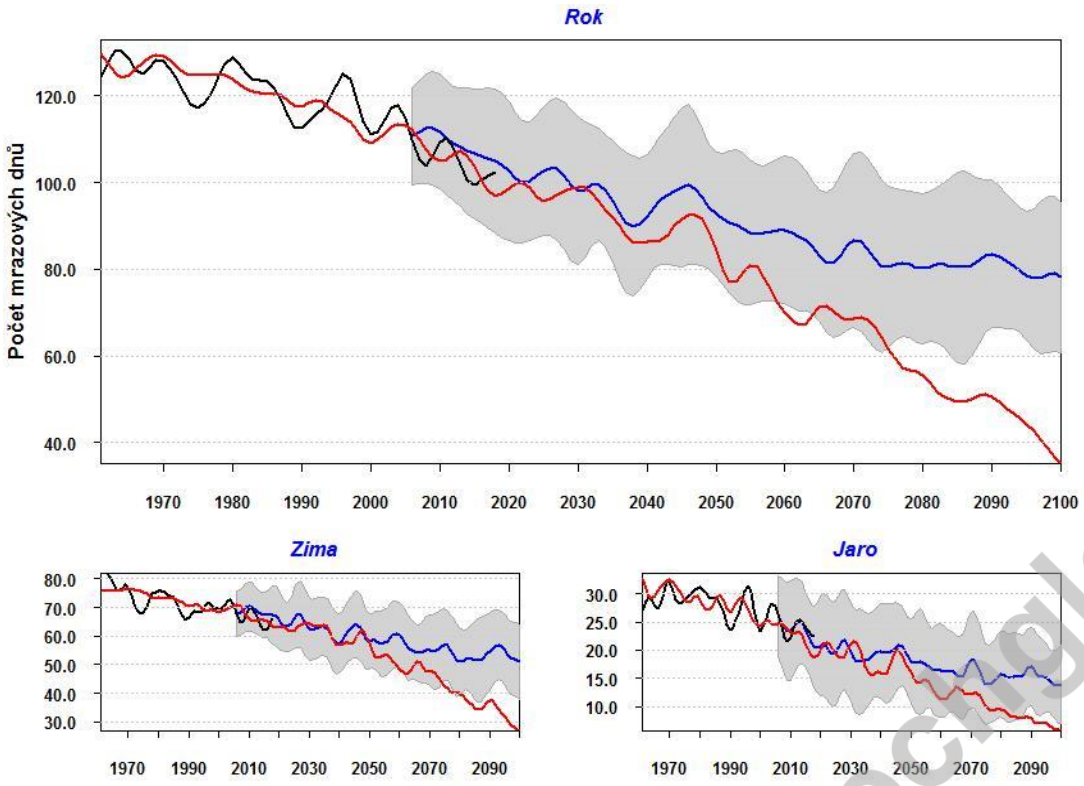


Obr. 5-21. ***Rozdíl predikovaného množství tropických dnů podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.***

5.7.2 Nízké teploty vzduchu

V případě počtu mrazových dnů (minimální teplota klesne pod 0 °C) jsou současná měření i modely v období, kdy dochází k překryvu časových řad, v souladu (obr. 5-22). V porovnání s referenčním obdobím (1981–2010) sledujeme v současném dvacetiletí (2001–2020) pokles o 10 %. Pokles bude v dalším období nadále pokračovat ve shodě se zvyšující se teplotou vzduchu. V půlce století očekáváme pokles na 80 % u RCP4.5 (na 70 % v případě RCP8.5, v porovnání s republikovým průměrem v referenčním období 116 dní), na konci století to bude již 70 %, resp. 40 % (tab. 5-6).

Projekt SUSTES - Czechglobe



Obr. 5-22. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro počet mrazových dnů pro rok a zimu a jaro. Shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.***

U počtu mrazových dnů zaznamenáváme statisticky významný (p=0,05) klesající rostoucí trend v roce i ve všech sezonách (kromě léta, kdy se tyto dny nevyskytují), pro RCP8.5 pro všechna období. Pro RCP4.5 na konci století tento trend již není statisticky významný.

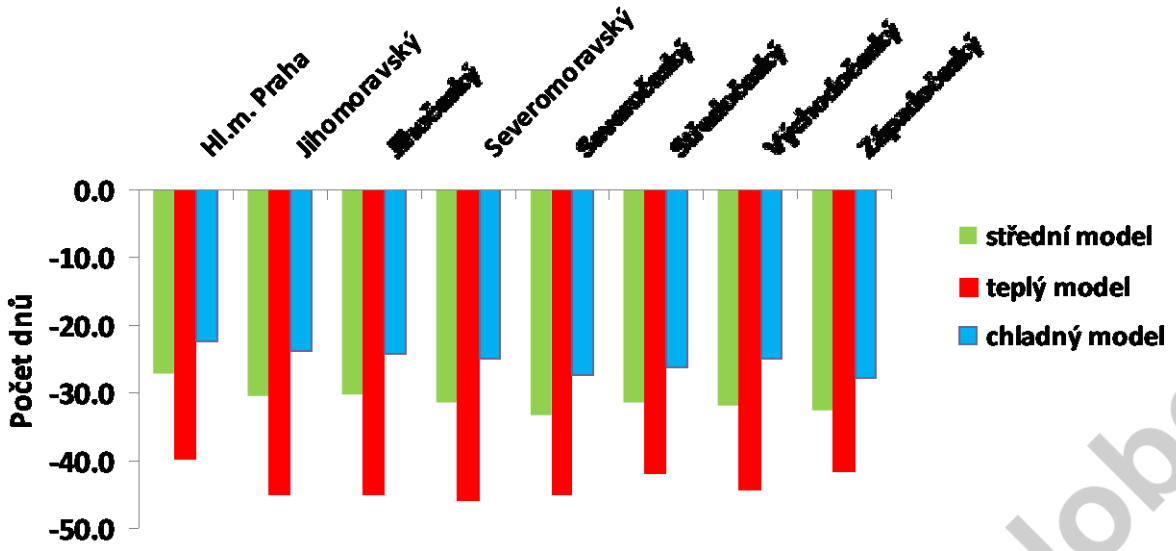
Projekt SustES - Czechglobe

Tab. 5-6. ***Počet mrazových dnů pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny podíly a dále rozdíly oproti současnosti (1981–2010).***

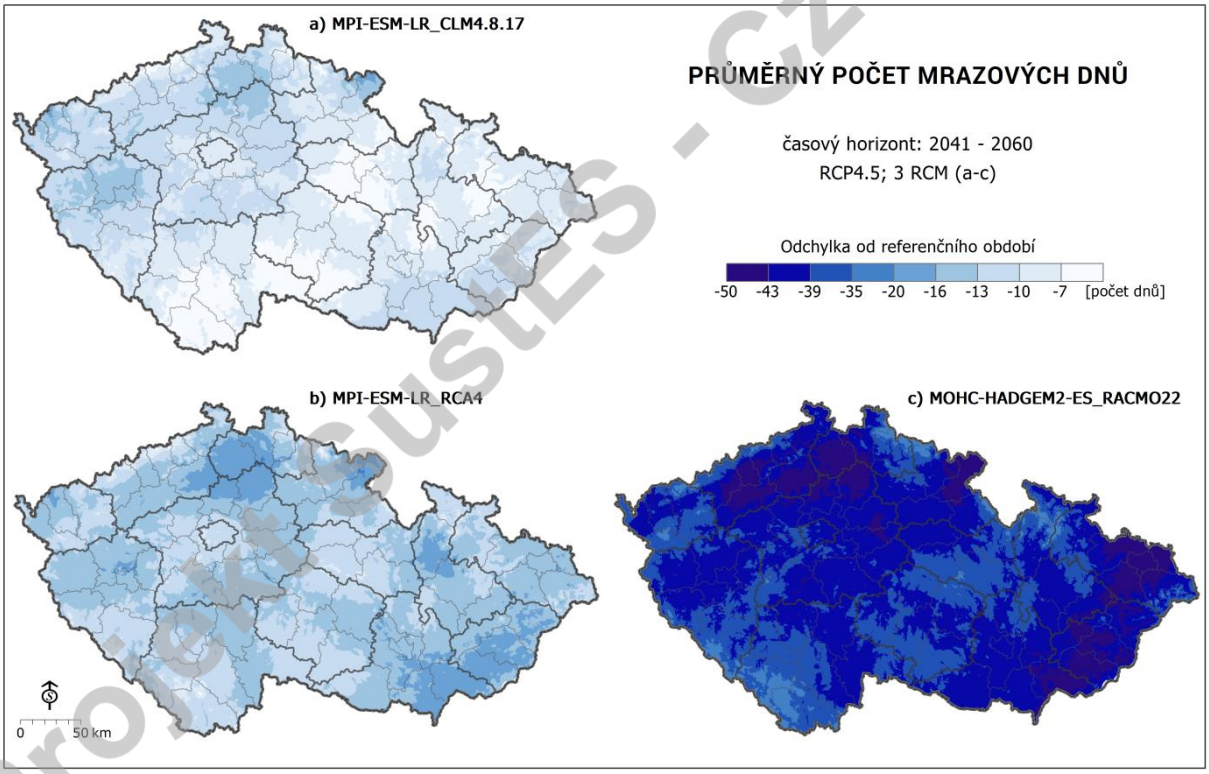
Začátek	Konec	Scénář	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim
1981	2010	stan	**116**	70	27	0	20	***Podíl:***					***Rozdíl:***				
2001	2020	stan	**108**	67	25	0	16	**0.93**	0.96	0.93	0.81	0.82	**-8**	-3	-2	0	-3
2001	2020	RCP26	**108**	68	24	0	17	**0.93**	0.96	0.92	0.27	0.86	**-8**	-2	-2	0	-3
2001	2020	RCP45	**109**	69	24	0	17	**0.94**	0.98	0.90	0.16	0.88	**-7**	-1	-3	0	-2
2001	2020	RCP85	**106**	67	23	0	17	**0.91**	0.96	0.86	0.10	0.85	**-10**	-3	-4	0	-3
2021	2040	RCP26	**98**	63	21	0	13	**0.84**	0.90	0.80	0.16	0.69	**-19**	-7	-5	0	-6
2021	2040	RCP45	**97**	63	20	0	15	**0.84**	0.90	0.74	0.05	0.75	**-19**	-7	-7	0	-5
2021	2040	RCP85	**95**	62	19	0	14	**0.82**	0.89	0.73	0.03	0.71	**-21**	-8	-7	0	-6
2041	2060	RCP26	**92**	61	18	0	13	**0.79**	0.86	0.66	0.13	0.68	**-25**	-9	-9	0	-6
2041	2060	RCP45	**93**	60	19	0	14	**0.80**	0.86	0.70	0.00	0.71	**-23**	-10	-8	0	-6
2041	2060	RCP85	**83**	56	15	0	11	**0.71**	0.80	0.58	0.00	0.56	**-33**	-14	-11	0	-9
2061	2080	RCP26	**90**	61	16	0	14	**0.77**	0.87	0.60	0.08	0.70	**-26**	-9	-11	0	-6
2061	2080	RCP45	**83**	55	16	0	11	**0.71**	0.78	0.60	0.00	0.58	**-33**	-15	-11	0	-8
2061	2080	RCP85	**65**	46	11	0	8	**0.56**	0.65	0.43	0.00	0.39	**-51**	-24	-15	0	-12
2081	2100	RCP26	**95**	62	19	0	15	**0.82**	0.88	0.71	0.11	0.75	**-21**	-9	-8	0	-5
2081	2100	RCP45	**81**	53	15	0	11	**0.69**	0.76	0.57	0.00	0.56	**-36**	-17	-11	0	-9
2081	2100	RCP85	**46**	34	8	0	5	**0.40**	0.48	0.28	0.00	0.24	**-70**	-37	-19	0	-15

Pokles počtu mrazových dnů v budoucím klimatu reprezentovaným středním odhadem (MPI-ESM-LR_RCA4) je prostorově celkem vyrovnaný. Nejvíce těchto dnů ubude v severních Čechách, a to průměrně o 23 až 42 dnů. Nejmenší změna je pro oblast Prahy, ale to je dáno již nyní menším výskytem mrazových dnů. Podobné prostorové rozložení je překvapivě reprezentováno i chladným a teplým modelem.

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-23. ***Odhadovaná změna počtu mrazových dnů podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***



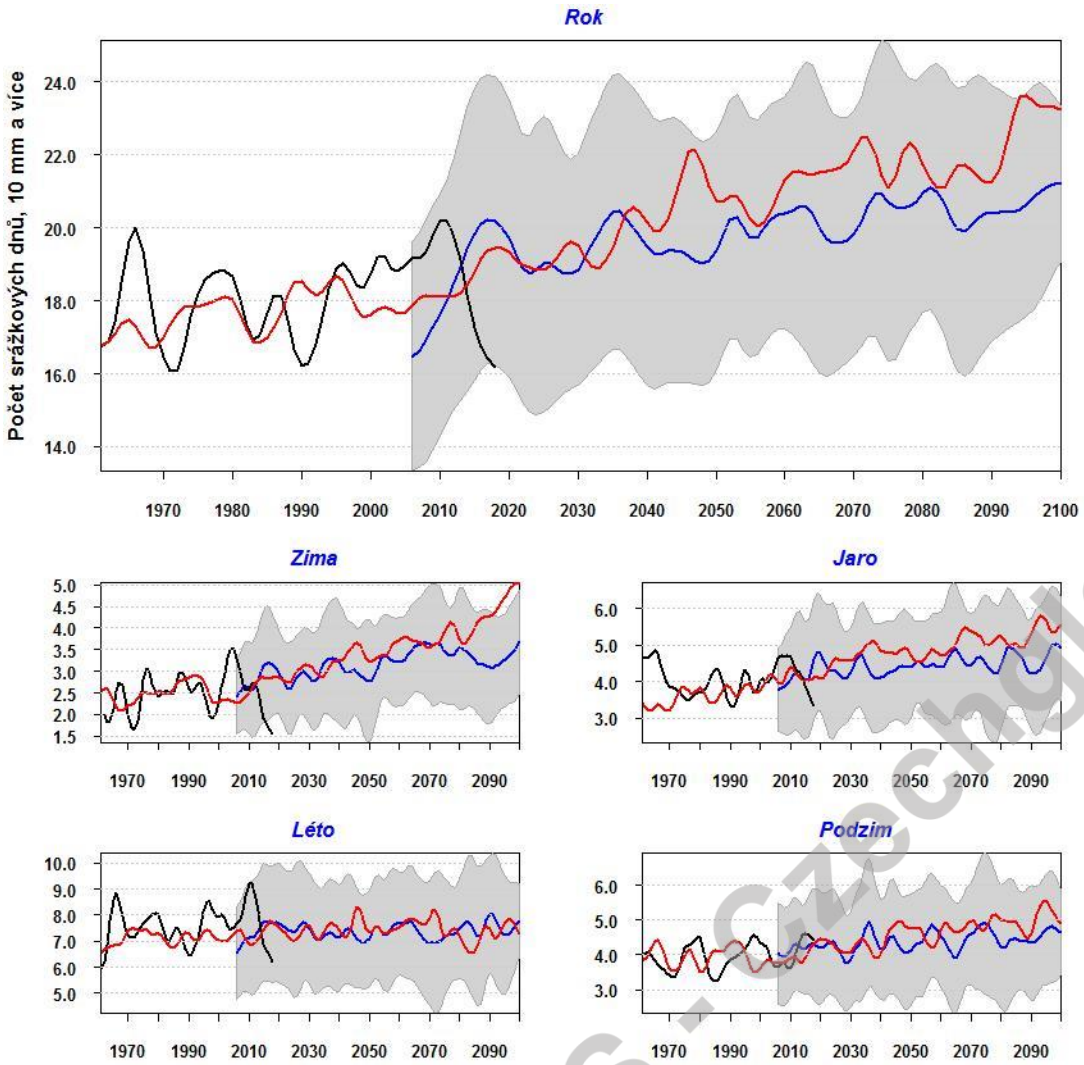
Obr. 5-24. ***Rozdíl predikovaného množství mrazových dnů podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.***

Projekt SustES - Czechglobe

5.7.3 Počty srážkových dnů

Počet dnů se srážkami (1 mm a více) se v současnosti ani budoucnosti příliš nemění (pokud srovnáváme absolutní čísla, viz tab. 5-7). V případě počtu dnů se srážkami alespoň 10, 20 a 50 mm se již počet mění (hodnoty do budoucna rostou, tab. 5-8). Je zde potřeba opět upozornit na fakt, že skutečnost (staniční měření) se s modelovými simulacemi v posledních letech rozchází (obr. 5-25). Zatímco v předešlém období mají srážky velkou variability a střídají se roky s vyšším a nižším počtem srážkových dnů, tak v posledních letech (po roce 2010) chybí roky, kdy by počet srážkových dnů byl výrazně vyšší; roky jsou buď v „normálu“, nebo je počet dnů nižší, než je průměr (podobné období bez vyššího počtu dnů na rozhraní 90. let vykazovalo hodnoty kolem průměru, nestřídaly se roky s výrazně vyšším a nižším počtem srážkových dnů). Toto mj. vede (spolu s teplými zimami bez sněhové pokrývky) k četnějšímu a závažnějšímu (z hlediska dopadů) výskytu suchých epizod. Jelikož variabilita srážek je značná, může se ale stále ještě jednat o přirozený výkyv, toto ukáží až následující roky.

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-25. ***Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro počet dnů se srážkami 10 mm a více, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.***

Pokud jde o lineární trendy, tak v současném období a za celé období 1981–2100 sledujeme statisticky významné trendy (p=0,05) u všech počtu dnů (se srážkami 1, 10, 20, 50 mm a více). V budoucím klimatu zůstává počet dnů se srážkami alespoň 1 mm konstantní. Pro počet dnů s alespoň 10 mm počet roste pro blízkou budoucnost (2021–2060) pro RCP8.5, a to především v zimě. Obdobně pro počet dní alespoň s 20 mm sledujeme nárůst rovněž u RCP2.6. Pro RCP8.5 sledujeme nárůst počtu dnu se srážkami 50 mm a více rovněž ve vzdálené budoucnosti (2061–2100). V případě letních srážek sledujeme ve všech případech (počty dnů s 1, 10, 20, 50 mm a více) pokles hodnot, i když tento pokles je statisticky nevýznamný (na hladině významnosti p=0,05).

Projekt SusES - Czechglobe

Tab. 5-7. ***Počet dnů se srážkami 1 mm a více pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny podíly a dále rozdíly oproti současnosti (1981–2010).***

Začátek	Konec	Scénář	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim
1981	2010	stan	**113**	27.6	28.0	31.1	26.0	***Podíl:***					***Rozdíl:***				
2001	2020	stan	**110**	27.4	26.7	30.4	25.4	**0.98**	0.99	0.95	0.98	0.98	**-2.8**	-0.2	-1.4	-0.7	-0.6
2001	2020	RCP26	**116**	29.5	28.7	32.0	25.6	**1.03**	1.07	1.02	1.03	0.98	**3.3**	1.9	0.7	0.9	-0.4
2001	2020	RCP45	**113**	27.7	28.7	30.7	25.4	**1.00**	1.00	1.03	0.99	0.98	**0.0**	0.1	0.7	-0.4	-0.6
2001	2020	RCP85	**111**	27.3	28.4	30.3	24.9	**0.98**	0.99	1.01	0.97	0.96	**-1.9**	-0.3	0.4	-0.8	-1.1
2021	2040	RCP26	**112**	31.3	28.4	27.8	25.1	**0.99**	1.13	1.01	0.90	0.96	**-0.6**	3.6	0.4	-3.2	-1.0
2021	2040	RCP45	**114**	29.4	28.2	30.4	26.4	**1.01**	1.06	1.01	0.98	1.01	**1.1**	1.8	0.2	-0.7	0.4
2021	2040	RCP85	**114**	29.3	28.7	30.1	25.6	**1.01**	1.06	1.02	0.97	0.98	**1.4**	1.7	0.6	-1.0	-0.4
2041	2060	RCP26	**111**	27.5	28.2	30.5	24.9	**0.99**	1.00	1.01	0.98	0.96	**-1.6**	-0.1	0.2	-0.6	-1.1
2041	2060	RCP45	**113**	28.5	28.7	29.8	26.5	**1.00**	1.03	1.02	0.96	1.02	**-0.1**	0.9	0.6	-1.3	0.5
2041	2060	RCP85	**115**	30.4	29.2	29.5	26.0	**1.02**	1.10	1.04	0.95	1.00	**1.8**	2.8	1.2	-1.6	0.0
2061	2080	RCP26	**111**	29.4	28.5	30.1	22.9	**0.98**	1.07	1.02	0.97	0.88	**-2.1**	1.8	0.5	-1.0	-3.1
2061	2080	RCP45	**114**	29.0	28.6	29.5	26.7	**1.01**	1.05	1.02	0.95	1.03	**1.6**	1.4	0.6	-1.6	0.7
2061	2080	RCP85	**116**	30.6	29.2	29.3	26.4	**1.03**	1.11	1.04	0.94	1.01	**3.4**	3.0	1.1	-1.8	0.4
2081	2100	RCP26	**112**	29.1	26.3	29.5	27.4	**0.99**	1.05	0.94	0.95	1.05	**-0.8**	1.4	-1.7	-1.6	1.3
2081	2100	RCP45	**114**	29.0	29.6	28.6	25.7	**1.01**	1.05	1.06	0.92	0.99	**1.3**	1.4	1.6	-2.5	-0.3
2081	2100	RCP85	**113**	31.4	29.2	26.8	24.9	**1.00**	1.14	1.04	0.86	0.96	**0.1**	3.8	1.1	-4.3	-1.1

Projekt SustES - Czechglobe

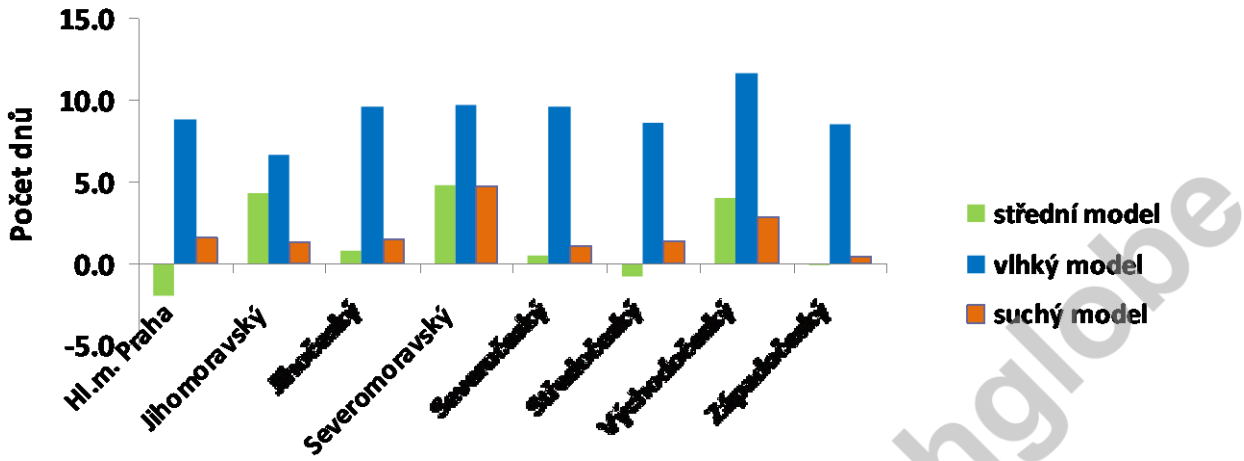
Tab. 5-8. ***Počet dnů se srážkami 10 mm a více pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny podíly a dále rozdíly oproti současnosti (1981–2010).***

Začátek	Konec	Scénář	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim
1981	2010	stan	**18.3**	2.7	4.1	7.6	3.9	***Podíl:***					***Rozdíl:***				
2001	2020	stan	**18.8**	2.6	4.2	7.8	4.1	**1.03**	0.98	1.02	1.03	1.05	**0.5**	0.0	0.1	0.2	0.2
2001	2020	RCP26	**19.4**	3.0	4.5	7.7	4.1	**1.06**	1.14	1.10	1.01	1.04	**1.0**	0.4	0.4	0.1	0.1
2001	2020	RCP45	**18.4**	2.7	4.2	7.2	4.1	**1.00**	1.02	1.02	0.95	1.05	**0.1**	0.1	0.1	-0.4	0.2
2001	2020	RCP85	**18.5**	2.6	4.1	7.3	4.0	**1.01**	0.96	1.01	0.96	1.01	**0.1**	-0.1	0.0	-0.3	0.1
2021	2040	RCP26	**18.9**	3.3	4.7	6.7	4.3	**1.03**	1.24	1.14	0.88	1.09	**0.6**	0.6	0.6	-0.9	0.4
2021	2040	RCP45	**19.4**	3.0	4.3	7.3	4.3	**1.06**	1.12	1.05	0.96	1.09	**1.1**	0.3	0.2	-0.3	0.4
2021	2040	RCP85	**19.4**	3.0	4.7	7.4	4.2	**1.06**	1.13	1.14	0.96	1.07	**1.0**	0.3	0.6	-0.3	0.3
2041	2060	RCP26	**20.4**	2.9	5.0	8.2	4.3	**1.11**	1.11	1.21	1.07	1.10	**2.0**	0.3	0.9	0.5	0.4
2041	2060	RCP45	**19.6**	3.0	4.4	7.4	4.4	**1.07**	1.14	1.07	0.96	1.12	**1.2**	0.4	0.3	-0.3	0.5
2041	2060	RCP85	**20.7**	3.4	4.7	7.5	4.6	**1.13**	1.29	1.16	0.98	1.19	**2.4**	0.8	0.6	-0.2	0.7
2061	2080	RCP26	**19.5**	3.1	4.8	7.7	3.9	**1.07**	1.16	1.18	1.01	0.99	**1.2**	0.4	0.7	0.1	0.0
2061	2080	RCP45	**20.3**	3.5	4.5	7.3	4.5	**1.11**	1.32	1.10	0.95	1.14	**2.0**	0.8	0.4	-0.4	0.5
2061	2080	RCP85	**21.8**	3.8	5.2	7.7	4.9	**1.19**	1.42	1.26	1.01	1.24	**3.5**	1.1	1.1	0.1	0.9
2081	2100	RCP26	**19.5**	3.2	4.4	7.5	4.4	**1.07**	1.21	1.08	0.98	1.14	**1.2**	0.6	0.3	-0.2	0.5
2081	2100	RCP45	**20.6**	3.3	4.7	7.6	4.5	**1.13**	1.24	1.14	1.00	1.15	**2.3**	0.6	0.6	0.0	0.6
2081	2100	RCP85	**22.3**	4.4	5.3	7.2	5.0	**1.21**	1.64	1.29	0.95	1.28	**3.9**	1.7	1.2	-0.4	1.1

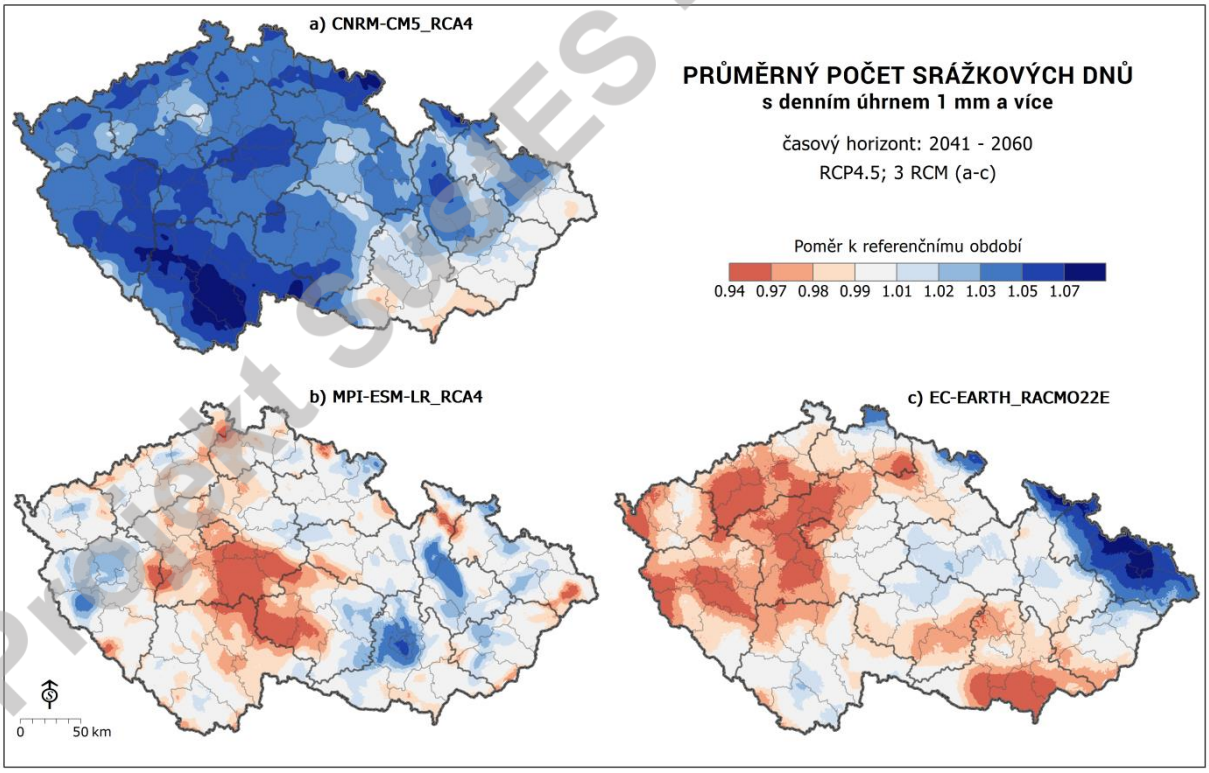
Změna počtu srážkových dní (1 mm a více) je značně variabilní, a to jak v čase, tak i v prostoru. V letech 2021–2040 podle středního modelu (MPI-ESM-LR_RCA4) dojde k mírnému poklesu těchto dní především v oblasti Čech, a to hlavně ve středních a severních Čechách. Naopak na severní a jižní Moravě a ve východních Čechách čekáme mírný nárůst. V letech 2041–2080 model předpokládá již nárůst nebo stejný počet srážkových dnů oproti současnosti na většině území republiky. I vlhký model (CNRM-CM5_RCA4) predikuje pro první období 2021–2040 mírný pokles počtu dnů se srážkami, a to pro všechny regiony s výjimkou jižních Čech. Pro další období má podle tohoto modelu počet narůstat, a to nejvíce ve východních a severních Čechách, v průměru o 4–9 dnů. U modelu reprezentující sušší klima (EC-EARTH_RACMO22E) se výsledky liší s ohledem na emisní scénář. Podle RCP4.5 dojde k mírnému poklesu v průměru za celé období ve všech regionech s výjimkou

Projekt SustES - Czechglobe

severní Moravy. Naopak RCP8.5 předpovídá slabý nárůst těchto dnů, a to nejvíce na severní Moravě a ve východních Čechách.



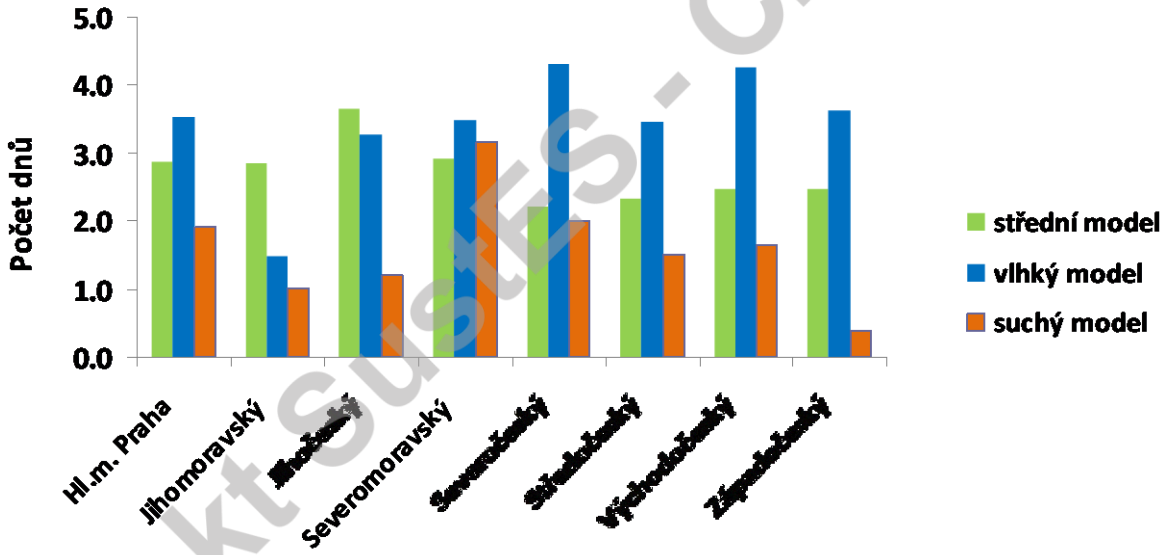
Obr. 5-26. ***Odhadovaná změna počtu dnů se srážkami alespoň 1 mm podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***



Obr. 5-27. ***Podíl predikovaného počtu srážkových dnů s alespoň 1 mm podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.***

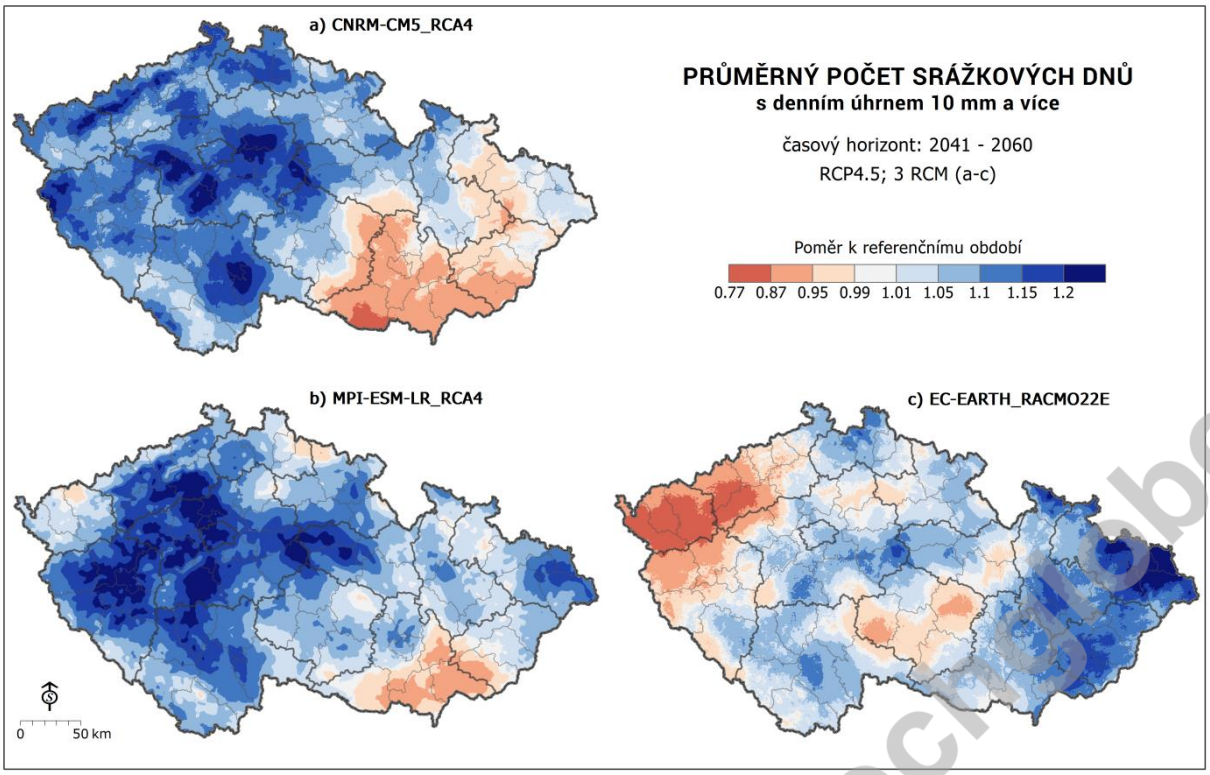
Projekt SustES - Czechglobe

Střední model (MPI-ESM-LR_RCA4) predikuje pro počet dnů se srážkami 10 mm a více nárůst ve všech regionech republiky. Nejvíce by mělo těchto dní narůst na Šumavě, v podhůří Krkonoš a na severní Moravě. Naopak k nejmenší změně by mělo dojít na jižní Moravě. U modelu reprezentující vlhký odhad změny (CNRM-CM5_RCA4) je překvapivé, že pro období 2021–2040 prakticky pro všechny regiony předpokládá stejný či spíše nižší počet těchto dnů než v současném klimatu. Poté už dochází k jeho nárůstu, a to nejvíce pro konec století. Skrz celé období je patrné, že k nejmenší změně dojde stejně jako u středního odhadu na jižní Moravě a v první polovině století obecně na celé Moravě, naopak v Čechách bude už od roku 2041 pozorován nárůst těchto dnů. V průměru za celé období 2021–2100 se zvedne počet těchto dnů nejvíce na severu Čech, a to o 2–4 dny. I představitel suššího výhledu (EC-EARTH_RACMO22E) předpokládá mírný nárůst počtu dnů se srážkami 10 mm a více s výjimkou prvního období. Z prostorového hlediska zde převládá nejvyšší změna, stejně jako u dvou předešlých modelů, na severní Moravě. K nejmenšímu nárůstu má opět dojít na jižní Moravě a také na Karlovarsku. Prostorová změna je tedy podobná pro střední, suchý i vlhký model.

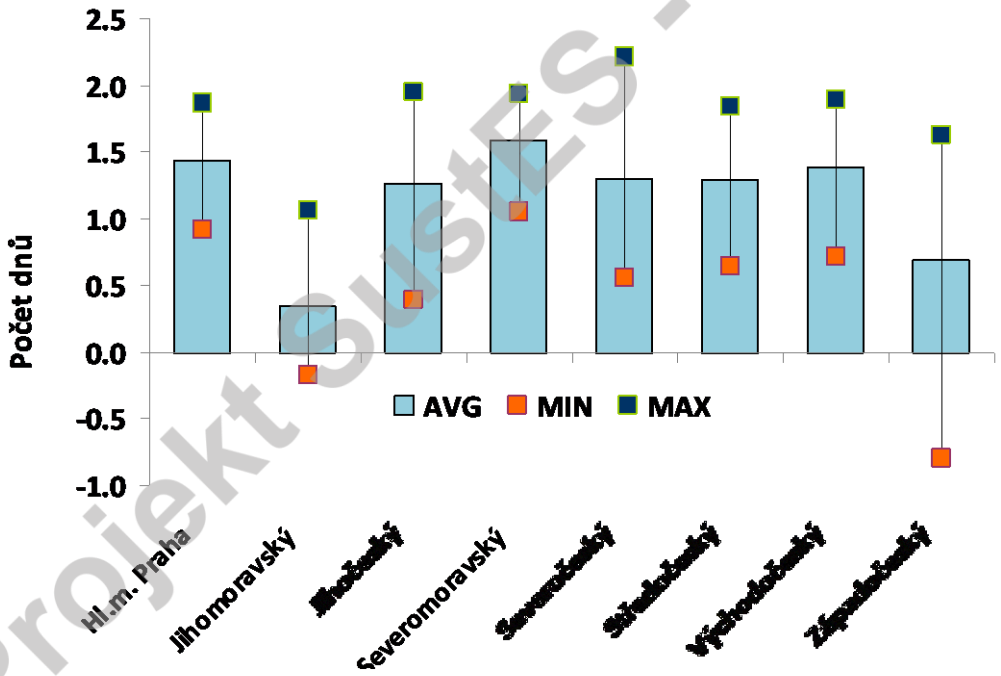


Obr. 5-28. ***Odhadovaná změna počtu dnů se srážkami alespoň 10 mm podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

Projekt SustES - Czechglobe



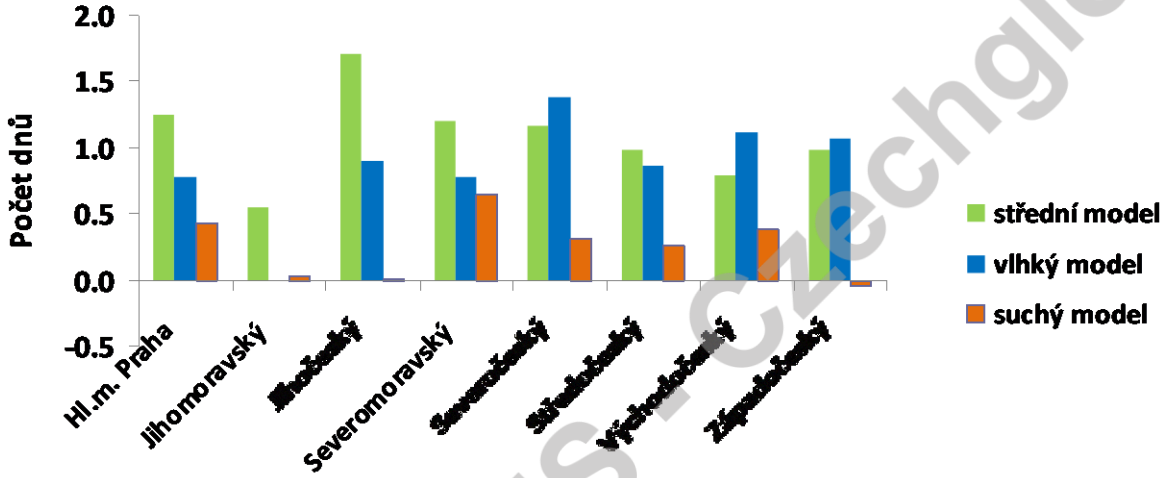
Obr. 5-29. ***Podíl predikovaného počtu srážkových dnů s alespoň 10 mm podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.***



Obr. 5-30. ***Průměrná změna počtu dnů se srážkami alespon 10 mm podle 3 modelů (střední, vlhčí a sušší) pro období 2021–2060 (délka 40 let) podle dvou emisních scénářů RCP4.5 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

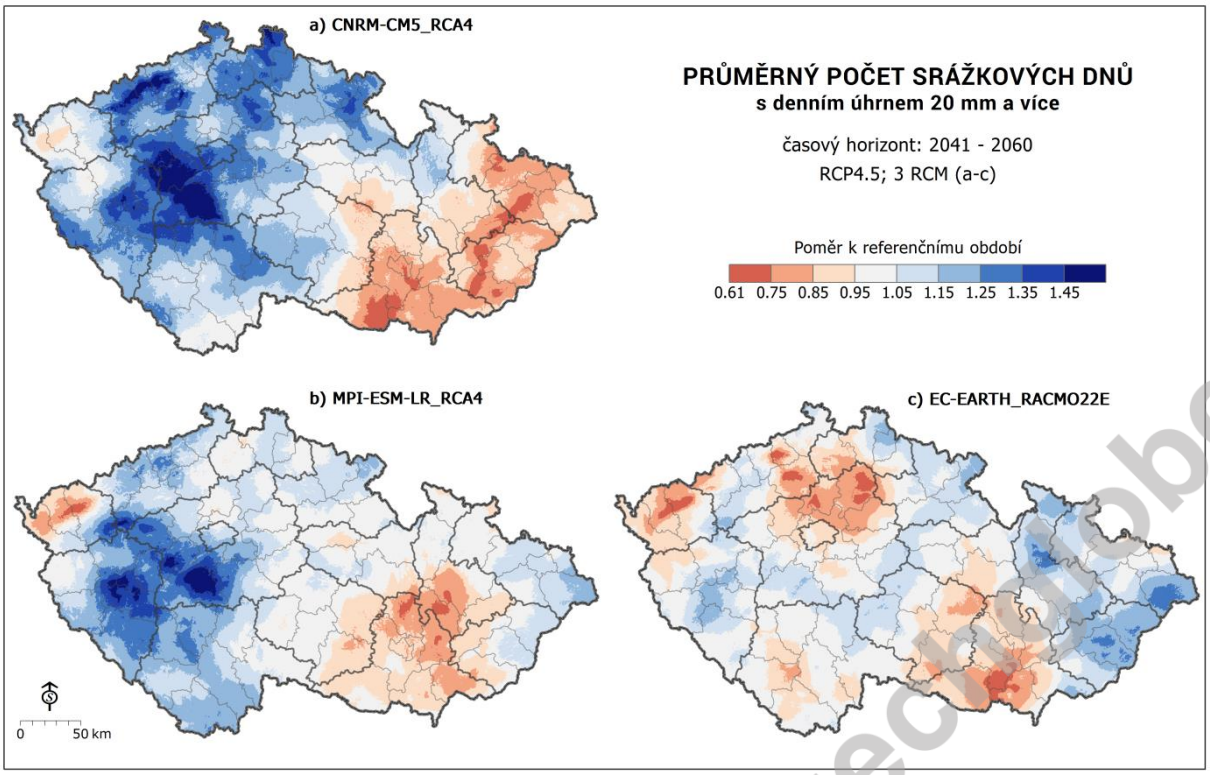
Projekt SustES - Czechglobe

Prostorová změna u intenzivních srážek s úhrny 20 mm a více je velmi variabilní. Podle středního modelu (MPI-ESM-LR_RCA4) nejvíce těchto dnů přibude na Šumavě a na severní Moravě. Naopak malá změna je předpokládaná na jižní Moravě a ve středních Čechách. Podle modelu reprezentující vlhčí výhled (CNRM-CM5_RCA4) se predikuje hlavně na Moravě slabý pokles těchto dnů v letech 2021–2060. Dokonce například na jižní Moravě tento vlhčí model předpokládá v některých regionech nižší nárůst než střední odhad. K největšímu průměrnému nárůstu podle tohoto modelu naopak dojde v severních Čechách. Sušší výhled (EC-EARTH_RACMO22E) předpokládá jednoznačně největší nárůst těchto dnů na severní Moravě, a to jak na Ostravsku, tak hlavně v Beskydech. K dalšímu významnému nárůstu by mělo dojít i v Jizerských horách. Naopak na jižní Moravě bude počet dnů se srážkou 20 mm a více bez významné změny oproti současnému klimatu.



Obr. 5-31. ***Odhadovaná změna počtu dnů se srážkami alespoň 20 mm podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.***

Projekt SustES - Czechglobe



Obr. 5-32. ***Podíl predikovaného počtu srážkových dnů s alespoň 20 mm podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.***

Projekt SustES - Czechglobe

6 Závěr

Tato zpráva zmapovala změnu klimatu pro Českou republiku podle nejnovějších dostupných simulací budoucího klimatu (Euro-CORDEX simulace) pro základní meteorologické prvky a klimatické charakteristiky. Bude sloužit jako výchozí materiál pro návazné impaktové studie a experimenty směřující k adaptačním opatřením. Použité vstupní údaje (modelové simulace) vychází z nejnovějších (state-of-the-art) vědeckých poznatků, které jsou aktuálně k dispozici.

V této (první) etapě je prezentována změna klimatu v rámci tzv. klimatické obálky, kdy z velkého množství vstupních regionálních (RCM) a globálních (GCM) klimatických modelů jsou vybrány reprezentativní sady dobře popisující jak střední odhad očekávané klimatické změny, tak meze, ve kterých se tato očekávaná změna bude pohybovat (modely udávající nižší či vyšší teplotu vzduchu oproti střednímu modelu, obdobně nižší či vyšší srážkové úhrny atp.). Z uvedených výstupů je dále patrná tzv. „nevyhnutelná“ změna, vyplývající ze všech použitých regionálních a globálních klimatických simulací.

V dalších etapách, které budou bezprostředně následovat, budou nejprve zpřístupněny detailní data o reprezentativnosti jednotlivých scénářů a klimatických modelů a jejich detailní výběr a metodika použití dat. (v této zprávě bude techničtější popis). Následně budou analyzovány extrémní jevy (vč. tzv. sdružených událostí), bude zde podrobněji popsána problematika sucha (vč. evapotranspirace) a dalších charakteristik potřebných jako podrobnější vstupy do impaktových studií.

Poděkování

Scénáře změny klimatu vznikly s podporou 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) na Ústavu výzkumu globální změny AV ČR v.v.i. (CzechGlobe), a to na základě zpracování modelových dat projektů CMIP5 a EUROCORDEX a s přihlédnutím k pozorovaným datům poskytnutých Českým hydrometeorologickým ústavem.

Projekt SustES - CzechGlobe

Seznam tabulek

Tab. 4-1. *Globální klimatické modely uvažované ve studii.* 17

Tab. 4-2. *Regionální klimatické modely uvažované ve studii.* 18

Tab. 4-3 *Regionální klimatické modely doporučené pro další analýzy včetně označení sedmice modelů z podvýběru.* 26

Tab. 5-1. *Teplota vzduchu pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje skutečnost – měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny rozdíly oproti současnosti (1981–2010).* 34

Tab. 5-2. *Trendy v absolutních teplotních maximech a minimech pro různá období a různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Uvedeny jsou pouze lineární trendy statisticky významné na hladině významnosti p=0,05.* 35

Tab. 5-3. *Srážkové úhrny pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny podíly a dále rozdíly oproti současnosti (1981–2010)* 40

Tab. 5-4. *Trendy v ročních srážkových úhrnech a ročních maximech denních úhrnů pro různá období a různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Uvedeny jsou pouze lineární trendy statisticky významné na hladině významnosti p=0,05.* 41

Tab. 5-5. *Počet tropických dnů (nalevo) a počet dnů s tropickou nocí (napravo) pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Jsou také uvedeny podíly a rozdíly oproti současnosti (1981–2010).* 50

Tab. 5-6. *Počet mrazových dnů pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny podíly a dále rozdíly oproti současnosti (1981–2010).* 54

Tab. 5-7. *Počet dnů se srážkami 1 mm a více pro území celé České republiky pro různá období (20letí) a pro různé scénáře (0_stan označuje měření na stanicích). Ve druhé polovině tabulky (napravo) jsou uvedeny podíly a dále rozdíly oproti současnosti (1981–2010).* 58

Seznam obrázků

Obr. 2-1. *Střední změna teplot (nahoře) a srážek (dole) na konci 21. století dle globálních klimatických modelů z CMIP5 ansámblu pro scénáře RCP2.6 (nalevo) a RCP8.5 (napravo) (převzato z IPCC AR5 WG1 SMP).* 9

Projekt SustES - Czechglobe

Obr. 3-1. *Změna průměrné roční teploty vzduchu v Evropě podle E-OBS datasetu.* 10

Obr. 3-2. *Změna průměrného úhrnu srážek (vlevo) a teploty vzduchu (vpravo) na konci 21. století (2071–2100) vůči konci 20. století (1971–2000) dle Euro-CORDEX modelů a scénářů RCP4.5 a RCP8.5. Pro srovnání jsou v posledním řádku rovněž zobrazeny projekce starší generace modelů dle scénáře A1B.* 11

Obr. 4-1. *Vzdálenost od středu ansámblu pro jednotlivé RCM pro teplotu vzduchu (levý panel) a dále průměrná korelace ročního chodu (AC, červená) a prostorová korelace (SC, zelená) nad ČR pro minimální, maximální a průměrnou teplotu vzduchu (TMI, TMA, T) a dále pro globální záření (RAD), relativní vlhkost (H), rychlost větru (F) a úhrn srážek (SRA).* 20

Obr. 4-2. *Vypočtené váhy ansámblu 12 RCM, které prošly validací.* 22

Obr. 4-3. *Vzdálenosti od středu ansámblu pro 12 RCM pro různé meteorologické prvky s označením modelů, které byly v jednotlivých krocích detekce středního modelu vyřazeny z výběru.* 23

Obr. 4-4. *Rozdíl budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a současného (1981–2010) klimatu pro teplotu vzduchu (ve °C), pro GCM (šedě) a RCM (barevně) simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001-2018.* 24

Obr. 4-5. *Rozdíl budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a současného (1981–2010) klimatu pro srážkové úhrny (v mm), pro GCM (šedě) a RCM (barevně) simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001-2018.* 25

Obr. 4-6. *Taylorův diagram pole srážek v létě (nahoře) a pole teploty vzduchu v zimě (dole) pro 27 GCM.* 27

Obr. 5-1. *Rozdíl budoucího (20letí od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro průměrnou denní maximální teplotu vzduchu (ve °C), pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.* 29

Obr. 5-2. *Poměr budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro srážkové úhrny, pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.* 30

Obr. 5-3. *Poměr budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro relativní vlhkost vzduchu, pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.* 31

Obr. 5-4. *Poměr budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a referenčního (1981–2005) období pro sluneční radiaci, pro GCM a RCM simulace a území České republiky. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018.* 31

Obr. 5-5. *Členění na regiony použité v této studii pro vyhodnocení prostorových rozdílů v rámci České republiky.* 32

Projekt SustES - Czechglobe

Obr. 5-6. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro teplotu vzduchu, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let* 33

Obr. 5-7. *Odhadovaná změna teploty vzduchu podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 36

Obr. 5-8. *Teplota vzduchu pro referenčnímu období 1981–2010 a podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.* 37

Obr. 5-9. *Rozdíl predikované teploty vzduchu podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.* 37

Obr. 5-10. *Průměrná změna teploty vzduchu podle 3 modelů (střední, teplý a studený) pro období 2021–2060 (délka 40 let) podle dvou emisních scénářů RCP4.5 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 38

Obr. 5-11. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro srážkové úhrny, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let* 39

Obr. 5-12. *Odhadovaná změna roční sumy srážek podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 42

Obr. 5-13. *Srážkové úhrny pro referenčnímu období 1981–2010 a podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.* 42

Obr. 5-14. *Rozdíl predikované roční sumy srážek podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.* 43

Obr. 5-15. *Průměrná změna (podíl) srážkových úhrnů podle 3 modelů (střední, teplý a studený) pro období 2021–2060 (délka 40 let) podle dvou emisních scénářů RCP4.5 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 43

Obr. 5-16. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro relativní vlhkost vzduchu, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let* 45

Obr. 5-17. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro délku slunečního svitu, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let* 46

Obr. 5-18. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro rychlost větru, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let* 48

Projekt SustES - Czechglobe

Obr. 5-19. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro počet tropických dnů (nahoře) a počet dnů s tropickou nocí (dole). Neshlazeno.* 50

Obr. 5-20. *Odhadovaná změna počtu tropických dnů podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 51

Obr. 5-21. *Rozdíl predikovaného množství tropických dnů podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.* 52

Obr. 5-22. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro počet mrazových dnů pro rok a zimu a jaro. Shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.* 53

Obr. 5-23. *Odhadovaná změna počtu mrazových dnů podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 55

Obr. 5-24. *Rozdíl predikovaného množství mrazových dnů podle tří RCM (chladný, střední a teplý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.* 55

Obr. 5-25. *Ensemblový průměr z vybraných 12 RCM simulací (modře – RCP4.5 spolu s pásy spolehlivosti, červeně – RCP8.5) a průměr za celou ČR (černě) pro počet dnů se srážkami 10 mm a více, pro rok a jednotlivé sezony, shlazeno nízkofrekvenčním Gaussovým filtrem pro 10 let.* 57

Obr. 5-26. *Odhadovaná změna počtu dnů se srážkami alespoň 1 mm podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 60

Obr. 5-27. *Podíl predikovaného počtu srážkových dnů s alespoň 1 mm podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.* 60

Obr. 5-28. *Odhadovaná změna počtu dnů se srážkami alespoň 10 mm podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 61

Obr. 5-29. *Podíl predikovaného počtu srážkových dnů s alespoň 10 mm podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.* 62

Obr. 5-30. *Průměrná změna počtu dnů se srážkami alespon 10 mm podle 3 modelů (střední, vlhčí a sušší) pro období 2021–2060 (délka 40 let) podle dvou emisních scénářů RCP4.5 a RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 62

Obr. 5-31. *Odhadovaná změna počtu dnů se srážkami alespoň 20 mm podle tří klimatických modelů v různých regionech České republiky pro období 2041–2060 a scénář RCP8.5, porovnání oproti referenčnímu období 1981–2010.* 63

Obr. 5-32. *Podíl predikovaného počtu srážkových dnů s alespoň 20 mm podle tří RCM (vlhký, střední a suchý model) v letech 2041–2060 pro scénář RCP4.5 oproti referenčnímu období 1981–2010.* 64

Projekt SustES - Czechglobe

Seznam literatury

Alexandersson, A. (1986): a Homogeneity Test Applied to Precipitation Data. J. Climatol., 6, 661-675.

Belda, M., Skalák, P., Farda, A., Halenka, T., Déqué, M., Csima, G., … Spiridonov, V. (2015). CECILIA regional climate simulations for future climate: Analysis of climate change signal. Advances in Meteorology, 2015, 354727. https://doi.org/10.1155/2015/354727

Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D. et al. (2007). An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. Climatic Change, 81, (Suppl 1): 53. https://doi.org/10.1007/s10584-006-9228-x

Dubrovský, M.; Trnka, M.; Holman, I. P.; Svobodová, E.; Harrison, P. A., 2015: Developing a reduced-form ensemble of climate change scenarios for Europe and its application to selected impact indicators, Climatic Change, 128, 3-4, pp. 169-186

Christensen, J.H., Kjellström, E., Giorgi, F., Lenderink, G., Rummukainen, M. (2010): Weight assignment in regional climate models, Climate Research 44 (2-3), 179-194.

Giorgi, F., Gutowski, W.J., (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. Annual Review of Environment and Resources, 40, 467-490.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, England: Cambridge University Press.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., … Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change, 14, 563–578.

Maronna, T., Yohai, V.J. (1978): a Bivariate Test for the Detection of a Systematic Change in Mean. J. Amer. Statist. Assoc., 73, 640-645.

Mastrandrea, M. D., et al. (2010) Guidance note for lead authors of the IPCC fifth assessment report on consistent treatment of uncertainties.

McVicar, T.R., van Niel, T.G., Li, L.T., Roderick, M.L., Rayner, D.P., Ricciardulli, L. and Donohue, R.J. (2008) Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. Geophysical Research Letters, 35, L20403. https://doi.org/10.1029/2008GL035627.

Meehl, G.A., T. L. Delworth, M. Latif, B. McAveney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor, (2007): The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88, 1383–1394, doi:10.1175/BAMS-88-9-1383.

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Brázdil, R., Tolasz, R. (2011a): Metodologie kontroly a homogenizace časových řad v klimatologii (Methodology of data quality kontrol and homogenization of time series in climatology). ČHMÚ, 118 pp. ISBN 978-80-86690-97-1

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. Időjárás, 117, 1, 123–141.

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Huth, R. (2011b): Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of Central European daily time series. Időjárás, 115, 1-2, pp. 87-98.

Štěpánek, P., Zahradníček, P. a Skalák, P. (2009): Data quality control and homogenization of air temperature and precipitation series in the area of the Czech Republic in the period 1961–2007. Advances in Science and Research, 3, 23–26, http://www.adv-sci-res.net/3/23/2009/

Projekt SustES - czechglobe

Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experimental Design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 485-498. http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Van der Linden P and Mitchell JFB (eds) (2009). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 p

Zahradníček P, Brázdil R, Štěpánek P, Řezníčková L. (2019): Differences in wind speeds according to measured and homogenized series in the Czech Republic, 1961–2015. Int J Climatol. 2019;39:235–250. https://doi.org/10.1002/joc.5800

Projekt SustES - Czechglobe