



MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA  
Univerzita Karlova

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zuzana Kluková

### **Analýza a zhodnocení skupinových simulací regionálních klimatických modelů v Evropě pro vybrané scénáře skleníkových plynů**

Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Tomáš Halenka, CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Meteorologie a klimatologie

Praha 2016

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 25. 7. 2016

Zuzana Kluková

**Název práce:** Analýza a zhodnocení skupinových simulací regionálních klimatických modelů v Evropě pro vybrané scénáře skleníkových plynů

**Autor:** Zuzana Kluková

**Katedra / Ústav:** Katedra fyziky atmosféry (115. • 32-KFA)

**Vedoucí bakalářské práce:** doc. RNDr. Tomáš Halenka, CSc., Katedra fyziky atmosféry

**Abstrakt:** Byla provedena analýza teploty a srážek pro historické i budoucí běhy regionálních klimatických modelů z aktivity Euro-CORDEX. Validace modelů byla provedena pro období 1989 – 2005 porovnáváním výsledků modelů s databází E-OBS reprezentující reálné hodnoty. Teploty se v tomto období s pozorováním poměrně dobře shodují, u srážek se shoda o poznání horší, přičemž typické je především jejich nadhodnocování. Budoucí vývoj, který je založen na experimentech se scénáři vývoje skleníkových plynů RCP4.5 a RCP8.5, byl sledován na obdobích 2021 – 2050 a 2071 – 2100 v porovnání s referenčním obdobím 1971 – 2000. U těchto výsledků je patrný přibližně lineární nárůst teplot, který je nejvýraznější na severovýchodě Evropy. Ohledně srážek modely predikují na severu přibývání a na jihu ubývání jejich průměrných úhrnů.

**Klíčová slova:** regionální klimatický model, klimatická změna, klimatické scénáře

**Title:** Analysis and assessment of ensemble simulations of regional climate models in Europe for selected scenarios of greenhouse gases

**Author:** Zuzana Kluková

**Department:** Department of Atmospheric Physics (115. • 32-KFA)

**Supervisor:** doc. RNDr. Tomáš Halenka, CSc., Department of Atmospheric Physics

**Abstract:** An analysis of the air temperature and precipitation for historical and future experiments of regional climate models from Euro-CORDEX activity is presented. A validation of models was performed for the time period 1989 – 2005 using the comparison of model results with E-OBS dataset which represents real values. For this period results show good agreement for temperature, much worse agreement appears for precipitation where their overestimation is more typical. The future evaluation based on the scenarios of greenhouse gases RCP4.5 and RCP8.5 was investigated for periods 2021 – 2050 and 2071 – 2100 in comparison with the period 1971 – 2000 as reference. For the simulations of the future climate we can notice an approximately linear increase of temperatures which is most significant in the northeast Europe. For precipitation models predict their increase in the north Europe and decrease in the south Europe.

**Keywords:** regional climate models, climate change, climate scenarios

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce doc. RNDr. Tomáši Halenkovi, CSc. za vypsání práce, užitečné konzultování a závěrečnou korekci její textové části. Velké díky patří také Mgr. Michalu Beldovi, Ph.D. za rady poskytované při technických potížích s datovými soubory a programy pro jejich zpracování. V neposlední řadě děkuji také všem členům katedry fyziky atmosféry za dlouhodobé poskytování mého vzdělání v oboru meteorologie a klimatologie a na závěr také rodině a kamarádům za nutnou podporu, bez které by se rovněž obejít nedalo.

## Obsah

<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Klimatické modely.....</b>	<b>2</b>
1. 1. Globální klimatické modely .....	2
1. 2. Regionální klimatické modely .....	3
1. 3. Klimatické scénáře .....	4
<b>2. Klimatická data .....</b>	<b>5</b>
2. 1. CMIP5 .....	5
2. 2. CORDEX .....	5
2. 2. 1. Domény CORDEX .....	6
2. 3. E-OBS .....	7
2. 4. Použité modely .....	8
<b>3. Metody zpracování dat .....</b>	<b>10</b>
3. 1. Taylorův diagram .....	12
3. 2. Kvantily .....	12
<b>4. Výsledky .....</b>	<b>13</b>
4. 1. Validace modelů v proměnné teplota.....	13
4. 1. 1. Analýza pomocí ročních chodů .....	13
4. 1. 2. Analýza pomocí plošných map.....	15
4. 1. 3. Analýza pomocí Taylorových diagramů .....	17
4. 2. Validace modelů v proměnné srážky .....	24
4. 2. 1. Analýza pomocí ročních chodů .....	24
4. 2. 2. Analýza pomocí plošných map.....	26
4. 2. 3. Analýza pomocí Taylorových diagramů .....	27
4. 3. Validace modelů – shrnutí .....	29
4. 4. Zhodnocení budoucího vývoje teplot pro soubor regionálních modelů..	34

4. 4. 1.	Zhodnocení pomocí ročních průměrů.....	34
4. 4. 2.	Zhodnocení pomocí sezónních průměrů.....	35
4. 4. 3.	Zhodnocení pomocí ročních chodů .....	39
4. 4. 4.	Zhodnocení pomocí plošných map.....	41
4. 5.	Zhodnocení budoucího vývoje srážek pro soubor regionálních modelů. 46	
4. 5. 1.	Zhodnocení pomocí ročních průměrů.....	46
4. 5. 2.	Zhodnocení pomocí sezónních průměrů.....	48
4. 5. 3.	Zhodnocení pomocí ročních chodů .....	51
4. 5. 4.	Zhodnocení pomocí plošných map.....	54
4. 6.	Zhodnocení budoucího vývoje teplot pro jednotlivé modely.....	59
4. 6. 1.	Zhodnocení pomocí ročních chodů .....	59
4. 6. 2.	Zhodnocení pomocí plošných map.....	62
4. 7.	Zhodnocení budoucího vývoje srážek pro jednotlivé modely .....	63
4. 7. 1.	Zhodnocení pomocí ročních chodů .....	63
4. 7. 2.	Zhodnocení pomocí plošných map.....	64
4. 8.	Zhodnocení budoucího vývoje pro jednotlivé modely – shrnutí.....	65
	<b>Závěr.....</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>73</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>75</b>
	<b>Seznam použitých zkratk.....</b>	<b>79</b>

## Úvod

V současné době jsou změny klimatu, jejich dopady na naše prostředí a z toho plynoucí nutnost reakce společnosti dle [1] jedním z hlavních témat environmentální politiky. Nyní už je prakticky jisté, že hlavní příčinou nastartování těchto změn byla činnost člověka (tedy především emise skleníkových plynů a dalších příměsí do atmosféry, dále eventuálně změny vlastností povrchu, zásahy do hydrologického režimu, apod.), a proto je také budoucí vývoj na přístupu lidí závislý.

Pochopitelně je nereálné zcela zastavit všechny činnosti, které klimatickou změnu podporují, ale jejich omezování již možné je. Především je ale potřeba vyvíjet nové technologie, které některé současné neekologické postupy nahradí jinými, pro klima příznivějšími, metodami.

Aby však bylo možné budoucí změny a jejich důsledky co nejlépe odhadnout, je vyvíjena řada klimatických modelů (globálních či regionálních dávajících možnost zkoumat větší detaily). Pro zdokonalování těchto modelů je třeba nejprve provést jejich validaci, při které se využívá porovnávání modelových výstupů pro současné klima s reálnými daty.

Cílem této diplomové práce je zhodnotit výstupy z regionálních klimatických modelů z aktivity Euro-CORDEX v historických i budoucích bězích a pro vybrané scénáře vývoje skleníkových plynů vytvořit na základě souboru těchto modelů odhad možných změn.

# 1. Klimatické modely

## 1.1. Globální klimatické modely

Obecně lze říci, že klimatické modely používáme pro výzkum klimatického systému. Do klimatického systému řadíme atmosféru, světový oceán, pevný zemský povrch, kryosféru a biosféru, které spolu interagují pomocí nejrůznějších fyzikálních, biologických i chemických procesů. Tyto procesy obecně nemusí být lineární a mohou mezi sebou vytvářet další nelineární zpětné vazby. Odezvu na určitou změnu proto nelze bez podrobnějšího zkoumání zcela přesně určit. Aby se dalo rozhodnout, jak závažné změny mohou být daným zásahem do klimatického systému vyvolány, vytvářejí se komplexní klimatické modely, ve kterých jsou všechny důležité procesy matematicky interpretovány.

Základním typem v současnosti nejpoužívanějších modelů jsou takzvané modely atmosféricko-oceánské cirkulace ([2], AOGCMs – *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*), které mezi sebou propojují modely všeobecné cirkulace atmosféry (AGCMs – *Atmospheric General Circulation Models*) a modely všeobecné oceánské cirkulace (OGCMs – *Ocean General Circulation Models*). Dnes používané klimatické modely začínají stále více zahrnovat interaktivně také vliv ostatních složek klimatického systému (zemský povrch, kryosféra, biosféra) a někdy proto hovoříme o tzv. modelech systému Země (ESM – *Earth System Models*).

Základem každého takového modelu je tzv. dynamické jádro, které reprezentuje základní fyzikální popis dynamiky a termodynamiky atmosféry. Patří sem pohybové rovnice, rovnice transportu vodní páry, eventuálně dalších atmosférických příměsí, a rovnice přeměn energie ve velkém měřítku.

Tento systém rovnic (nelineárních parciálních diferenciálních rovnic) nemá analytické řešení, a proto je třeba k jeho časové integraci použít vhodnou numerickou metodu. Vedle diferenčních metod, kde jsou tyto rovnice řešeny v bodech mřížky pro daný čas, přičemž jednotlivé body mřížky jsou v každém čase ovlivňovány sousedními body, je běžně používanou metodou (zvl. pro globální modely) spektrální přístup, při kterém jsou prostorové parciální derivace vyjádřeny analyticky a parciální diferenciální rovnice nahradí diferenciální rovnice obyčejné pro koeficienty spektrálních rozvojevů.



U globálních klimatických modelů (GCM – *Global Climate Model*) je dané numerické schéma aplikováno na celé kouli s horizontálním rozlišením několik stovek kilometrů (jednotky úhlových stupňů).

Fyzikální procesy, které není možné přesně formulovat, nebo které se odehrávají v měřítku menším, než je rozlišení modelu, ale mohou být pro chování klimatického systému důležité, jsou zahrnovány do rovnic pomocí parametrizací stanovovaných většinou semi-empirickým přístupem. Zejména je potřeba parametrizovat krátkovlnnou a dlouhovlnnou radiaci, procesy odehrávající se na zemském povrchu a v půdě, tvorbu oblačnosti a srážek velkého měřítko a samostatně také konvekci a s ní spojené srážky.

## 1. 2. Regionální klimatické modely

GCM nám mohou poskytnout informace, jak se bude klima na Zemi měnit jako celek, respektive zatím pouze v kontinentálním měřítku. Větší regionální či lokální detaily ovšem dokážou zachytit až regionální klimatické modely (RCM – *Regional Climate Models*) s větší rozlišovací schopností (50 x 50 km a lepší, dnes běžně až 10 km, se současným vývojem zahrnutí nehydrostatického přístupu s rozlišením jednotek km). Největším přínosem RCM oproti GCM je přesnější modelování výskytu silných srážek [3], které vznikají při mohutné konvekci. Ta bývá nejsilnější v oblastech s členitou orografií a pro její správné postihnutí je větší rozlišení modelů nezbytné.

I tak ale existuje spousta procesů, které probíhají na ještě menších škálách, než je rozlišení RCM (například formování kupovité oblačnosti), nebo by jejich exaktní řešení bylo neúměrně náročné (mikrofyzika oblačnosti, radiační transfer), a parametrizační schémata jsou proto zapotřebí i u RCM.

Technika pro vývoje a aplikace RCM je metoda zvaná dynamický *downscaling* ([4], metoda zmenšování měřítko, tj. zvýšení rozlišení), který pracuje na základě matematicko-fyzikálně založených modelů. Jedná se tedy o vnoření modelů na stejném principu, jako se postupuje u předpovědi počasí. Existuje ještě i statistický *downscaling*, konkrétně je používán empirický statistický *downscaling* (ESD – *Empirical-Statistical Downscaling*), což je metoda založená na vytváření vztahů mezi lokálními klimatickými proměnnými a velkoprostorovými klimatickými podmínkami.

Vzhledem k tomu, že je oblast RCM omezená, musí být její hranice řízeny časově závislými poli většího měřítka. Tato pole jsou stanovována pro testovací a validační simulace analýzou pozorovaných dat (pomocí tzv. re-analýzy), tedy tzv. perfektními okrajovými podmínkami, nebo z časových integrací GCM.

### **1. 3. Klimatické scénáře**

Kromě přírodních faktorů má na vývoj klimatu vliv také přítomnost antropogenních emisí různých příměsí, které vedou např. ke zvyšování koncentrace skleníkových plynů. Velikost změn těchto koncentrací závisí na budoucím socioekonomickém a technickém vývoji. Z toho důvodu je třeba vytvářet řadu scénářů vývoje obsahu skleníkových plynů, které pokryjí celý možný rozsah budoucích antropogenních emisí.

Klimatický scénář je průběh pravděpodobného vývoje klimatu za určitých podmínek [4]. Slouží pro odhad potenciálních důsledků antropogenních vlivů na klima.

Hlavními kroky potřebnými k vytvoření klimatického scénáře jsou: vytvoření emisního scénáře, odhad koncentrací, aplikace GCM, aplikace RCM, analýza výsledků a následná analýza důsledků (například záplavy, vliv na úrodu atd.). Pro odhad koncentrací se využívají modely uhlíkového cyklu a atmosférické chemie, kterým jako vstup slouží emisní scénáře.

## 2. Klimatická data

### 2.1. CMIP5

Projekt CMIP5 ([5], *Climate Model Intercomparison Project*) vznikl v září 2008 pod záštitou skupiny WGCM (*Working Group on Coupled Modeling*) pod organizací WCRP (*World Climate Research Program*). Jedná se o skupinu globálních klimatických modelů, které zahrnují jak historické, tak budoucí běhy.

Budoucí běhy jsou vytvářeny na základě tzv. reprezentativních směrů vývoje koncentrací (RCPs – *representative concentration pathways*). Jedná se o odhad zvýšení radiačního působení od předindustriální doby do roku 2100. Nejvyužívanější jsou 4 směry se stabilizačními hladinami 2,6, 4,5, 6 a 8,5 Wm<sup>-2</sup> (značí se RCP2.6, RCP4.5, RCP6 a RCP8.5). RCP2.6 předpokládá emisní scénář, kdy jsou koncentrace látek podporujících skleníkový efekt zpočátku zvyšovány, ale zhruba v polovině 21. století začnou klesat.

### 2.2. CORDEX

CORDEX ([6], *the Coordinated Regional climate Downscaling Experiment*) je rámcová aktivita WCRP (*World Climate Research Program*) pro vývoj a koordinaci regionálního klimatického *downscalingu* a použití RCM pro hlavní oblasti zájmu (kontinenty) za účelem vytváření podrobných studií důsledků klimatické změny. Cílem je vyplnit mezeru mezi samotným modelováním klimatu a využitím jeho výsledků konečnými uživateli.

Podle standardního CORDEX protokolu by měly všechny simulace zahrnovat období 1951 – 2100. Pro zpracování lze využít např. rozdělení na třicetileté úseky: 1981 – 2010, 2011 – 2040, 2041 – 2070, 2071 – 2100, 1951 – 1980. První z těchto úseků představuje referenční období pro vyhodnocení klimatických změn.

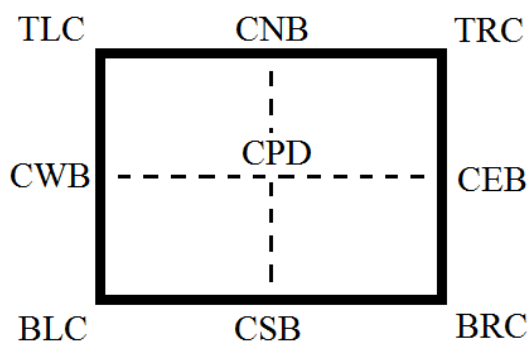
Okrajové podmínky modelů v rámci aktivity CORDEX jsou řízeny buď poli ze simulací vybraných modelů CMIP5, nebo jsou stanoveny pomocí re-analýzy dat z pozorování. Modely vypočtené na základě re-analýz mohou sloužit ke zhodnocení chování samotného RCM bez přenosu chyb z GCM. Takové postupy se v anglické literatuře nazývají *perfect boundary conditions experiments*. CORDEX využívá ECMWF (*the European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) ERA-Interim re-analýzy, které pokrývají období 1979 – 2008.

Simulace budoucího vývoje klimatu z aktivity CORDEX jsou stejně jako u CMIP5 založeny na RCPs.

### 2. 2. 1. Domény CORDEX

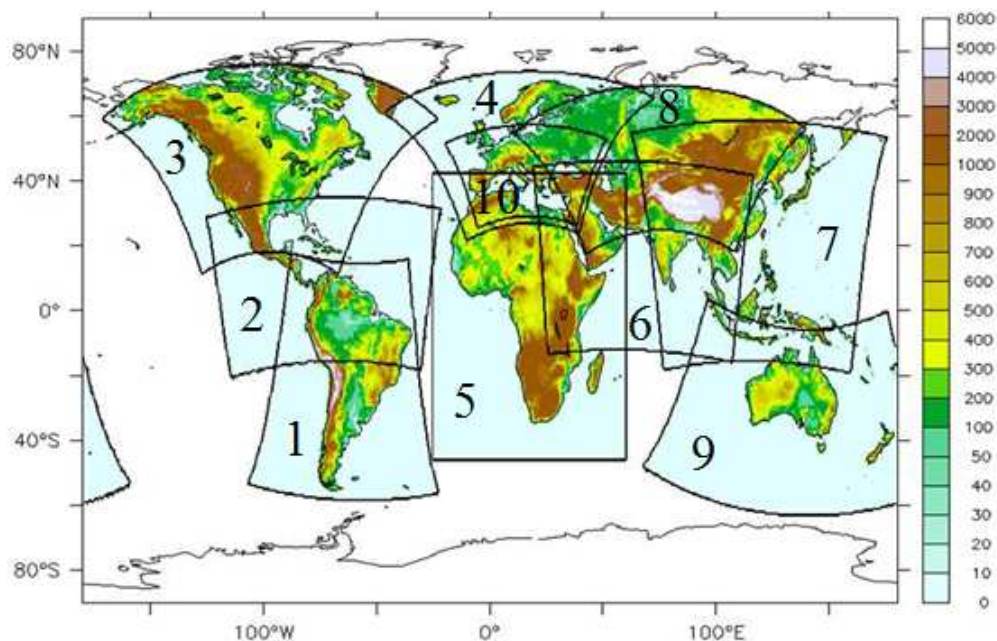
RCM v rámci CORDEX jsou vyvíjeny či aplikovány v jednotlivých regionech (doménách). Regiony jsou definovány [7] pomocí následujících parametrů (viz Obr. 1):

- a) Souřadnicové systémy s rotovaným pólem: souřadnice rotovaného pólu (RotPole) a levého horního rohu (TLC), počet bodů mřížky v západových směru ( $N_x$ ) a v severovýchodním směru ( $N_y$ ).
- b) Souřadnicové systémy s nerotovaným pólem: souřadnice levého horního rohu (TLC), středního bodu horní hranice (CNB), pravého horního rohu (TRC); středního bodu východní hranice (CEB), středního bodu celé domény (CPD), středního bodu západní hranice (CWB); levého dolního rohu (BLC), středního bodu dolní hranice (CSB) a pravého dolního rohu (BRC).



Obr. 1: Parametry pro popis domény

CORDEX zahrnuje následujících 13 domén (viz. Obr. 2): Jižní Amerika (1), Střední Amerika (2), Severní Amerika (3), Evropa (4), Afrika (5), Jižní Asie (6), Východní Asie (7), Střední Asie (8), Australasie (9), Antarktida, Arktida, Středozezemská doména (10), MENA doména. Pro každou z těchto domén jsou stanoveny parametry definující minimální oblast, kterou musí příslušné simulace pokrýt (vyjma relaxační zóny numerického napojení řešení), aby byly akceptovány pro hromadné zpracování pro danou oblast.



Obr. 2: Domény CORDEX

Tato práce se bude zabývat modely z evropské domény (dále nazývané jako Euro-CORDEX). Její minimální parametry dle [7] jsou shrnuty v Tab. 1.

<b>rotované souřadnice</b>	RotPole	(198,00; 39,25)
	TLC	(331,79; 21,67)
	Nx	106
	Ny	103
<b>nerotované souřadnice</b>	TLC	(315,86; 60,21)
	CNB	(1,92; 71,84)
	TRC	(64,40; 66,65)
	CWB	(338,23; 42,36)
	CPD	(9,75; 49,68)
	CEB	(44,77; 46,72)
	BLC	(350,01; 22,20)
	CSB	(12,48; 27,34)
BRC	(36,30; 25,36)	

Tab. 1: Definice domény Evropa v rámci CORDEX

### 2.3. E-OBS

Soubor dat E-OBS [8] je mřížková verze pozorovaných staničních dat ECA&D (*the European Climate Assessment & Dataset project*, založeno v roce 1998) udávající srážky, tlak při hladině moře, minimální, průměrné a maximální teploty.

Databáze E-OBS vznikla původně jako evropská gridovaná data k validaci regionálních klimatických modelů [9] v projektu ENSEMBLES. Nabízí rozlišení 0,25 a 0,5 stupňů pravidelné sítě a 0,22 a 0,44 stupňů mřížky s rotovaným pólem. Takto pokrývá plochu 25N-75N x 40W-75E.

## 2.4. Použité modely

Pro analýzu budoucího vývoje klimatu byly vybrány scénáře RCP4.5 a RCP8.5 z Euro-CORDEXu s rozlišeními 12,5 a 50 km (0,11 a 0,44 stupňů u modelů s rotovanými souřadnicemi). Přehled těchto modelů [10] je uveden v Tab. 2 a seznam parametrizačních schémat pro většinu z nich v Tab. 3 a Tab. 4. Pro zhodnocení vlivu řídicího modelu byly analyzovány také globální modely z projektu CMIP5 a pro období 1989 – 2005 i modely z ERA-interim re-analýzy.

Dále budou modely označovány zkratkou složenou z názvu instituce, rozlišení a řídicího modelu (např. SMHI.11.CNRM-CM5). V případě řízení re-analýzou bude místo názvu konkrétního GCM použito slovo ERA (např. SMHI.11.ERA).

Instituce	Stát	Název modelu	Řídicí model	Rozlišení 0,11	Rozlišení 0,44
CNRM	Francie	ALADIN53	CNRM-CM5	ANO	ANO
DMI	Dánsko	HIRHAM5	EC-EARTH	ANO	ANO
CUNI	Česká republika	RegCM4-2	CNRM-CM5	NE	ANO
IPSL-INERIS	Francie	WRF331F	IPSL-CM5A-MR	NE	ANO
KNMI	Nizozemí	RACMO22E	EC-EARTH	ANO	ANO
KNMI	Nizozemí	RACMO22E	HadGEM2-ES	NE	ANO
MPI-CSC	Německo	REMO2009	MPI-ESM-LR	ANO	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	CanESM2	NE	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	CNRM-CM5	ANO	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	EC-EARTH	ANO	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	GFDL-ESM2M	NE	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	HadGEM2-ES	ANO	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	IPSL-CM5A-MR	NE	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	MIROC5	NE	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	MPI-ESM-LR	NE	ANO
SMHI	Švédsko	RCA4	NorESM1-M	NE	ANO

Tab. 2: Modely z Euro-CORDEXu použité pro analýzu

Název modelu	Radiace	Konvekce	Mikrofyzika
RegCM4-2	Kiehl et al. (1996)	Grell (1993)	Pal et al. (2000)
WRF331F	RRTMG Lacono et al. (2008)	Grell and Devenyi (2002)	Hong et al. (2004)
RACMO22E	Fouquart and Bonnel (1980), Mlawer et al. (1997)	Tiedtke (1989), Nordeng (1994), Neggers et al. (2009)	Tiedtke (1993), Tompkins et al. (2007), ECMWF-IFS, Neggers (2009)
REMO2009	Morcrette et al. (1986), Giorgetta and Wild (1995)	Tiedtke (1989), Nordeng (1994), Pfeifer (2006)	Lohmann and Roeckner (1996)
RCA4	Savijarvi (1990), Sass et al. (1994)	Kain and Fritsch (1990, 1993)	Rasch and Kristjansson (1998)

Tab. 3: Parametrizační schémata použitých modelů z Euro-CORDEXu

Název modelu	Povrch	Mezní vrstva	Inicializace půdy	Využití krajiny
RegCM4-2	Dickinson et al. (1993)	Holtslag et al. (1990) with realistic emissivity	Giorgi and Bates (1989)	USGS
WRF331F	NOAH Ek et al. (2003)	YSU (Hong et al. 2006)	ERAInterim. No spin up	USGS
RACMO22E	Van den Hurk et al. (2000), Balsamo et al. (2009)	Lenderink and Holtslag (2004), Siebesma et al. (2007)	ERAInterim on 1979010100	ECOCLIMAP
REMO2009	Hagemann (2002), Rechid et al. (2009)	Louis (1979)	ERAInterim. No spin up	USGS
RCA4	Samuelsson et al. (2006)	Cuxart et al. (2000)	ERAInterim on 1979010100	ECOCLIMAP

Tab. 4: Parametrizační schémata použitých modelů z Euro-CORDEXu, 2. část

### 3. Metody zpracování dat

Práce se zaměřuje na analýzu dvou základních klimatických parametrů – srážek a teploty. Validace modelů je prováděna na období 1989 – 2005 a budoucí běhy jsou vyhodnocovány v obdobích 2021 – 2050 (blízká budoucnost) a 2071 – 2100 (daleká budoucnost) v porovnání s referenčním obdobím 1971 – 2000.

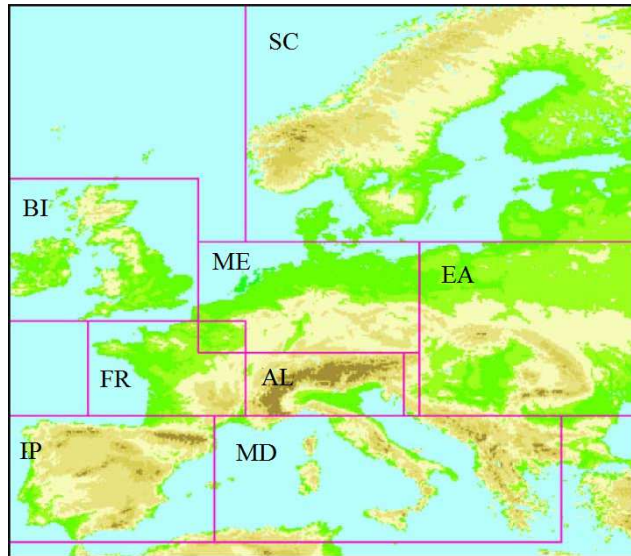
Z datových řad jsou sestavovány měsíční a sezónní průměry a to buď přes všechny roky, nebo pro každý rok zvlášť. Sezónami se rozumí jaro (měsíce březen, duben, květen), léto (červen, červenec, srpen), podzim (září, říjen, listopad) a zima (prosinec, leden, únor). Pro vyhodnocení budoucích změn jsou použity kromě měsíčních a sezónních průměrů také průměry roční pro celé období 2006 – 2100.

Pro podrobnější vyhodnocení modelů je použito rozdělení oblasti Euro-CORDEX na další regiony. Osm regionů se shoduje s regiony zavedenými v rámci projektu PRUDENCE [11] a další tři jsou definovány teleskopicky od oblastí celé Evropy, přes oblast střední Evropy použitou k simulacím a analýzám změny klimatu na KMOP MFF UK v projektu CECILIA, tedy s možností následného srovnání, k nejmenší oblasti pokrývající Českou republiku, kde lze analyzovat lokální detaily. Definice všech regionů jsou uvedeny v Tab. 5 a PRUDENCE regiony jsou navíc znázorněny na Obr. 3.

	Oblast	Zkratka	LP	PP	DR	HR
<b>oblasti dle PRUDENCE</b>	Alpy	AL	5	15	44	48
	Britské ostrovy	BI	-10	2	50	59
	Východní Evropa	EA	16	30	44	55
	Francie	FR	-5	5	44	50
	Pyrenejský poloostrov	IP	-10	3	36	44
	Středomoří	MD	3	25	36	44
	Střední Evropa	ME	2	16	48	55
	Skandinávie	SC	5	30	55	70
<b>oblasti stanovené teleskopicky</b>	Evropa	EU	-40	75	25	75
	Střední Evropa	CE	7	23	45	55
	Česká republika	CR	12	19	48,5	51

Tab. 5: Definice regionů pro analýzy. LP: levý poledník, PP: pravý poledník, DR: dolní rovnoběžka, HR: horní rovnoběžka





Obr. 3: Regiony dle PRUDENCE

Modelová data jsou s pozorováním (E-OBS) srovnávána několika metodami: grafickým porovnáváním ročních chodů sledované veličiny pro daný model a E-OBS, sledováním ročních chodů odchylek modelových hodnot a pozorování, analyzováním plošných map rozdílů charakteristik a vyhodnocováním korelace, rozptylu a směrodatné odchylky mezi časovými řadami měsíčních průměrů modelu a pozorování pomocí Taylorových diagramů (viz kapitola 3. 1). U ročních chodů je pro rozhodnutí o statistické významnosti v grafech vyznačen také první a devátý decil (viz kapitola 3. 2) ze souboru měsíčních průměrů pro jednotlivé roky.

Pro možnost porovnání odchylek modelu od pozorování pro teploty i srážky zároveň, jsou tvořeny jisté křížové grafy, u kterých jsou hodnoty průměrných sezónních teplot (případně jejich odchylek od pozorování) vynášeny na osu x a hodnoty průměrných sezónních srážek (případně jejich odchylek od pozorování) na osu y pro jednotlivé modely i pro data z E-OBS.

U hodnocení budoucích běhů modelů jsou využívány obdobné metody jako u validace modelů s tím rozdílem, že jako reference slouží namísto E-OBS hodnoty z historických běhů za období 1971 – 2000. V případě vyhodnocování změn pro skupinu modelů je také v ročních chodech charakteristik vyznačen první a devátý decil ze souboru hodnot vypočtených z jednotlivých modelů.

Vysvětleme ale ještě podrobněji Taylorův diagram a kvantily.

### 3. 1. Taylorův diagram

Taylorův diagram [12] vychází ze vztahu mezi střední kvadratickou chybou mezi dvěma soubory dat  $E'^2$ , jejich rozptylem  $\sigma^2$  a vzájemnou korelací  $R$ , který je popsán rovnicí (1), kde index  $f$  značí model a  $r$  pozorování. Korelace a rozptyl jsou tedy zdrojem kvadratické chyby.

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R \quad (1)$$

Prakticky lze využít jeho grafické interpretace s použitím kosinové věty jako dvourozměrné grafické vyjádření toho, jak dobře se model shoduje s pozorováním. Shoda mezi dvěma datovými soubory je tak definována pomocí jejich korelace, centrovaného rozdílu efektivních hodnot (RMS – *root mean square*) a rozdílu směrodatných odchylek (rozptylů). Data z pozorování jsou vynesena jako bod (O) na osu x podle hodnoty směrodatné odchylky. Modely se vynášejí rovněž jako bod (A) a to následovně: Korelace modelových dat s pozorovanými se vynášejí jako úhel (modely s korelací 0 leží na ose y, s korelací 1 na ose x). Rozdíl RMS modelu a RMS pozorování je úměrný vzdálenosti bodů A a O a směrodatná odchylka je úměrná vzdálenosti bodu A od počátku.

### 3. 2. Kvantily

Kvantily [13] jsou hodnoty, které rozdělují soubor seřazených hodnot na několik stejně velkých částí.  $p$ -kvantil  $Q_p$  ( $p \in [0,1]$ ) je taková hodnota, že  $N \cdot p$  hodnot z celkových  $N$  je menších nebo rovných číslu  $Q_p$ :

$$P(X \leq Q_p) = p \quad (2)$$

Pro některé významné hodnoty jsou kvantily označovány speciálními jmény:

- a) Medián  $Q_{0,5}$  je kvantil, který rozděluje statistický soubor na poloviny.
- b) Dolní kvartil  $Q_{0,25}$  a horní kvartil  $Q_{0,75}$  společně s mediánem rozdělují soubor na čtyři stejně velké části. 25 % hodnot je menších než dolní kvartil a 75 % hodnot je menších než horní kvartil.
- c)  $k$ -tý decil  $Q_{k/10}$  ( $k \in \{1, 2, \dots, 9\}$ ) je kvantil, u kterého je  $k \cdot 10$  % hodnot menších než jeho hodnota. Dohromady decily rozdělují statistický soubor na desetiny.

## 4. Výsledky

### 4.1. Validace modelů v proměnné teplota

#### 4.1.1. Analýza pomoci ročních chodů

Roční chody teplot průměrované za období 1989 – 2005 pro oblasti definované v Tab. 5 jsou pro každý model vykresleny v příloze A na příloženém CD. v podobě sloupců s vyznačeným prvním a devátým decilem podle jednotlivých let.

Shoda modelů s pozorováním se dá celkově považovat za velmi dobrou díky zřetelnému ročnímu chodu teplot ve všech oblastech (maximum v červenci, minimum v lednu). Jak by se dalo očekávat, je shoda modelů s pozorováním obecně lepší, jsou-li modely řízeny re-analýzou, než pokud jsou řízeny modely globálními. Samotné GCM pak vykazují shodu přibližně stejně dobrou jako RCM, které jsou jimi řízeny (z tohoto hlediska není patrný výrazný přínos RCM oproti GCM).

Vliv rozlišení na podobnost modelových hodnot teplot s pozorováním rovněž příliš jednoznačný není. Většinou ale platí, že je-li model řízený re-analýzou s vyšším rozlišením teplejší (respektive chladnější) než stejný model s nižším rozlišením, je také model od stejné instituce řízený globálním modelem s vyšším rozlišením teplejší (respektive chladnější) než totožný model s rozlišením nižším.

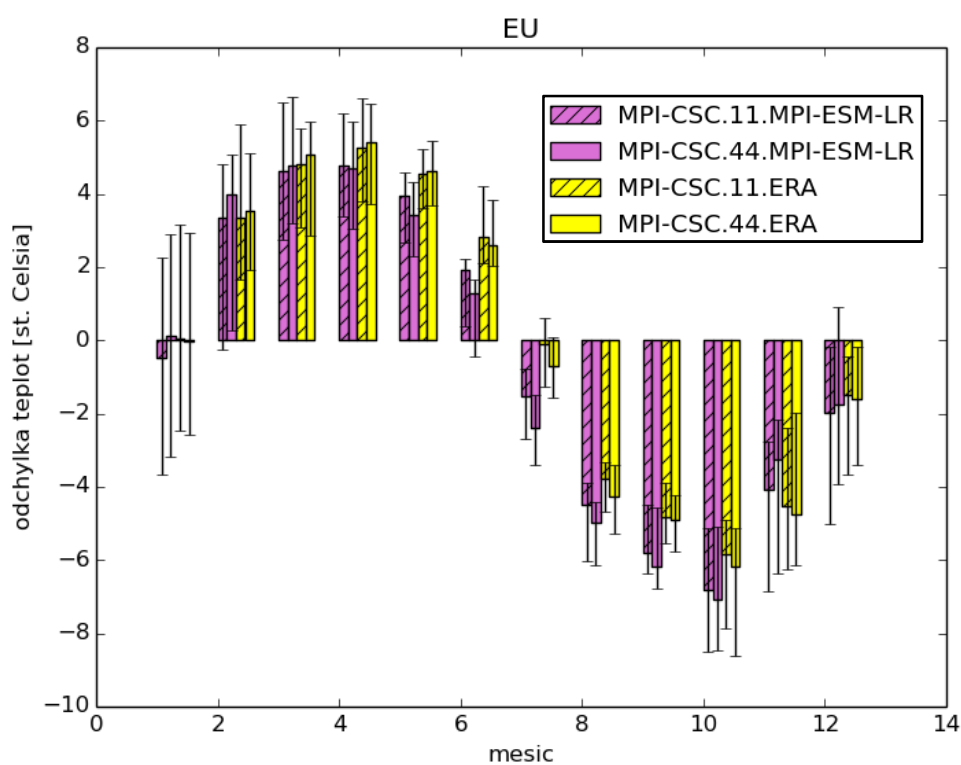
Kromě ročního chodu absolutních teplot je také zajímavý roční chod odchylek průměrných měsíčních teplot modelů od pozorování, který je u jednotlivých modelů různý. Veškeré grafy jsou umístěny v příloze B na jednotce CD.

Zaměříme se nejprve na globální klimatické modely, neboť chod odchylek regionálních modelů od pozorování až na výjimky kopíruje chod odchylek globálních modelů, kterými jsou řízeny.

Modely CanESM2, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR teploty nejvíce podhodnocují (model je chladnější než pozorování) na jaře a na podzim a nadhodnocují nebo jen lehce podhodnocují v létě. Podobný trend odchylek je patrný u modelů HadGEM2-ES a MIROC5, které mají zápornější odchylky v zimě a kladnější v létě. Modely EC-EARTH, MPI-ESM-LR NorESM1-M mají naopak tendenci k největšímu podhodnocování teplot v létě a nejmenšímu v zimě. Model GFDL-ESM2M teploty většinou nejvíce nadhodnocuje v zimním období (zejména v prosinci), v ostatních měsících má teploty obecně nižší než pozorování, ale míra tohoto podhodnocení je v různých oblastech různá.

Roční chod odchylek regionálního modelu zásadně se neshodující s chodem odchylek příslušného globálního modelu pozorujeme pouze u modelů instituce MPI-CSC. Tyto modely vykazují kladné odchylky na jaře a záporné na podzim, zatímco v létě a v zimě jsou odchylky od pozorování minimální (viz Obr. 4). Tento chod je patrný ve všech analyzovaných oblastech a vyskytuje se i u modelu řízeného re-analýzou, čímž lze vyloučit vliv globálního modelu na tento fakt.

Možným vysvětlením tohoto ročního chodu odchylek u modelů instituce MPI-CSC je chybná parametrizace transferu do půdy. V zimě je teplo z půdy většinou transportováno směrem vzhůru a přetrvává-li v parametrizaci tento transport až do jara, bude model jaro nadhodnocovat. Obdobně v létě převládá transport tepla půdou směrem dolů a prodloužení jeho trvání má za následek podhodnocení podzimních teplot.



Obr. 4: Roční chody odchylek průměrných měsíčních teplot za období 1989 – 2005 mezi regionálními modely od instituce MPI-CSC a E-OBS pro oblast EU

#### 4. 1. 2. Analýza pomocí plošných map

Plošné mapy teplotních rozdílů modelu a pozorování pro sezónní průměry za období 1989 – 2005 jsou pro jednotlivé globální a regionální modely (včetně RCM řízených re-analýzou) umístěny v příloze C na přiloženém CD. Tyto mapy nám mohou oproti plošně průměrovaným ročním chodům poskytnout detailnější informaci o prostorovém rozložení odchylek mezi modelovými a pozorovanými teplotami.

U globálních klimatických modelů obecně pozorujeme nadhodnocování teplot na jihu Evropy a podhodnocování na jejím severu. Tento rozdíl mezi severem a jihem je nejlépe vidět v zimním období.

Celkově však mají GCM největší tendenci k nadhodnocování teplot v létě, přičemž největší kladné odchylky od pozorování vykazují modely CanESM2 a MIROC5. Nejmenší odchylky modelových teplot od reálných jsou u GCM na jaře a na podzim.

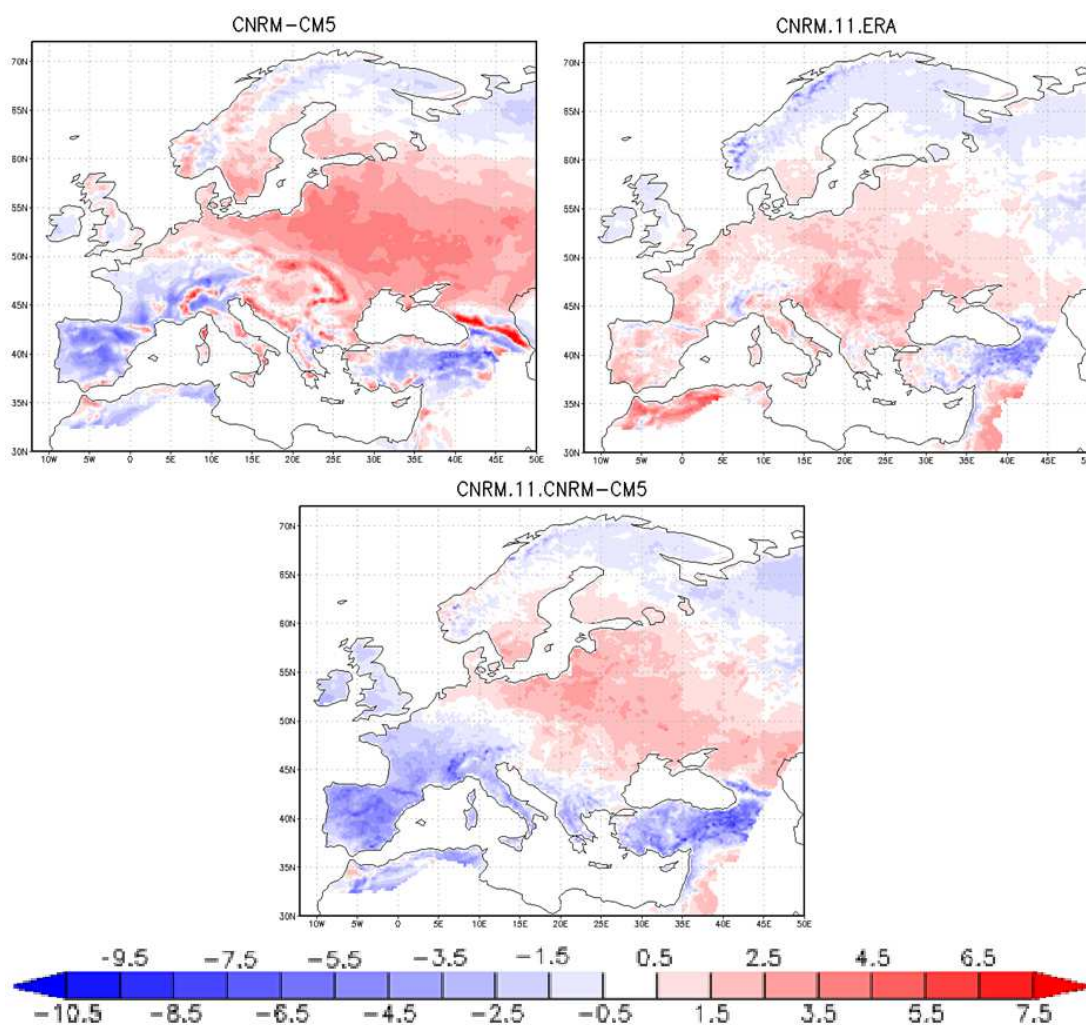
U globálních klimatických modelů si můžeme na plošných mapách povšimnout také relativně větších kladných odchylek v horských oblastech. Ty vznikají v důsledku menšího rozlišení modelů, ve kterém je shlazená orografie (už neobsahuje tak velké nadmořské výšky), což pochopitelně vede k vyšším teplotám v modelu.

Nyní se zaměříme na regionální klimatické modely řízené re-analýzou. Stejně jako u globálních modelů u nich pozorujeme větší tendenci k nadhodnocování teplot v jižních oblastech a k podhodnocování v severních. Viditelně opačné prostorové rozložení odchylek je pouze u modelu instituce CNRM v zimní sezóně.

Celkově se modely řízené re-analýzou velmi dobře shodují s daty z E-OBS, přičemž nejmenší odchylky vznikají na podzim. Nejvýraznější odchylky (většinou záporné) naproti tomu najdeme na jaře.

Podobnou tendenci k nadhodnocování či podhodnocování, jakou nalezneme u modelů řízených ERA-Interim re-analýzou, mají také regionální klimatické modely řízené modely globálními. U sezóny podzim obecně nalezneme poměrně malé odchylky modelu od pozorování, zatímco na jaře je u velkého množství modelů patrné značné podhodnocení teplot. Toto podhodnocení je nejmenší u modelů DMI.11.EC-EARTH, DMI.44.EC-EARTH, KNMI.44.HadGEM2-ES, SMHI.44.HadGEM2-ES, SMHI.44.CanESM2, SMHI.44.MPI-ESM-LR a SMHI.44.NorESM1-M.

V létě a v zimě lze u regionálních modelů řízených GCM pozorovat velkou prostorovou rozmanitost odchylek. Sever Evropy je oproti pozorování nejčastěji teplotně podhodnocený, jih nebo střed Evropy teplotně nadhodnocený. Rozložení těchto odchylek je u jednotlivých modelů značně podobné rozložení odchylek u globálních modelů, kterými jsou řízeny. Jako příklad je na Obr. 5 zobrazeno rozložení letních odchylek pro regionální model instituce CNRM řízený globálním modelem CNRM-CM5 i pro tentýž model řízený re-analýzou a samostatný globální model CNRM-CM5.



Obr. 5: Plošné mapy odchylek průměrných letních teplot za období 1989 – 2005 pro modely CNRM-CM5, CNRM.11.ERA, CNRM.11.CNRM-CM5

Předchozí závěry učiněné pro odchylky regionálních klimatických modelů se netýkají modelů instituce MPI-CSC. Stejně jako u analýzy pomocí ročních chodů (viz kapitola 4. 1. 1) pozorujeme i na plošných mapách nadhodnocování teplot v jarní sezóně a podhodnocování teplot na podzim, a to na území celé Evropy.

### 4. 1. 3. Analýza pomocí Taylorových diagramů

Taylorovy diagramy pro měsíční průměry teplot za období 1989 – 2005 pro oblasti definované v Tab. 5 jsou vykresleny na Obr. 6 pro celý rok a pro jednotlivé sezóny na Obr. 7 (jaro), Obr. 8 (léto), Obr. 9 (podzim) a Obr. 10 (zima). Tyto diagramy nám mohou objasnit, čím jsou způsobené odchylky teplot mezi modelem a pozorováním.

Korelace mezi modelovými a pozorovanými daty se u měsíčních průměrů bez členění na sezóny pohybují mezi 0,9 a 0,99. Důvodem takto vysokých korelací je relativně malá meziroční variabilita měsíčních teplot, srovnáme-li ji s celkovým ročním chodem teplot. Jedinou výjimkou jsou regionální modely instituce MPI-CSC, které mají korelace mezi 0,8 a 0,9 a jejich střední kvadratické odchylky od E-OBS jsou oproti ostatním modelům ve všech regionech výrazně vyšší.

Nejvyšší korelace obecně nalezneme u regionálních modelů řízených re-analýzou, což plně odpovídá očekávání. U globálních modelů a jimi řízených regionálních jsou hodnoty korelací srovnatelné.

Rozptyl modelových dat je u všech modelů rámcově podobný pozorovanému a proto se střední kvadratické chyby modelů při zahrnutí hodnot za všechny sezóny řídí zejména velikostí korelace. Nejodlišnější rozptyl (konkrétně větší) od pozorovaného mají globální modely HadGEM2-ES a MIROC5. Nicméně RCM řízené těmito dvěma modely mají rozptyl výrazně bližší rozptylu u dat z E-OBS a velké odchylky u nich proto nepozorujeme.

Podíváme-li se na Taylorovy diagramy pro jednotlivé sezóny, zjistíme pro jaro a podzim obdobné závěry jako pro celý rok. Pojďme se proto zaměřit pouze na léto a zimu.

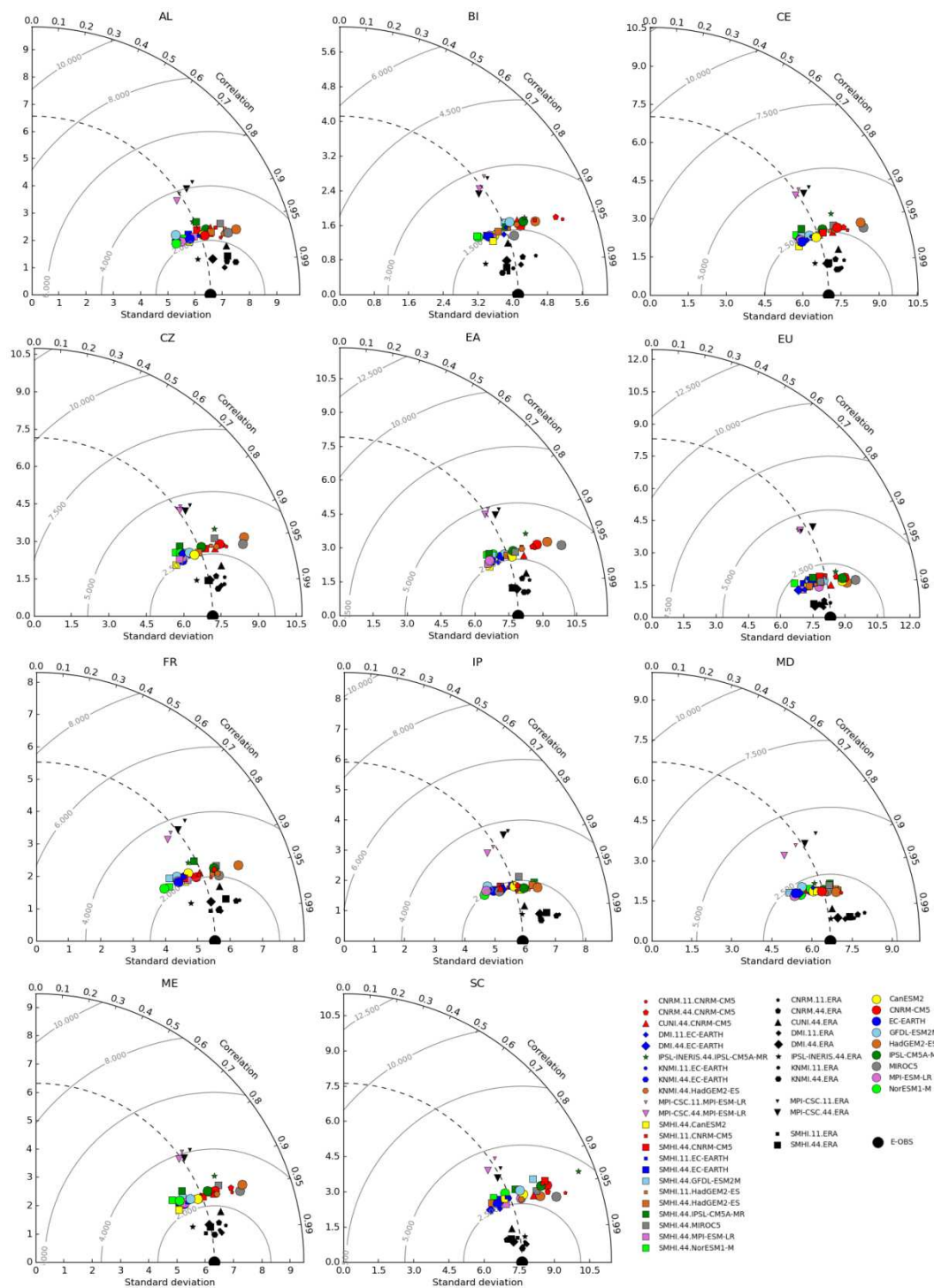
V létě se korelace modelů řízených re-analýzou pohybují nejčastěji mezi 0,7 a 0,8 a korelace GCM a RCM řízených GCM mezi 0,3 a 0,6 (vyšší jsou u oblastí IP, MD a EU). U některých, zejména globálních, modelů se ale dostávají i pod 0,2 a u těchto modelů nalezneme díky tomu velké střední kvadratické odchylky od pozorování. Konkrétně se jedná o globální modely CanESM2, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR a NorESM1-M.

U letních teplot už také najdeme relativně větší neshody v rozptylu modelových hodnot oproti pozorovaným. Především se jedná o RCM řízené globálním modelem IPSL-CM5A-MR a model SMHI.44.MIROC5, v oblastech IP a MD lze do této skupiny zařadit i RCM řízené modelem CNRM-CM5.

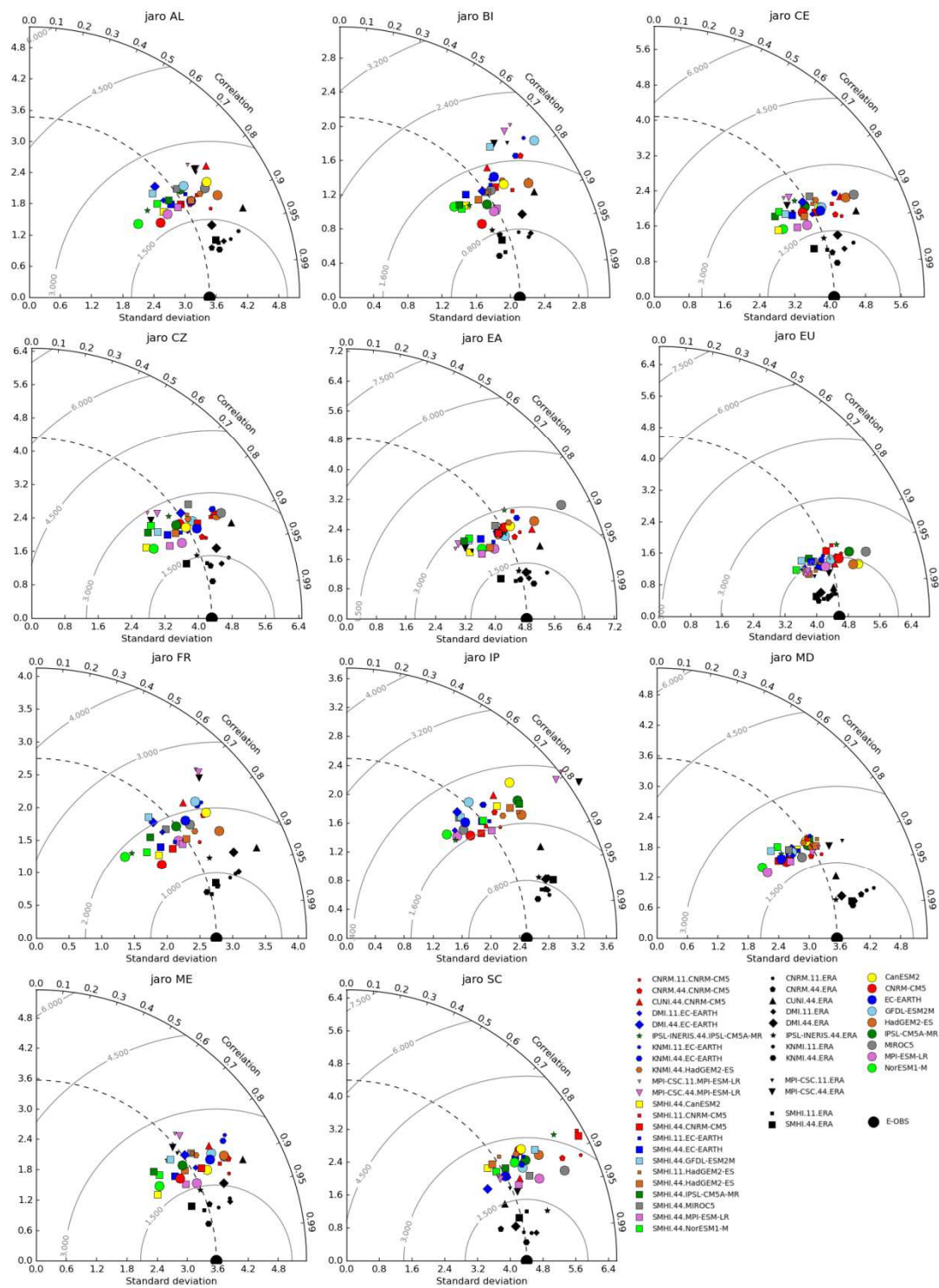
V zimní sezóně je oproti tomu rozptyl modelových hodnot relativně podobnější pozorovanému. Velmi nízké jsou ale korelace modelů a pozorování a celkovou chybu proto určují hlavně ony. U GCM a RCM řízených GCM většinou nepřekračují ani hodnotu 0,3.

Celkově na základě všech zobrazení hodnot v Taylorových diagramech pozorujeme jednoznačný vliv globálních klimatických modelů na regionální klimatické modely jimi řízené. Body náležící RCM řízeným jedním GCM (jsou vyznačeny stejnou barvou) často najdeme na Taylorově diagramu blízko sebe.

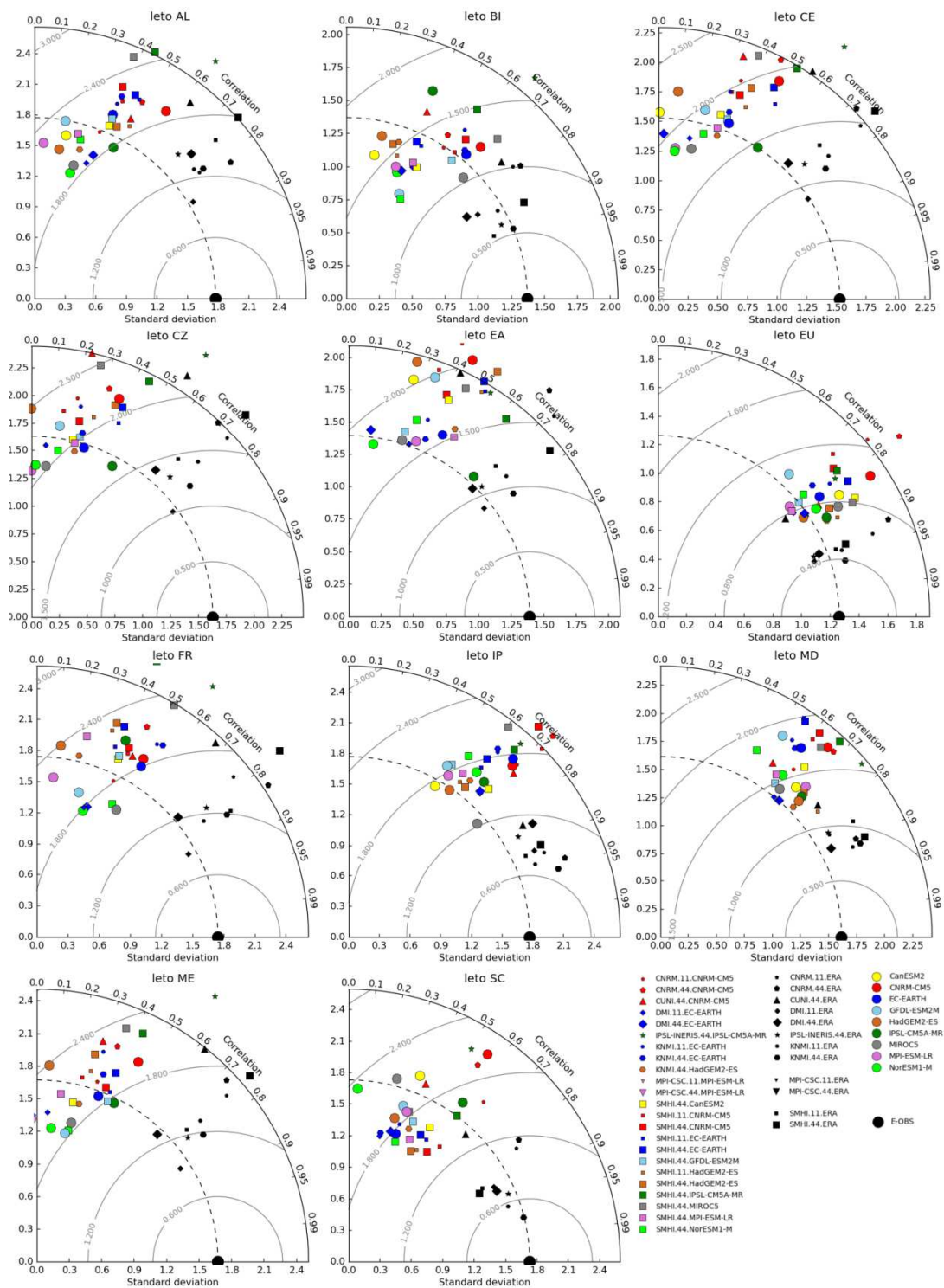




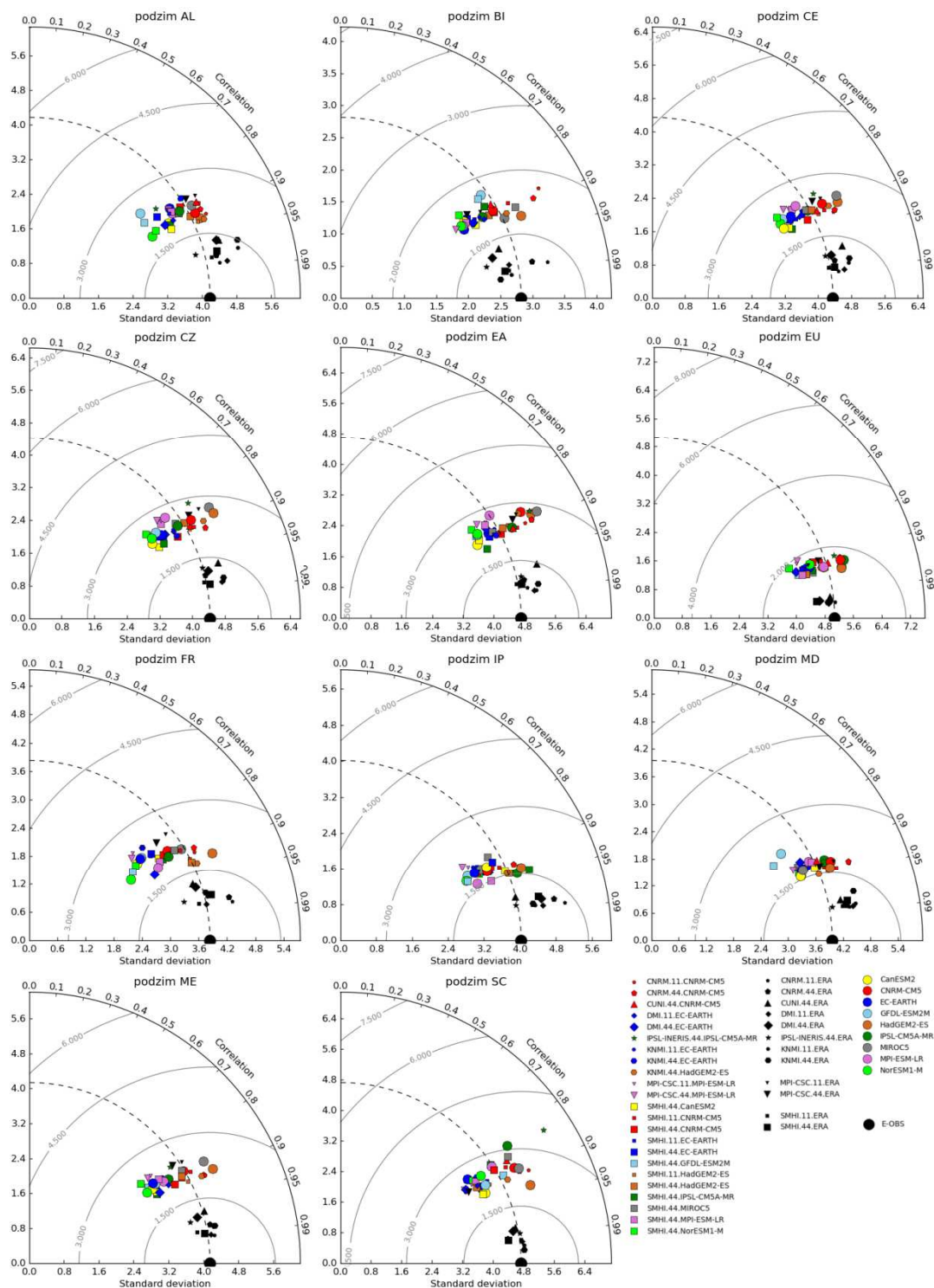
Obr. 6: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech v období 1989 – 2005



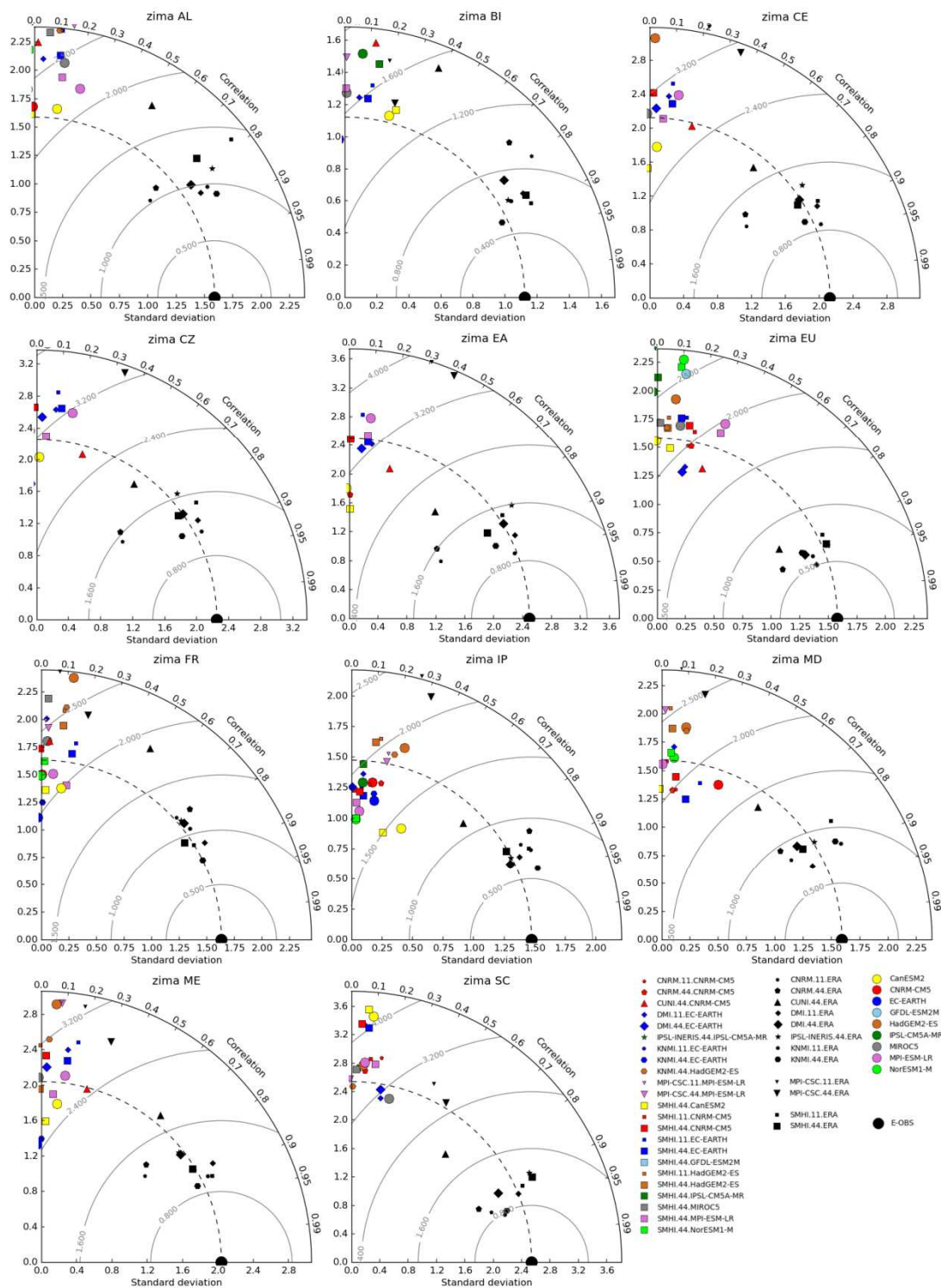
Obr. 7: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro jarní měsíce z období 1989 – 2005



Obr. 8: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro letní měsíce z období 1989 – 2005



Obr. 9: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro podzimní měsíce z období 1989 – 2005



Obr. 10: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro zimní měsíce z období 1989 – 2005

## 4. 2. Validace modelů v proměnné srážky

### 4. 2. 1. Analýza pomocí ročních chodů

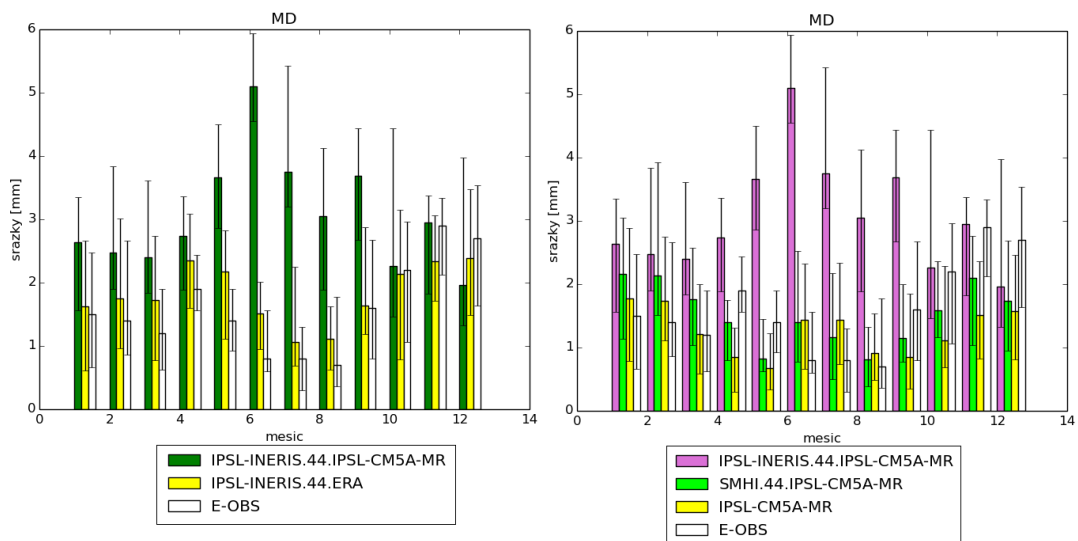
Roční chody srážek průměrované za období 1989 – 2005 pro oblasti definované v Tab. 5 jsou pro každý model vykresleny v příloze D na příloženém CD v podobě sloupců s vyznačeným prvním a devátým decilem podle jednotlivých let.

Obecně je shoda modelů s pozorováním u srážek výrazně horší, než tomu bylo u teplot. Srážky jsou na rozdíl od teplot nespojitou veličinou a závisí na mnoha faktorech, zatímco roční chod teploty je dán především ročním chodem množství dopadajícího slunečního záření.

Díky velké meziroční variabilitě není v některých oblastech příliš zřetelný roční chod ani u dat z E-OBS a modely jej o to hůře zachovávají (někdy dokonce vykazují chod zcela opačný). Nejlépe modely dokážou roční chod podchycovat v oblastech s letním maximem srážek (EA, CE, CZ, ME, SC).

Mezi GCM, které dobře reprezentují roční chod, patří EC-EARTH, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR a MPI-ESM-LR. Z regionálních modelů lze jako jedny z nejlepších označit modely od institucí CUNI, DMI, KNMI, MPI-CSC a SMHI.

Nejhorší reprezentace ročního chodu srážek je naproti tomu patrná u modelů IPSL-INERS.44.IPSL-CM5A-MR, CNRM.11.CNRM-CM5 a CNRM.44.CNRM-CM5, a to zejména v jižních oblastech (AL, FR, IP, MD), kde tyto modely extrémně nadhodnocují letní srážky. U modelu instituce IPSL-INNERIS se velké nadhodnocení objevuje také v květnu a červnu ve střední a východní Evropě (oblasti EA, ME, CE, CZ). Zajímavé ovšem je, že při řízení výše zmíněných modelů re-analýzou toto letní nadhodnocování patrně není a jak jsme již uvedli, globální model IPSL-CM5A-MR dokonce patří mezi ty, které roční chod srážek reprezentují velmi dobře (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**).



Obr. 11: Roční chody srážek průměrované za období 1989 – 2005 pro modely od instituce IPSL-INERIS, globální model IPSL-CM5A-MR a E-OBS

Zaměříme se nyní na samotné odchylky modelů od pozorování a jejich roční chod. Veškeré chody odchylek modelových a reálných srážek (vyjádřené relativně vůči pozorování) jsou vyobrazeny v příloze E na jednotce CD.

Celkově mají odchylky obrovskou meziroční variabilitu (vidíme z vyobrazeného prvního a devátého decilu z jednotlivých měsíců), která je nejmenší u RCM řízených re-analýzou. Obecně mají modely tendenci srážky oproti pozorování nadhodnocovat, přičemž největší nadhodnocování se často objevuje na jaře (zejména v severních regionech). Na jihu je u některých modelů vidět relativně velké nadhodnocování také v létě, kde je však velká odchylka způsobena tím, že je vztažena relativně k pozorování, u kterého jsou v těchto oblastech v létě srážky minimální.

U srážek je stejně jako u teplot dobře vidět vliv globálních modelů na modely regionální, které jsou jimi řízeny, neboť chody odchylek dvojice RCM – GCM si navzájem odpovídají. Výjimkou jsou pouze již zmiňované modely instituce IPSL-INERIS a CNRM.

#### 4. 2. 2. Analýza pomocí plošných map

Nyní se pomocí analýzy plošných map detailněji zaměříme na prostorové rozložení relativních odchylek průměrných sezónních srážek modelu a pozorování. Veškeré mapy těchto odchylek pro sezónní průměry za období 1989 – 2005 jsou pro jednotlivé globální a regionální modely (včetně RCM řízených re-analýzou) umístěny v příloze F na příloženém CD.

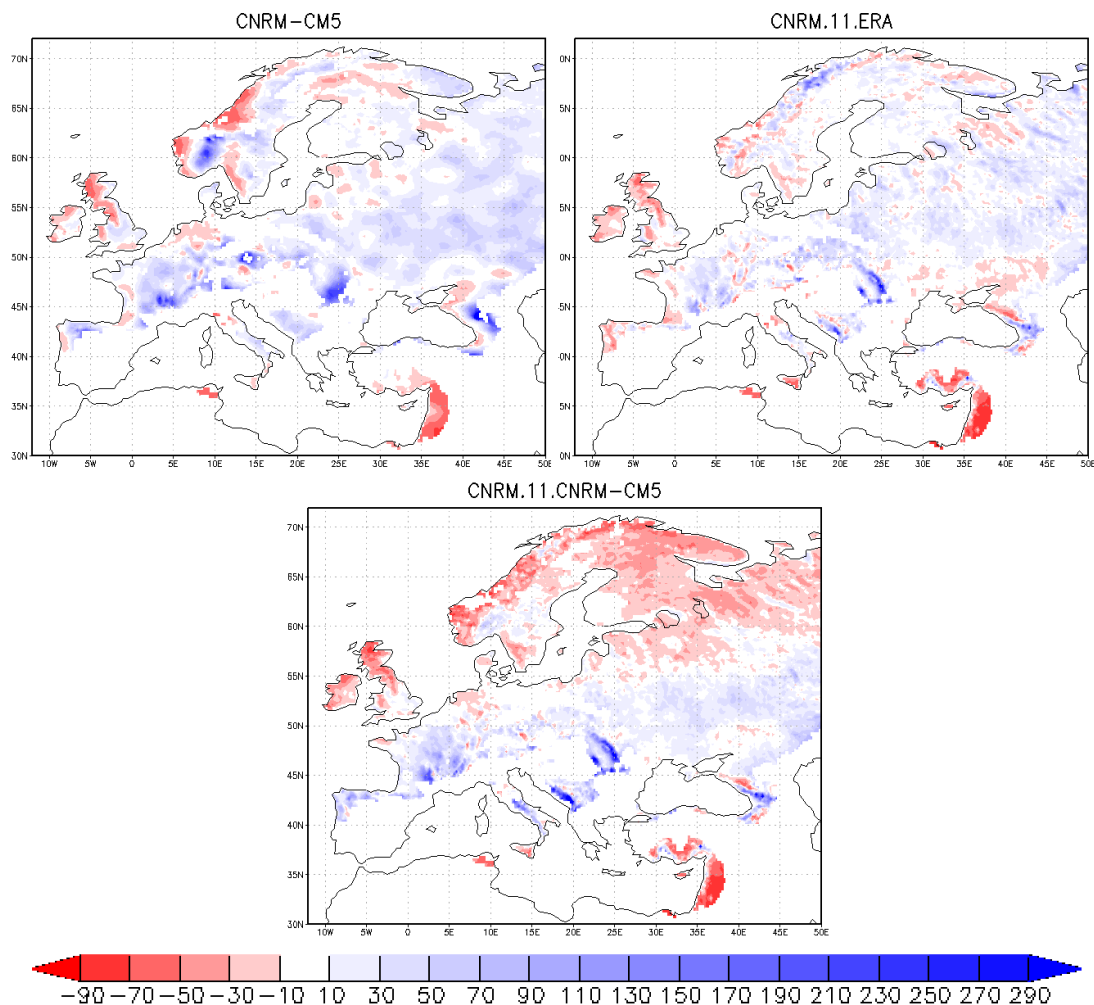
Obecně u většiny modelů pozorujeme velké nadhodnocování srážek v jarním období a relativně největší podhodnocování srážek oproti ostatním sezónám v létě (zejména u globálních modelů CanESM2 a CNRM-CM5). Na podzim jsou odchylky modelů od pozorování malé a v zimě mají modely tendenci srážky spíše mírně nadhodnocovat s výjimkou oblastí blízko pobřeží, kde jsou často naopak podhodnocené.

Globální modely jsou si celkově ve velikosti i prostorovém rozložení odchylek dosti podobné. Žádný z GCM proto nelze jednoznačně označit za nejlepší nebo nejhorší. U regionálních klimatických modelů řízených re-analýzou se naproti tomu jako nejlepší zcela jednoznačně jeví modely KNMI.11.ERA a KNMI.44.ERA, které ve všech sezónách vykazují minimální odchylky od pozorování na celé analyzované oblasti.

Modely od instituce KNMI se jeví jako velmi dobré v interpretaci srážek, i pokud jsou řízeny globálním modelem EC-EARTH. Především na jaře jsou u nich patrné velmi malé rozdíly od pozorování oproti ostatním RCM řízeným modely globálními.

Povšimněme si ještě chování modelů CNRM.11.CNRM-CM5, CNRM.44.CNRM-CM5 a IPSL-INNERIS.44.IPSL-CM5A-MR v zimě. U těchto modelů se objevuje v severozápadní části Evropy poměrně výrazné podhodnocování srážek, které není až v takové míře patrné ani u příslušných globálních modelů (CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR) ani u týchž modelů řízených re-analýzou (viz. Obr. 12, kde jsou jako příklad vyobrazeny mapy související s modelem CNRM.11.CNRM-CM5).





Obr. 12: Plošné mapy relativních odchylek zimních srážek za období 1989 – 2005 pro modely CNRM-CM5, CNRM.11.ERA a CNRM.11.CNRM-CM5

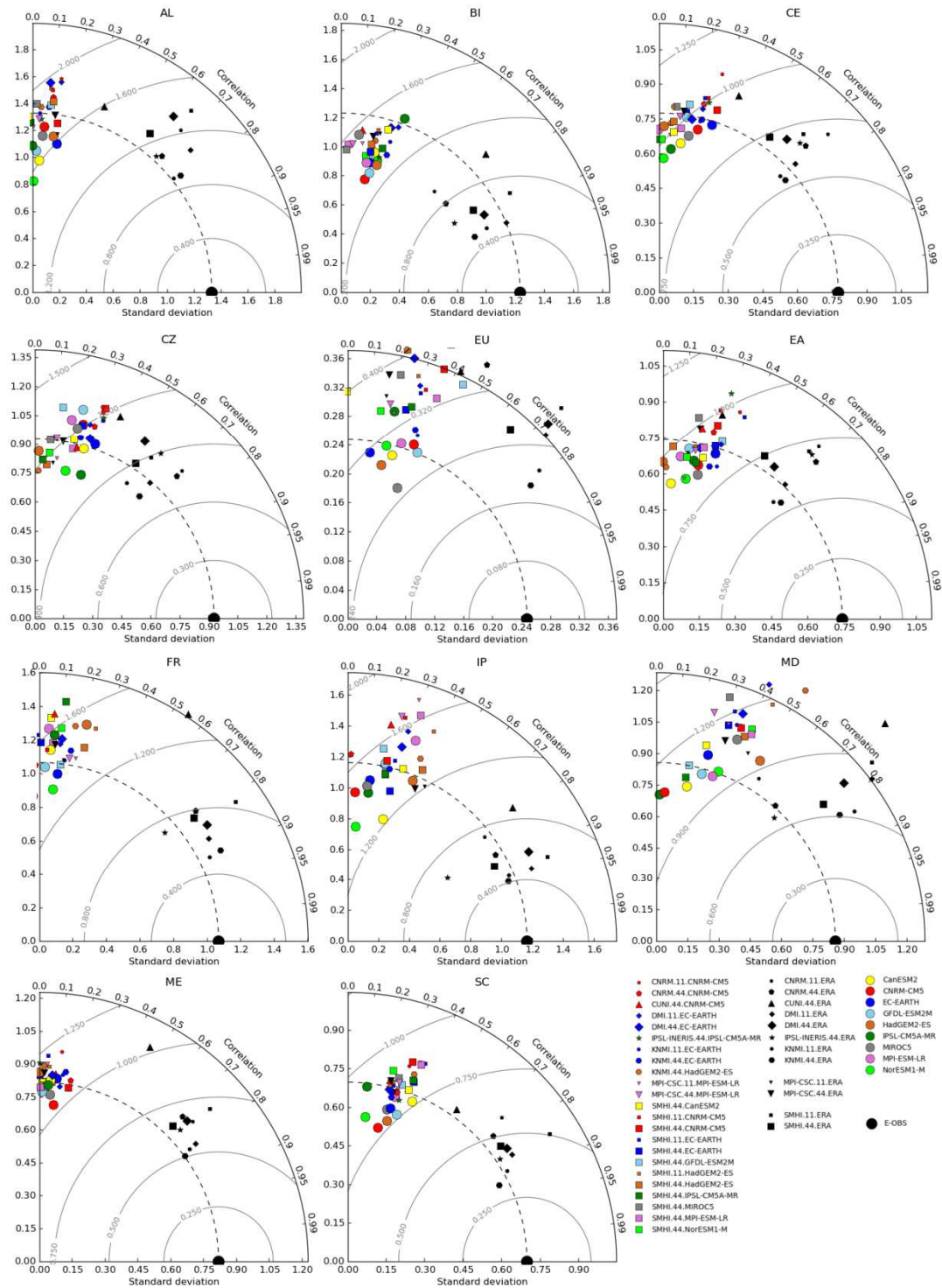
#### 4. 2. 3. Analýza pomocí Taylorových diagramů

Taylorovy diagramy pro měsíční průměry srážek za období 1989 – 2005 pro oblasti definované v Tab. 5 jsou vykresleny na Obr. 13 pro celý rok.

U srážek jsou hlavním zdrojem rozdílů mezi modelem a pozorováním nízké korelace těchto dvou souborů dat. U globálních modelů a regionálních modelů řízených GCM jsou korelace většinou do 0,4 (nejhorší jsou v oblasti Alp) a i u RCM řízených re-analýzou se většinou pohybují jen mezi 0,6 a 0,9. Nižší jsou modelů MPI-CSC.11.ERA, MPI-CSC.44.ERA (do 0,4) a CUNI.44.ERA (0,4 až 0,7).

Z regionálních modelů řízených GCM vykazují nejlepší korelaci s pozorovanými daty modely řízené modelem EC-EARTH. Kromě jihoevropských regionů s pozorovanými daty dobře korelují také RCM řízené modelem CNRM-CM5 a pro jih Evropy se jeví jako nejlepší řízení modelem HadGEM2-ES.

Rozptyl je u všech modelů relativně podobný pozorovanému a nelze určit modely, které by jej měly ve většině oblastí příliš velký nebo naopak příliš malý.



Obr. 13: Taylorovy diagramy pro srážky v měsíčních průměrech v období 1989 – 2005

### 4. 3. Validace modelů – shrnutí

Pro zhodnocení teploty a srážek dohromady byly pro danou oblast definovanou v Tab. 5 vyneseny do jednoho grafu jak sezónní průměry teplot (na osu x), tak sezónní průměry srážek (na osu y) pro každý model zvlášť i pro E-OBS sloužící jako reference. Tyto křížové grafy jsou vyobrazeny v Obr. 14 (jaro), Obr. 15 (léto), Obr. 16 (podzim) a Obr. 17 (zima).

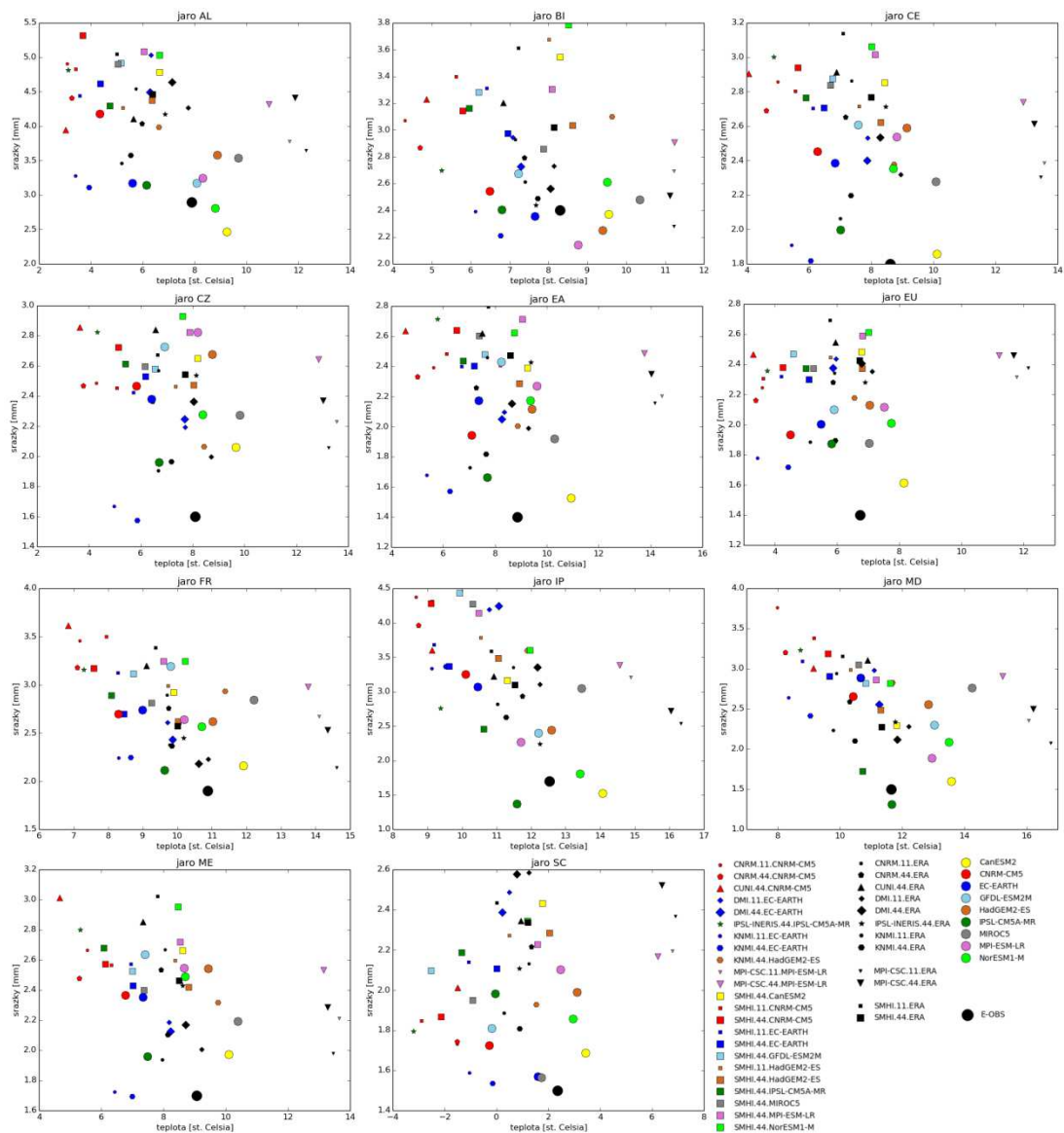
U teplot se u modelů vyskytují kladné (nadhodnocování) i záporné (podhodnocování) odchylky oproti E-OBS. Nejmenší odchylky mají obecně regionální klimatické modely řízené re-analýzou, s výjimkou modelů od instituce MPI-CSC na jaře a na podzim (viz 4. 1. 1).

Srážek modely většinou dávají více než pozorování, čtenější podhodnocování je patrné zejména v oblasti Alpy (AL) na podzim a v oblasti Britských ostrovů (BI) na podzim a v zimě. Malé odchylky sezónních srážek od pozorování jsou často patrné u globálních klimatických modelů.

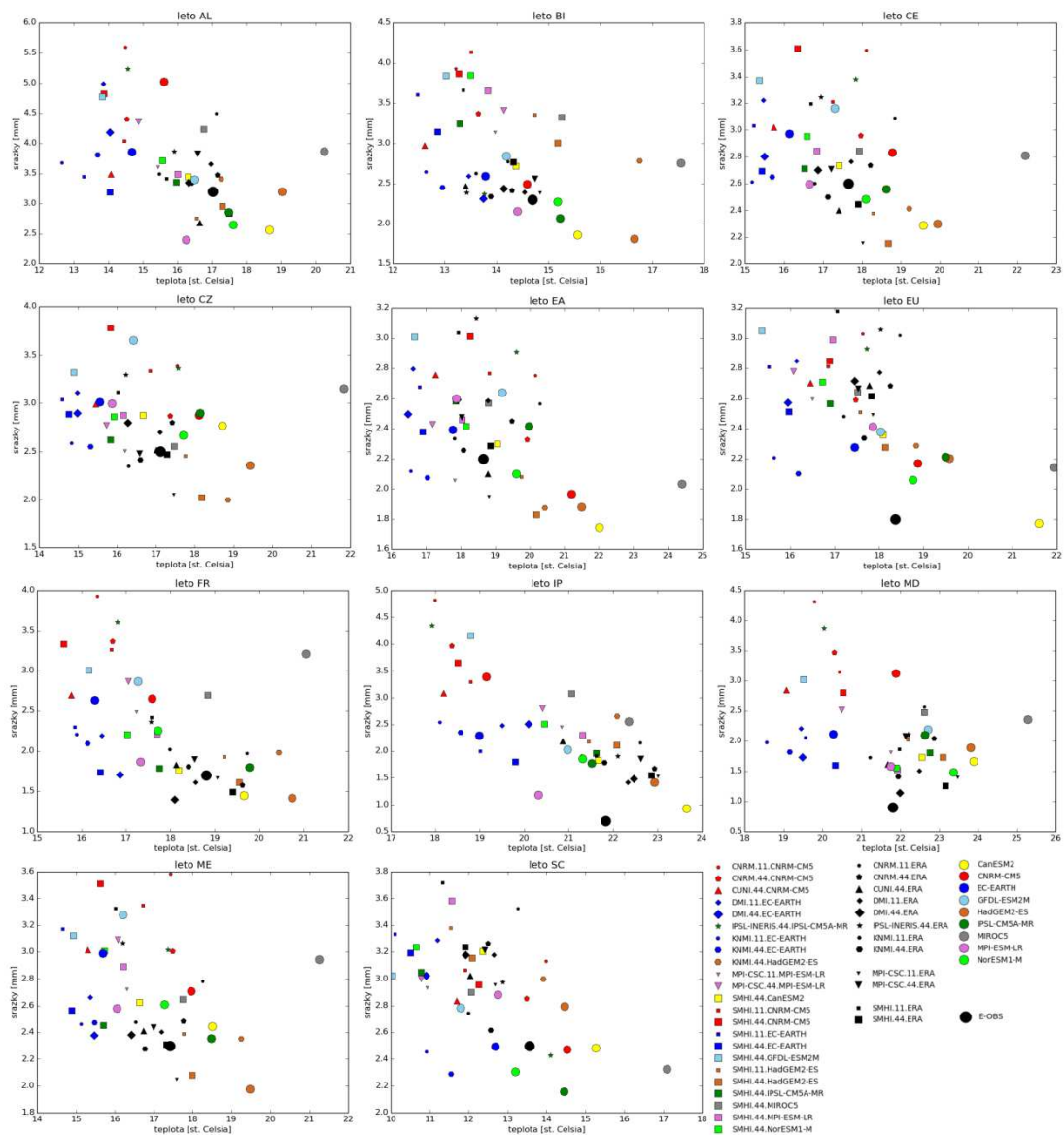
Celkově jsou na grafech od bodu reprezentujícího E-OBS nejméně vzdálené modely od institucí SMHI a KNMI a modely, které řídí globální model EC-EARTH. Nejvzdálenější jsou naproti tomu ve velkém množství případů RCM řízené modelem CNRM-CM5 a globální model MIROC5.

Pomocí těchto grafů můžeme také jednoznačně pozorovat vliv globálních klimatických modelů na modely regionální, které jsou jimi řízeny. RCM od jednoho globálního modelu (vyobrazené jednou barvou) lze na grafech často nalézt blízko sebe.

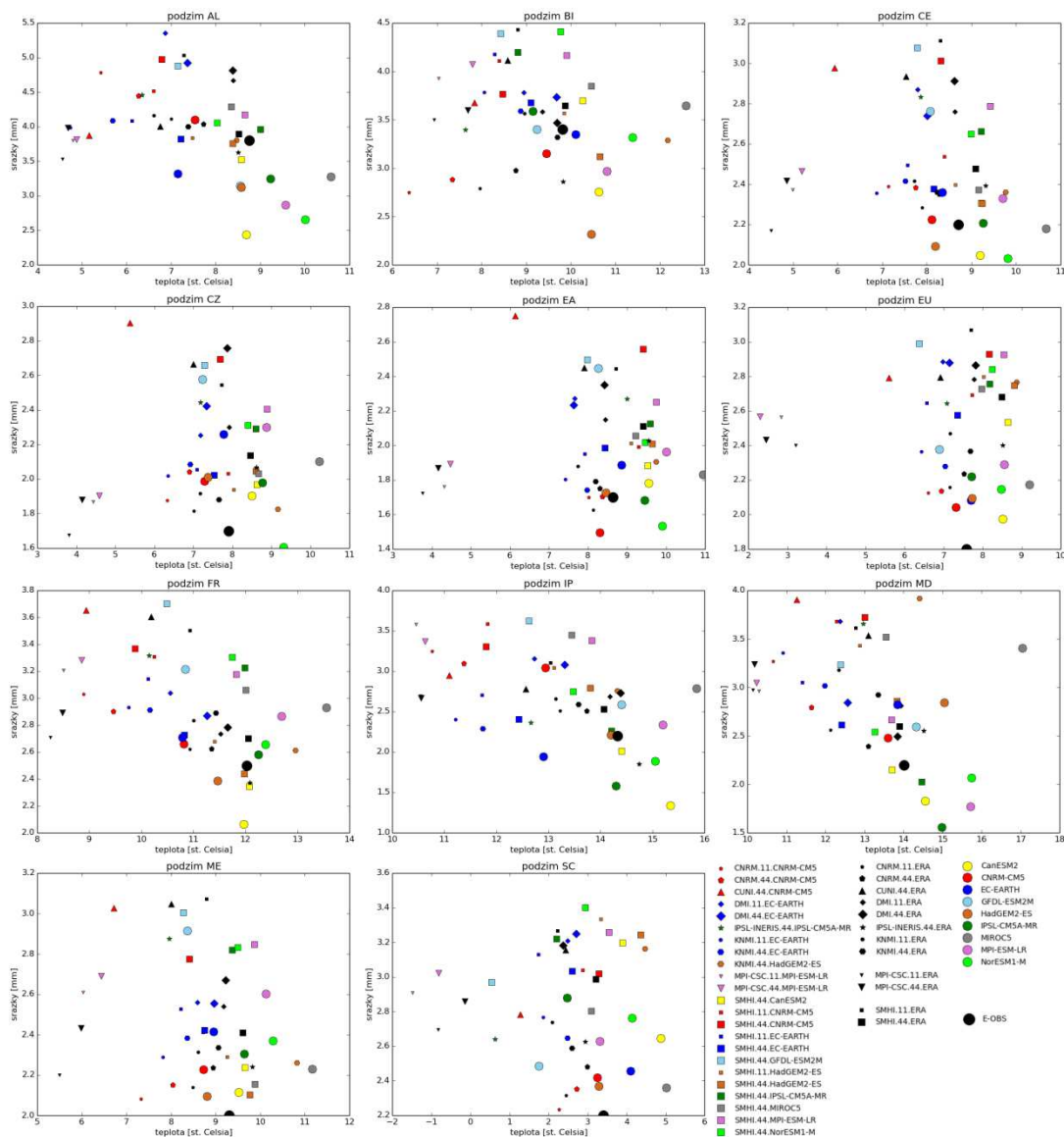
Zajímavý je také nezanedbatelný vztah mezi modelovými teplotami a srážkami, který je patrný hlavně v létě, ale v jižních regionech také na jaře a na podzim. U modelů, které mají hodnoty teplot nejvyšší, totiž pozorujeme tendenci dávat nízké srážky, a obráceně.



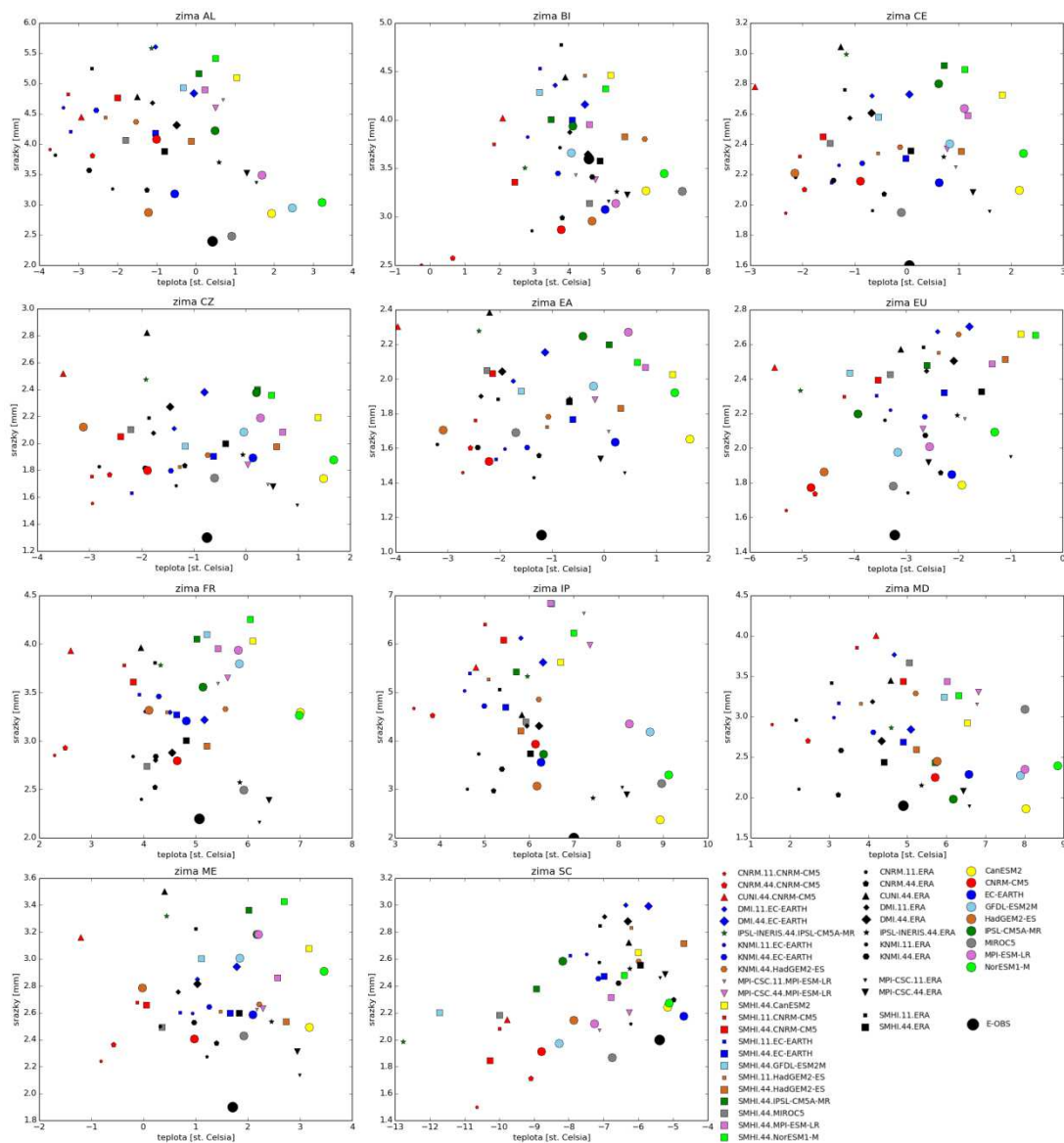
Obr. 14: Křížové grafy průměrných jarních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005



Obr. 15: Křížové grafy průměrných letních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005



Obr. 16: Křížové grafy průměrných podzimních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005



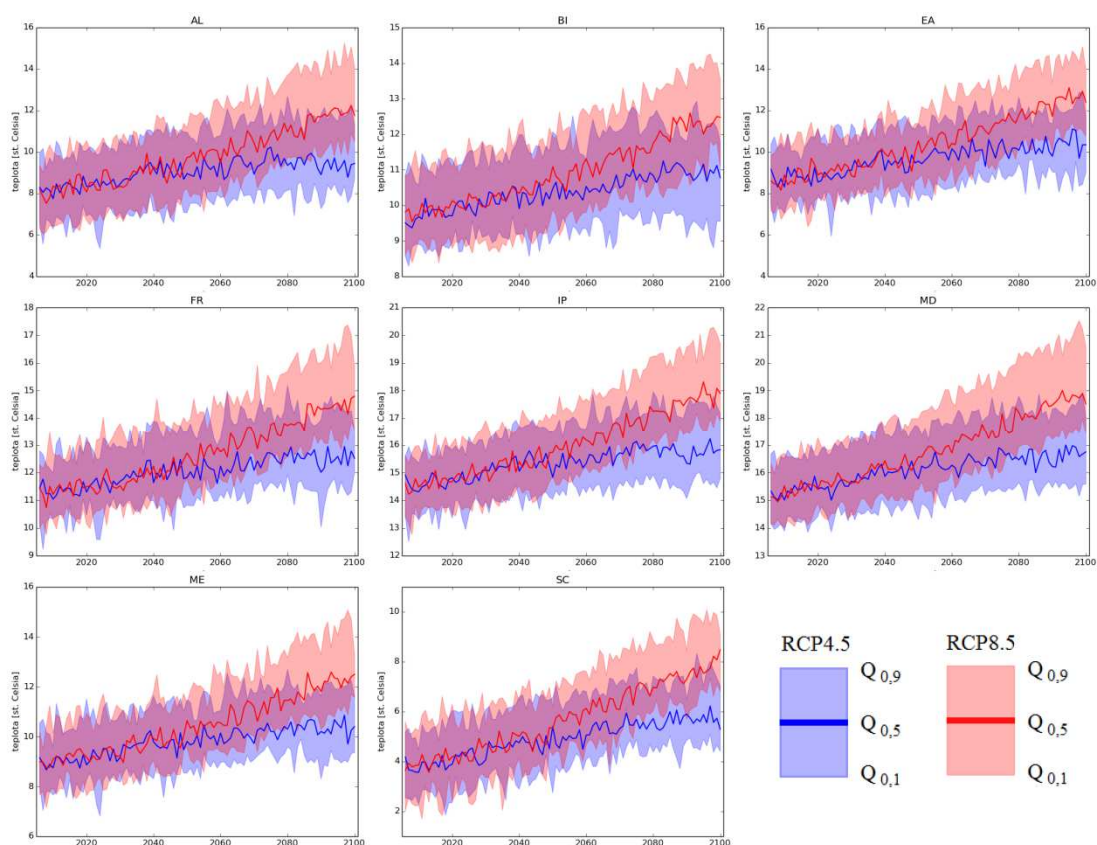
Obr. 17: Křížové grafy průměrných zimních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005

## 4. 4. Zhodnocení budoucího vývoje teplot pro soubor regionálních modelů

### 4. 4. 1. Zhodnocení pomocí ročních průměrů

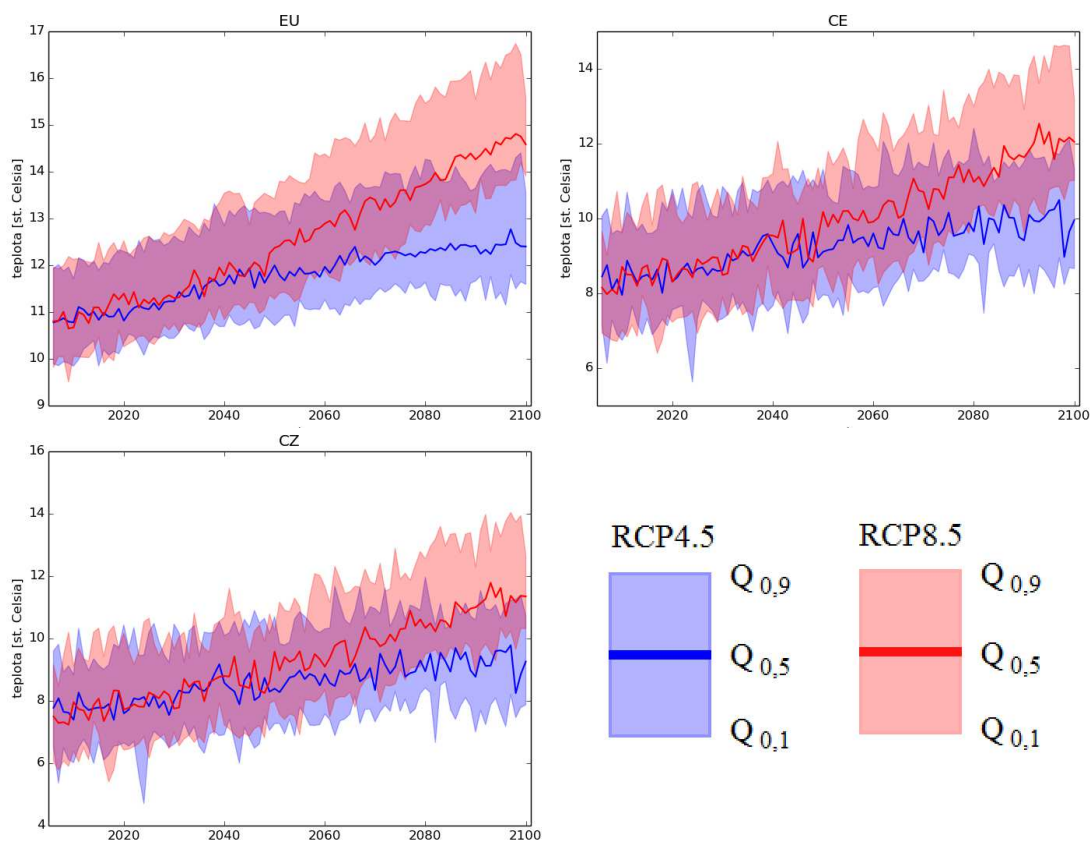
Budoucí vývoj průměrných ročních teplot v období 2006 – 2100 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu je pro emisní scénář RCP4.5 i RCP8.5 vyobrazen na Obr. 18 pro oblasti dle projektu PRUDENCE a na Obr. 19 pro oblasti definované teleskopicky. V grafech je vyznačen medián ( $Q_{0,5}$ ) a první a devátý decil ( $Q_{0,1}$  a  $Q_{0,9}$ ) souboru modelových hodnot.

U obou scénářů je z grafu patrný přibližně lineární nárůst průměrných teplot od roku 2006 do roku 2100, který je výraznější u scénáře RCP8.5. Nicméně zhruba do roku 2050 jsou hodnoty teplot vypočtené na základě scénáře RCP4.5 srovnatelné s hodnotami dle scénáře RCP8.5 a větší rozdíly mezi oběma scénáři jsou patrné až v pozdějších letech.



Obr. 18: Budoucí vývoj průměrných ročních teplot v období 2006 – 2100 podle souboru klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech dle PRUDENCE





Obr. 19: Budoucí vývoj průměrných ročních teplot v období 2006 – 2100 podle souboru klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech stanovených teleskopicky

#### 4. 4. 2. Zhodnocení pomocí sezónních průměrů

Intervaly (dolní a horní kvartil z mezimodelového rozptylu) odchylek sezónních průměrů teplot v obdobích 2021 – 2050 a 2071 – 2100 od normálu 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 jsou pro jednotlivé oblasti definované dle Tab. 5 uvedeny v Tab. 6 (jaro), Tab. 7 (léto), Tab. 8 (podzim) a Tab. 9 (zima).

Jak jsme již uváděli v předchozí kapitole (4. 4. 1), regionální modely slibují postupné zvyšování teplot v nadcházejících letech. Je tedy jasné, že veškeré teploty v budoucnosti zprůměrované přes dostatečně dlouhé období musejí být vyšší než teploty normálu (1971 – 2000) a odchylka průměrné hodnoty za budoucí období od hodnoty období referenčního musí být kladná.

Nejvyšší odchylky od normálu vykazují dle očekávání modely vypočtené na základě RCP8.5 průměrované v období daleké budoucnosti (2071 – 2100), významně menší odchylky mají modely založené na scénáři RCP4.5 průměrované

pro téže období a nejmenší odchylky pozorujeme při průměrování v období blízké budoucnosti (2021 – 2050), přičemž lehce vyšší jsou u scénáře RCP8.5. U vzdálenějšího období a scénáře RCP8.5 je ale mezikvartilové rozpětí poměrně velké.

Největší změny teplot modely očekávají v zimě, výjimkou je jih Evropy (regiony AL, MD, IP, FR), kde připadají na léto. O poznání menší odchylky od normálu pozorujeme na podzim a úplně nejmenší na jaře.

Oblastí největších změn by měla být Skandinávie (SC), kde se v zimě při scénáři RCP8.5 připouštějí v období 2071 – 2100 odchylky od normálu dokonce 4,9 až 6,6 °C. Nejmenší odchylky budoucích teplot od referenčních jsou naproti tomu přisuzované oblasti Britských ostrovů (BI). Tyto výsledky se dobře shodují s očekáváním, neboť u ostrovů způsobuje moře zmírňování veškerých teplotních změn a v severních oblastech dochází k dalšímu oteplování vlivem pozitivní zpětné vazby působené táním sněhové pokrývky.

oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	0,9 až 1,3	1,7 až 2,2	1,0 až 1,4	3,2 až 4,2
BI	0,7 až 1,0	1,2 až 1,6	0,7 až 1,1	2,2 až 2,8
EA	1,0 až 1,6	1,9 až 2,8	1,1 až 1,8	3,2 až 4,1
FR	0,6 až 1,0	1,1 až 1,6	0,7 až 1,0	2,5 až 3,1
IP	0,8 až 1,2	1,5 až 2,0	1,0 až 1,2	3,2 až 3,8
MD	0,8 až 1,4	1,7 až 2,2	1,1 až 1,5	3,0 až 4,1
ME	0,8 až 1,2	1,6 až 2,0	0,9 až 1,3	2,7 až 3,4
SC	1,6 až 2,3	2,8 až 3,8	1,8 až 2,4	4,4 až 5,4
EU	1,3 až 1,8	2,5 až 3,0	1,5 až 2,0	3,9 až 4,7
CE	0,9 až 1,4	1,8 až 2,4	1,1 až 1,5	3,0 až 3,8
CZ	0,9 až 1,4	1,8 až 2,5	1,1 až 1,6	3,0 až 3,9

Tab. 6: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných jarních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných jarních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5

Oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	1,4 až 1,8	2,0 až 2,7	1,4 až 1,9	4,2 až 5,3
BI	0,8 až 1,2	1,4 až 1,9	0,9 až 1,3	2,8 až 3,3
EA	1,2 až 1,6	1,8 až 2,9	1,2 až 1,8	3,4 až 5,1
FR	1,1 až 1,5	1,8 až 2,5	1,2 až 1,7	3,4 až 5,0
IP	1,4 až 1,8	2,1 až 2,9	1,5 až 2,0	4,5 až 5,6
MD	1,4 až 1,9	2,2 až 3,0	1,5 až 2,1	4,3 až 5,5
ME	1,0 až 1,4	1,7 až 2,2	1,0 až 1,4	3,2 až 4,1
SC	0,9 až 1,7	1,9 až 2,7	1,2 až 1,9	3,6 až 4,7
EU	1,2 až 1,8	2,0 až 2,9	1,4 až 1,9	3,8 až 5,2
CE	1,2 až 1,5	1,8 až 2,5	1,1 až 1,6	3,4 až 4,6
CZ	1,1 až 1,4	1,7 až 2,4	1,1 až 1,4	3,3 až 4,5

Tab. 7: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných letních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných letních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5

oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	1,0 až 1,7	2,0 až 2,6	1,2 až 2,0	3,8 až 4,6
BI	1,0 až 1,4	1,6 až 2,1	1,0 až 1,5	3,1 až 3,8
EA	1,0 až 1,6	1,9 až 2,5	1,0 až 1,8	3,4 až 4,5
FR	1,0 až 1,6	1,8 až 2,4	1,1 až 1,9	3,4 až 4,2
IP	1,3 až 1,6	2,2 až 2,5	1,3 až 1,7	4,0 až 4,6
MD	0,9 až 1,5	1,8 až 2,6	1,2 až 1,7	3,6 až 4,5
ME	1,0 až 1,5	1,8 až 2,5	1,0 až 1,8	3,4 až 4,2
SC	1,4 až 2,1	2,3 až 3,3	1,6 až 2,3	3,9 až 5,4
EU	1,3 až 1,9	2,1 až 3,0	1,5 až 2,1	3,9 až 5,3
CE	1,0 až 1,6	1,8 až 2,5	1,1 až 1,8	3,4 až 4,4
CZ	0,9 až 1,5	1,8 až 2,4	1,1 až 1,8	3,3 až 4,3

Tab. 8: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných podzimních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných podzimních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5

oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	1,2 až 1,6	2,0 až 2,7	1,1 až 2,0	3,8 až 4,6
BI	0,8 až 1,1	1,3 až 1,9	1,0 až 1,2	2,5 až 3,3
EA	1,2 až 2,0	2,5 až 3,1	1,2 až 2,1	4,3 až 5,2
FR	0,9 až 1,2	1,6 až 2,0	0,8 až 1,5	2,9 až 3,7
IP	0,9 až 1,1	1,4 až 1,8	0,8 až 1,3	2,9 až 3,4
MD	1,1 až 1,5	1,8 až 2,3	1,1 až 1,7	3,4 až 4,0
ME	1,1 až 1,5	2,0 až 2,5	0,9 až 1,7	3,4 až 4,3
SC	1,6 až 2,7	3,2 až 4,1	2,1 až 2,7	4,9 až 6,6
EU	1,5 až 2,2	2,7 až 3,5	1,7 až 2,3	4,5 až 5,7
CE	1,1 až 1,8	2,2 až 2,8	1,2 až 2,0	3,8 až 4,6
CZ	1,0 až 1,9	2,3 až 2,9	1,1 až 2,0	3,9 až 4,9

Tab. 9: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných zimních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných zimních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5

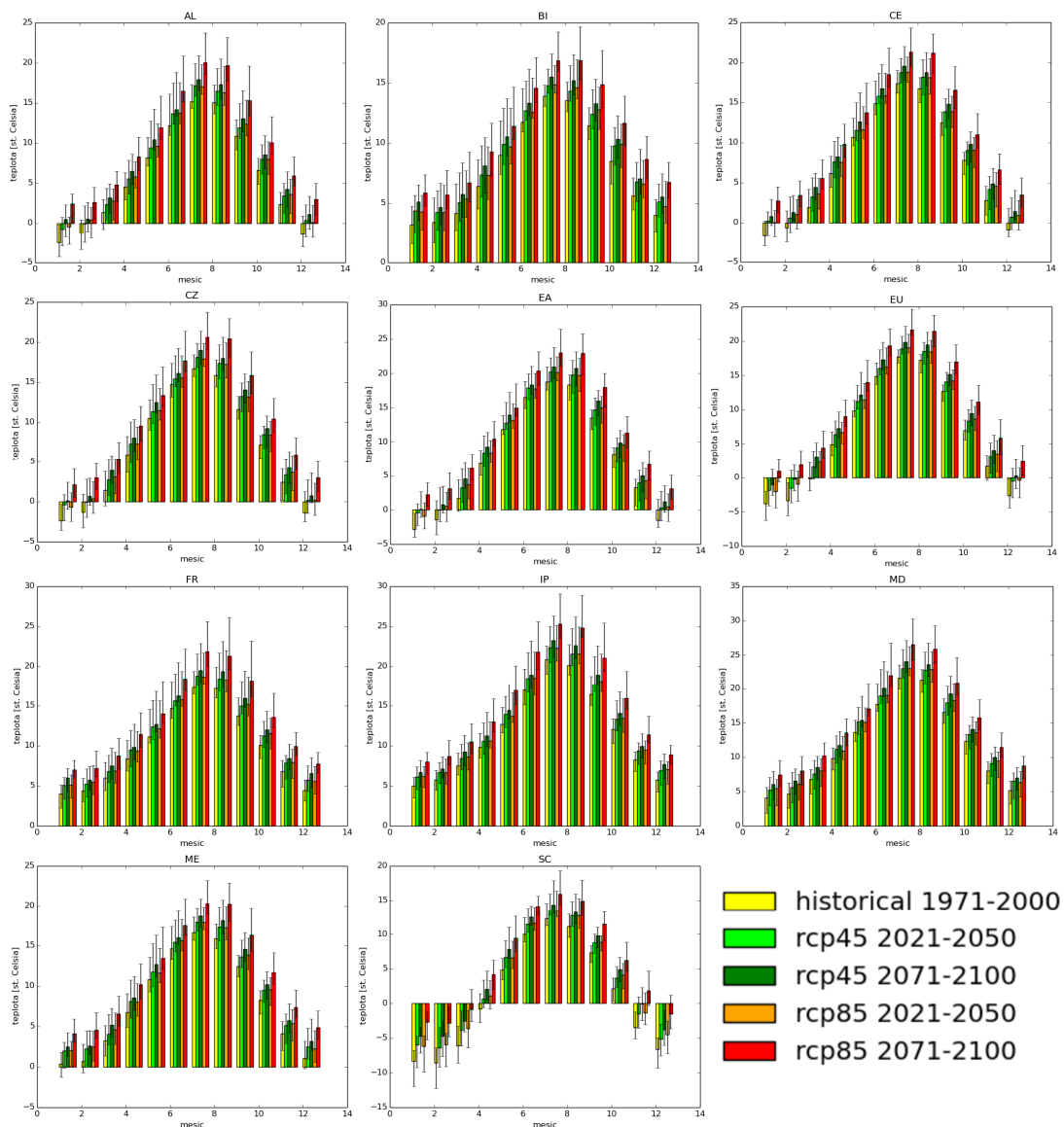
#### 4. 4. 3. Zhodnocení pomocí ročních chodů

Roční chody teplot pro období 2021 – 2050 a 2071 – 2100 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 jsou pro oblasti definované v Tab. 5 vyobrazeny na Obr. 20 v podobě sloupců s vyznačeným prvním a devátým decilem souboru modelových hodnot.

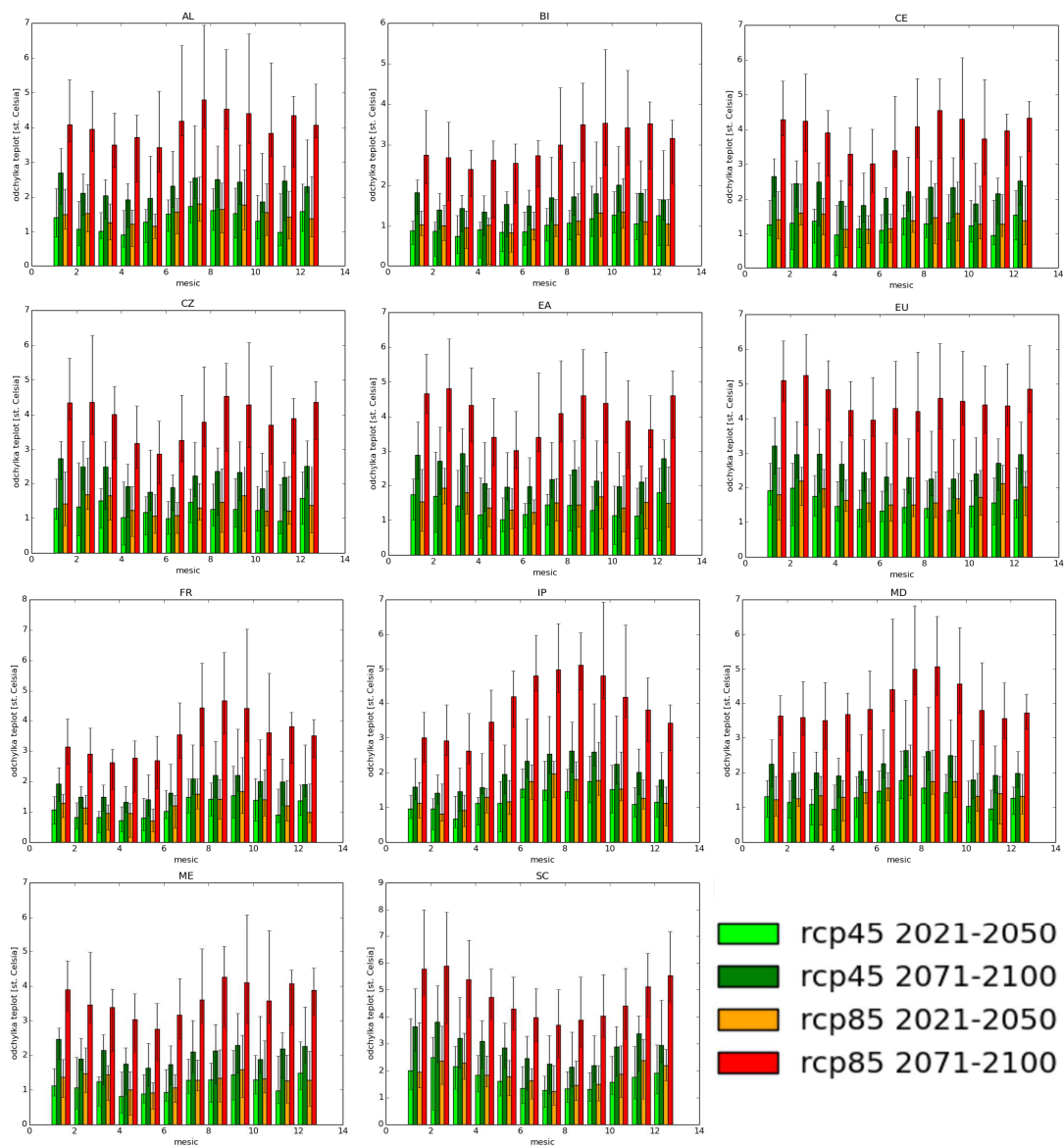
Celkově je simulovaný budoucí roční chod stále dosti podobný ročnímu chodu v normálovém období. V některých oblastech (například BI) je ale patrný náznak posunu maxima i minima směrem doprava, tedy maximum v srpnu namísto července a minimum v únoru namísto ledna.

Daleko zajímavější než roční chod absolutních teplot je ale roční chod odchylek měsíčních teplot průměrovaných za období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od teplot průměrovaných za období referenční (1971 – 2000). Ten je pro každou oblast vyobrazen na Obr. 21.

Pro oba scénáře i obě období pozorujeme v jižních oblastech (FR, IP, MD) zřetelné maximum odchylek v pozdním létě a minimum v brzkém jaře. V oblasti Skandinávie jsou naproti tomu největší kladné odchylky patrné v zimě a nejmenší v létě. U ostatních oblastí se vyskytují dvě lokální maxima – jedno v pozdním létě a druhé v zimě.



Obr. 20: Roční chody teplot pro období 2021 – 2050, 2071 – 2100 a normál 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5



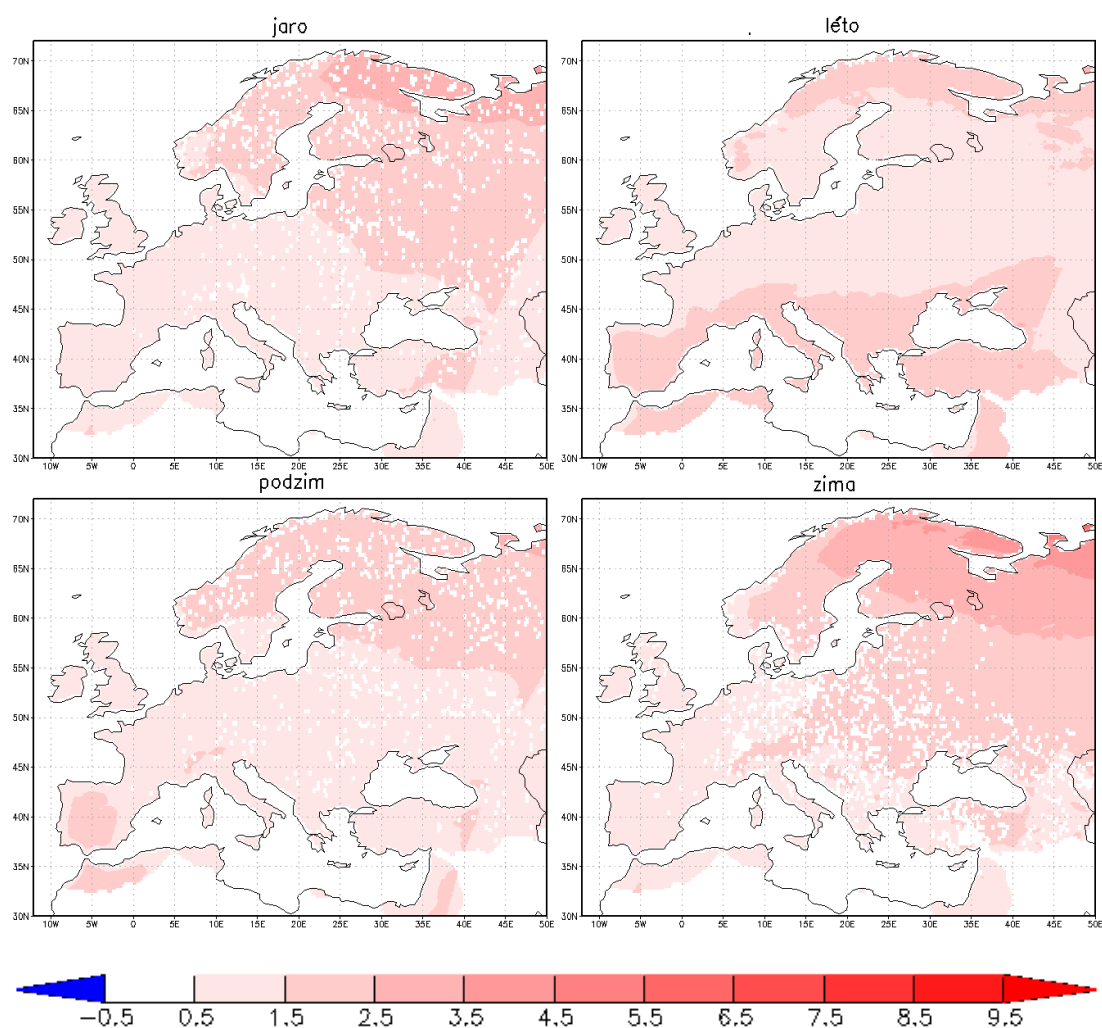
Obr. 21: Roční chody průměrných odchylek teplot pro období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od teplot pro normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5

#### 4. 4. 4. Zhodnocení pomocí plošných map

Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) a teplot za normálového období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 jsou ukázány na Obr. 22 (respektive Obr. 23, Obr. 24, Obr. 25) pro období 2021 – 2050 a scénář RCP4.5 (respektive období 2021 – 2050 a scénář RCP8.5, období 2071 – 2100 a scénář RCP4.5, 2071 – 2100 a scénář RCP8.5).

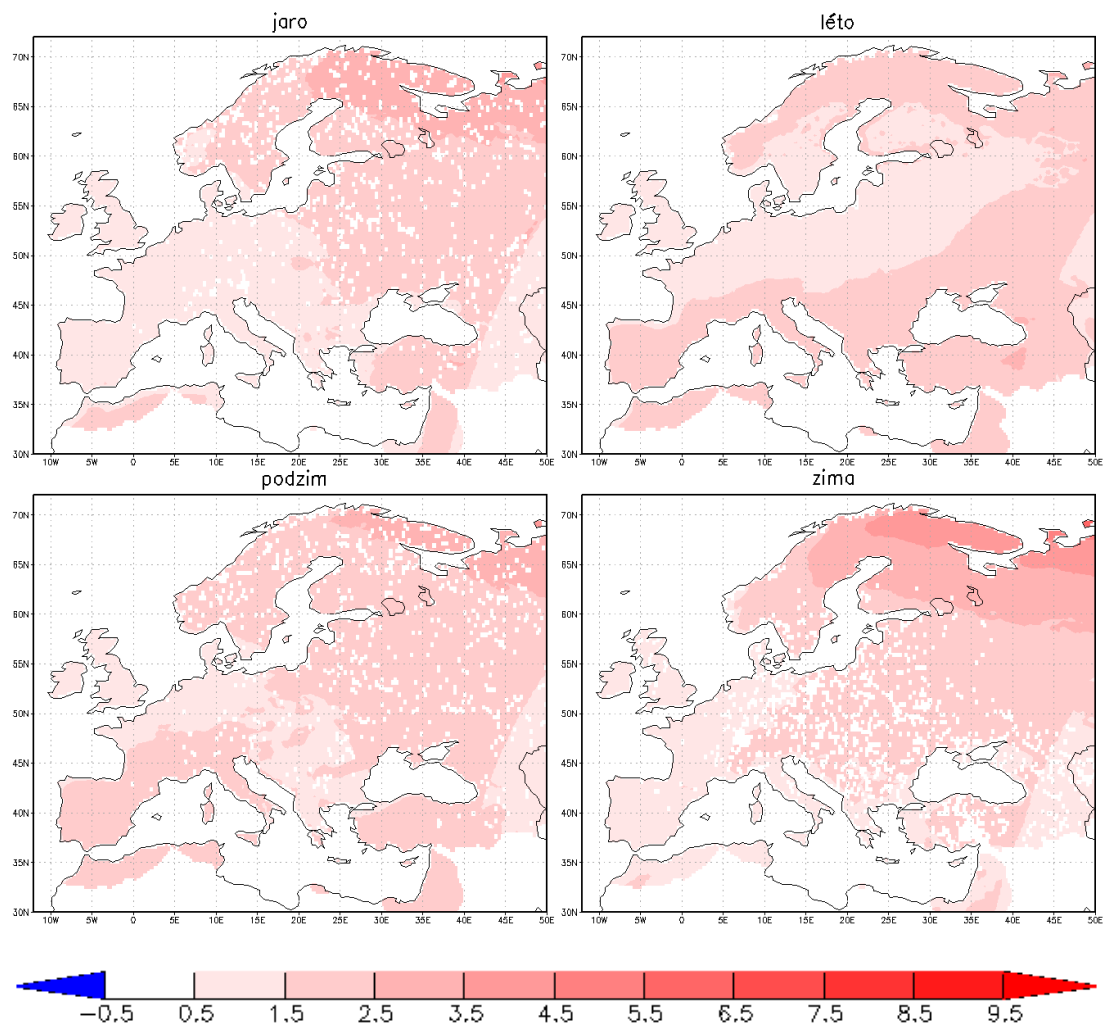
Obecně jsou větší změny patrné v severovýchodní polovině Evropy a menší v jihozápadní (zejména v Británii), kde jsou zmírňovány vlivem moře. Nejlépe je toto rozložení odchylek vidět v zimním období.

Při vzájemném porovnání plošných map můžeme učinit i obdobné závěry ohledně ročního chodu odchylek, které jsme již odhalili ve dvou předešlých kapitolách, ale zde se nemusíme omezovat na regiony definované v Tab. 5. Severovýchod Evropy vykazuje největší změny teplot v zimě a nejmenší v létě, pobřeží Středozemního moře má maximum odchylek v létě a ve střední Evropě se relativně velké změny přisuzují létu i zimě.

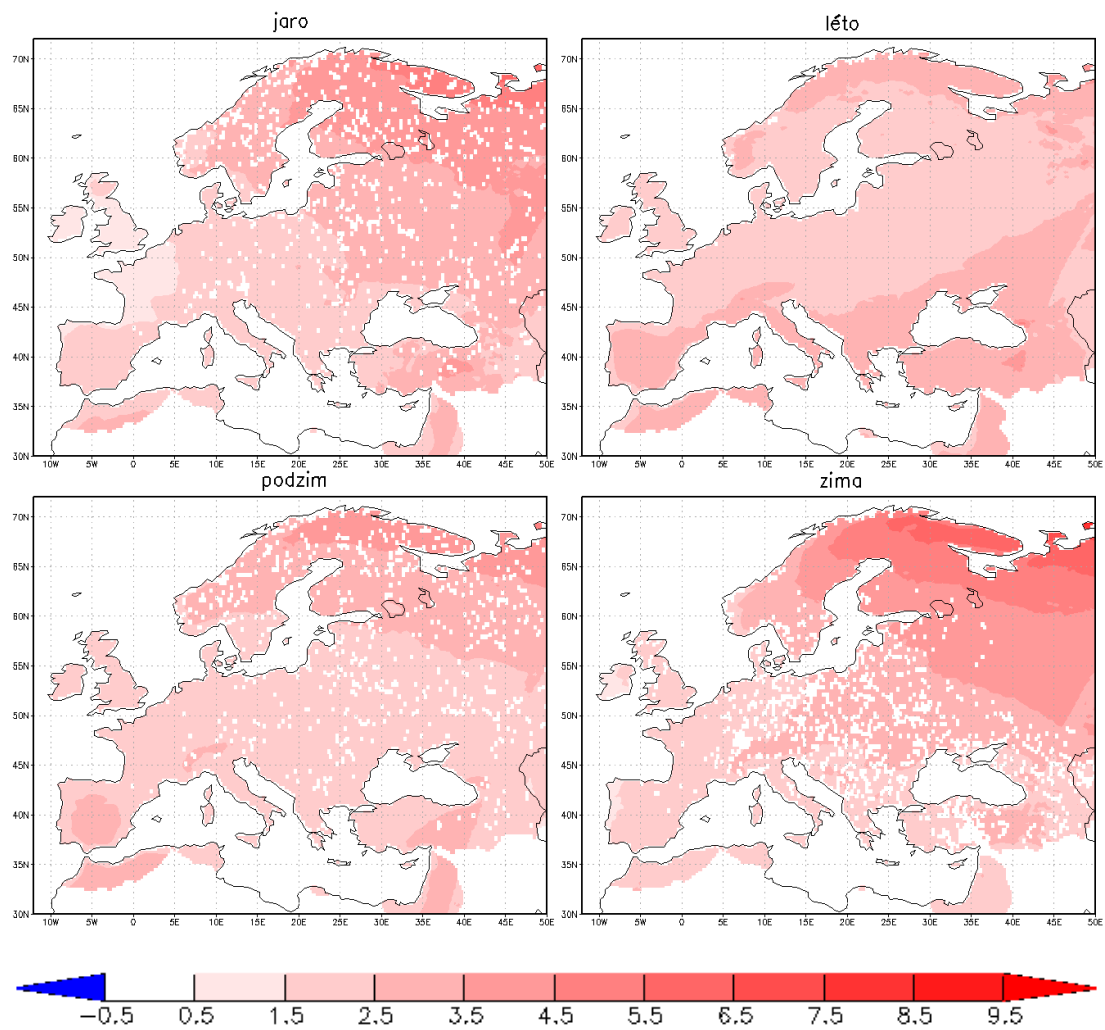


Obr. 22: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2021 – 2050 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5

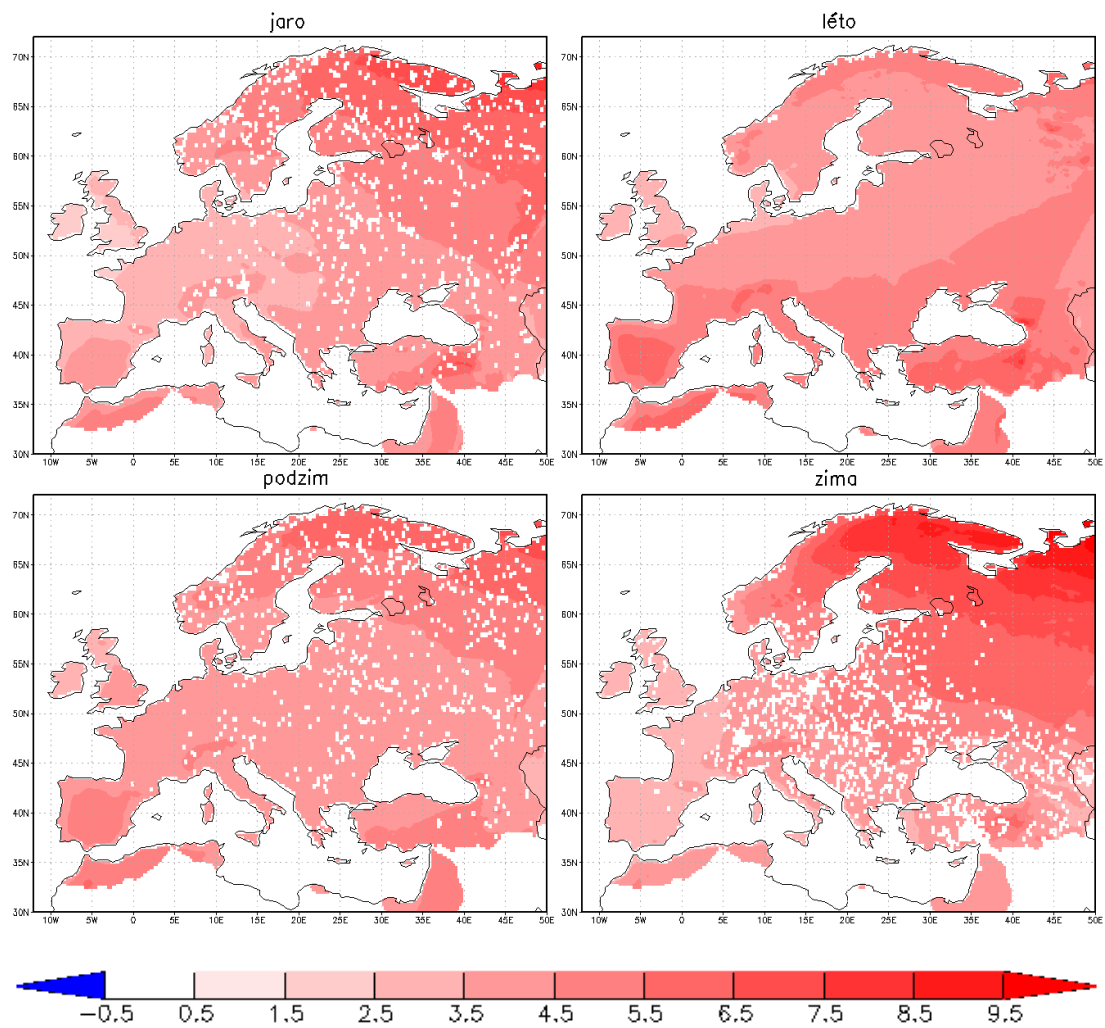




Obr. 23: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2021 – 2050 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5



Obr. 24: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2071 – 2100 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5



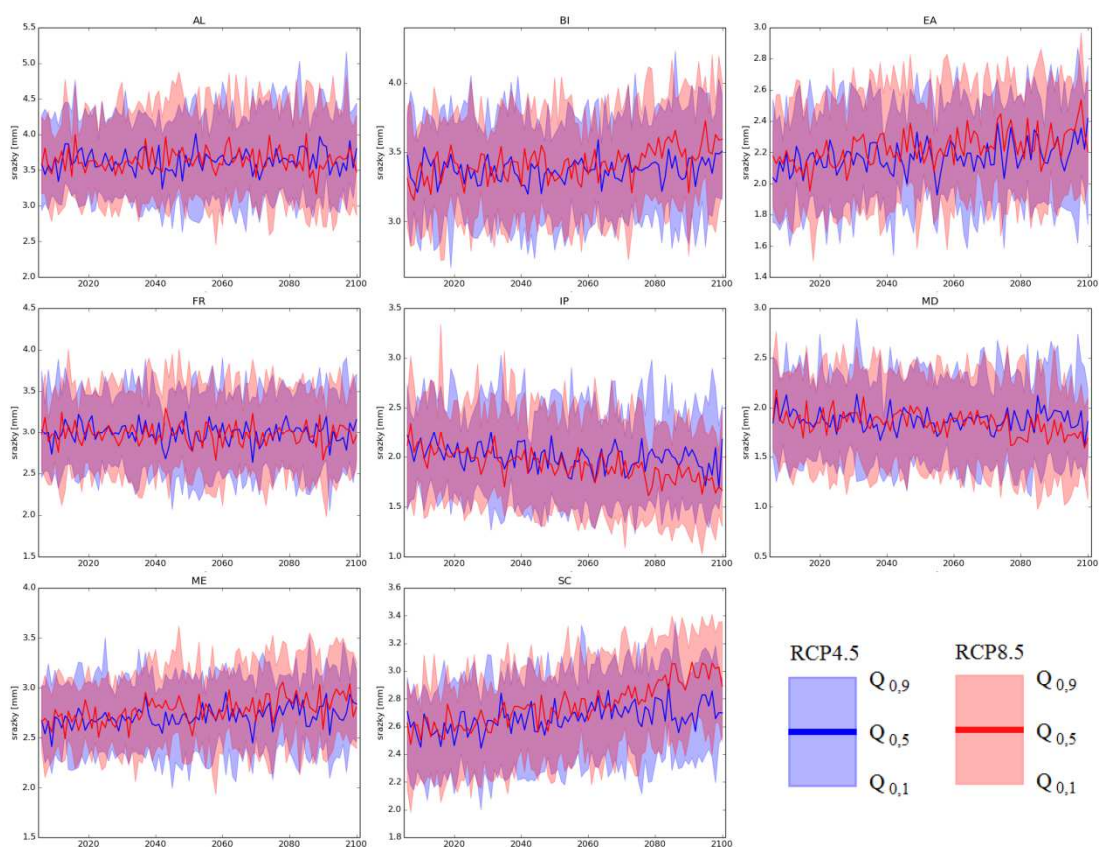
Obr. 25: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2071 – 2100 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5

## 4. 5. Zhodnocení budoucího vývoje srážek pro soubor regionálních modelů

### 4. 5. 1. Zhodnocení pomocí ročních průměrů

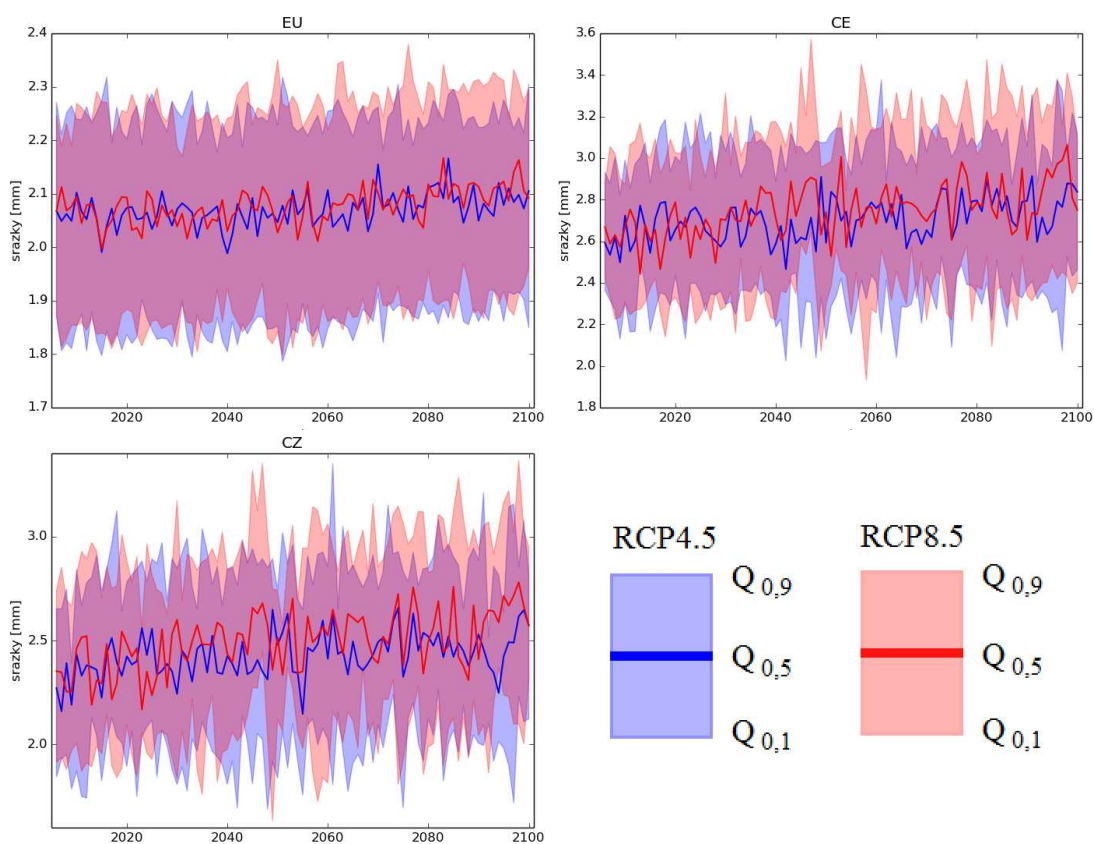
Budoucí vývoj průměrných ročních srážek v období 2006 – 2100 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu je pro emisní scénář RCP4.5 i RCP8.5 vyobrazen na Obr. 26 pro oblasti dle projektu PRUDENCE a na Obr. 27 pro oblasti definované teleskopicky. V grafech je vyznačen medián ( $Q_{0,5}$ ) a první a devátý decil ( $Q_{0,1}$  a  $Q_{0,9}$ ) souboru modelových hodnot.

Celkově není trend změn srážkových úhrnů sledovaný v ročních průměrech příliš zřetelný. Výrazné přibývání srážek je patrné pouze u regionu SC. Mírný přírůstek srážek je vidět ještě u regionů BI, EA, ME, CE a CZ a ubývání srážek naproti tomu modely predikují v oblastech IP a MD.



Obr. 26: Budoucí vývoj průměrných ročních srážek v období 2006 – 2100 podle souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech dle PRUDENCE

Rozdíl mezi scénářem RCP4.5 a scénářem RCP8.5 se na ročních průměrech vypočtených z celého souboru RCM projevuje minimálně. Významný je pouze pro závěrečné třicetiletí u regionu SC.



Obr. 27: Budoucí vývoj průměrných ročních srážek v období 2006 – 2100 podle souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech stanovených teleskopicky

#### **4. 5. 2. Zhodnocení pomocí sezónních průměrů**

Intervaly (25. až 75. percentil z mezimodulového rozpětí) odchylek sezónních průměrů srážkových úhrnů v obdobích 2021 – 2050 a 2071 – 2100 od normálu 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 jsou pro jednotlivé oblasti definované v Tab. 5 uvedeny v Tab. 10 (jaro), Tab. 11 (léto), Tab. 12 (podzim) a Tab. 13 (zima). Odchylky jsou vyjádřené relativně (v procentech) vůči normálu.

Na oblasti celé Evropy (EU) vyplývá z modelů zvyšování srážkových úhrnů v budoucích letech. Nejvýrazněji je tato změna vidět u scénáře RCP8.5 ve vzdálenější budoucnosti. V dílčích oblastech už ale může být změna kladná (více srážek) i záporná (méně srážek).

Největší kladné změny pozorujeme v oblasti Skandinávie (SC) a kromě léta je přibývání srážek patrné také v dalších regionech středních zeměpisných šířek (EA, CE, CZ, ME). Záporné odchylky se naproti tomu vyskytují na jihu Evropy, přičemž největší jsou v oblasti IP.

Obecně jsou největší kladné odchylky předpokládány v zimním období a největší záporné v letním. Na jaře a na podzim jsou změny někde mezi zimními a letními, přičemž jaro má odchylky kladnější než podzim.

oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	0 až 7	4 až 12	3 až 11	5 až 14
BI	-2 až 6	0 až 5	0 až 6	1 až 9
EA	3 až 11	9 až 16	6 až 16	10 až 23
FR	-2 až 6	0 až 8	-2 až 9	-3 až 5
IP	-4 až 2	-9 až -2	-5 až 2	-17 až -7
MD	-1 až 5	-5 až 6	-6 až 7	-10 až 4
ME	3 až 10	7 až 13	6 až 12	11 až 19
SC	6 až 11	13 až 23	9 až 13	19 až 30
EU	4 až 8	8 až 15	6 až 11	11 až 21
CE	2 až 9	7 až 15	7 až 14	11 až 22
CZ	3 až 10	7 až 16	8 až 15	11 až 25

Tab. 10: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných jarních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných jarních srážkových úhrnů v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5

oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	-9 až 2	-4 až 8	-6 až 7	-19 až 4
BI	-6 až 4	-8 až 2	-8 až 4	-14 až 4
EA	-4 až 5	-2 až 10	1 až 6	-7 až 8
FR	-12 až -1	-15 až 0	-12 až 0	-28 až -6
IP	-15 až -1	-19 až -5	-16 až -2	-40 až -16
MD	-12 až 0	-13 až 4	-11 až 3	-24 až -5
ME	-4 až 4	-8 až 10	-3 až 5	-11 až 12
SC	2 až 12	6 až 13	5 až 10	9 až 23
EU	1 až 5	0 až 8	2 až 6	0 až 10
CE	-3 až 4	-4 až 9	-1 až 5	-9 až 10
CZ	-2 až 4	-6 až 8	-1 až 4	-5 až 9

Tab. 11: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných letních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných letních srážkových úhrnů v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5

oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	-5 až 1	-1 až 5	-3 až 5	-6 až 5
BI	-4 až 2	1 až 6	1 až 4	4 až 10
EA	1 až 7	3 až 10	1 až 8	5 až 16
FR	-6 až 0	-1 až 4	-4 až 4	-5 až 5
IP	-13 až -4	-11 až -4	-10 až -4	-21 až -13
MD	-5 až 6	-1 až 9	-5 až 7	-8 až 5
ME	0 až 5	0 až 8	2 až 6	3 až 15
SC	4 až 8	4 až 12	4 až 11	10 až 24
EU	3 až 5	5 až 9	5 až 8	8 až 16
CE	1 až 5	2 až 9	0 až 7	3 až 14
CZ	0 až 7	2 až 10	1 až 9	3 až 16

Tab. 12: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných podzimních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných podzimních srážkových úhrnů v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5

oblast	RCP4.5		RCP8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
AL	3 až 10	4 až 12	2 až 11	9 až 16
BI	4 až 8	4 až 14	4 až 9	14 až 21
EA	6 až 11	9 až 18	5 až 17	18 až 27
FR	5 až 10	4 až 14	3 až 10	12 až 19
IP	1 až 7	-3 až 6	-2 až 3	-5 až 3
MD	-1 až 5	-3 až 4	-5 až 5	-8 až -3
ME	3 až 11	5 až 15	3 až 13	14 až 27
SC	3 až 10	9 až 17	3 až 9	20 až 31
EU	5 až 8	6 až 13	5 až 8	14 až 21
CE	4 až 11	6 až 15	4 až 15	15 až 25
CZ	4 až 11	8 až 17	4 až 17	18 až 27

Tab. 13: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných zimních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných zimních srážkových úhrnů v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5



### 4. 5. 3. Zhodnocení pomocí ročních chodů

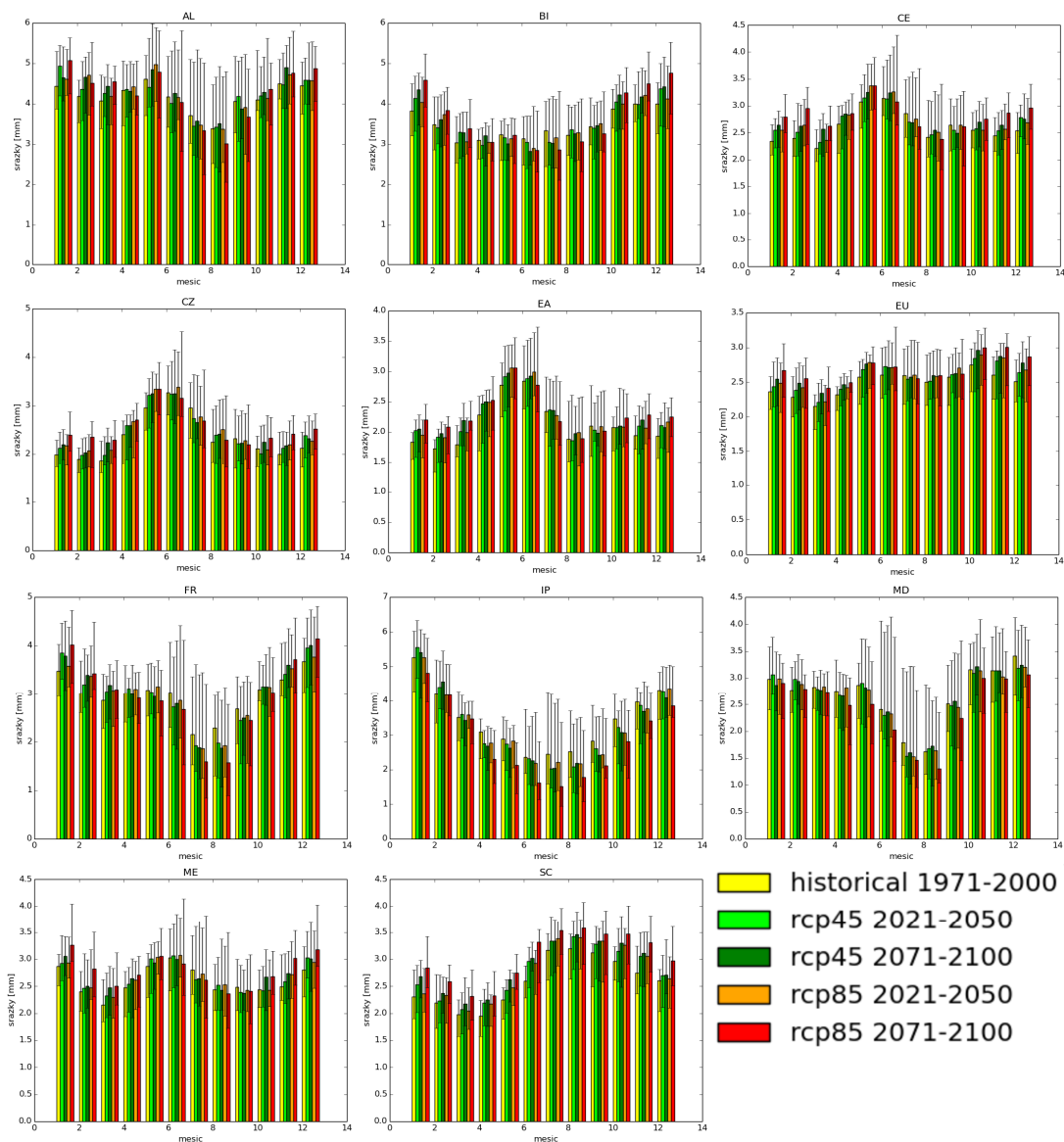
Roční chody srážek pro období 2021 – 2050 a 2071 – 2100 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 jsou pro dané oblasti definované v Tab. 5 vyobrazeny na Obr. 28 v podobě sloupců s vyznačeným prvním a devátým decilem souboru modelových hodnot.

Obecně pozorujeme velkou podobnost ročního chodu v období 1971 – 2000 a modelových budoucích chodů. Pouze v některých oblastech, kde dochází v letních měsících k poklesu srážkových úhrnů a v zimě k jejich nárůstu, je budoucí chod oproti referenčnímu poněkud změněný. Především se jedná o oblasti AL, BI a FR s letním minimem srážek, u kterých je díky těmto změnám roční chod výraznější (má větší extrémy).

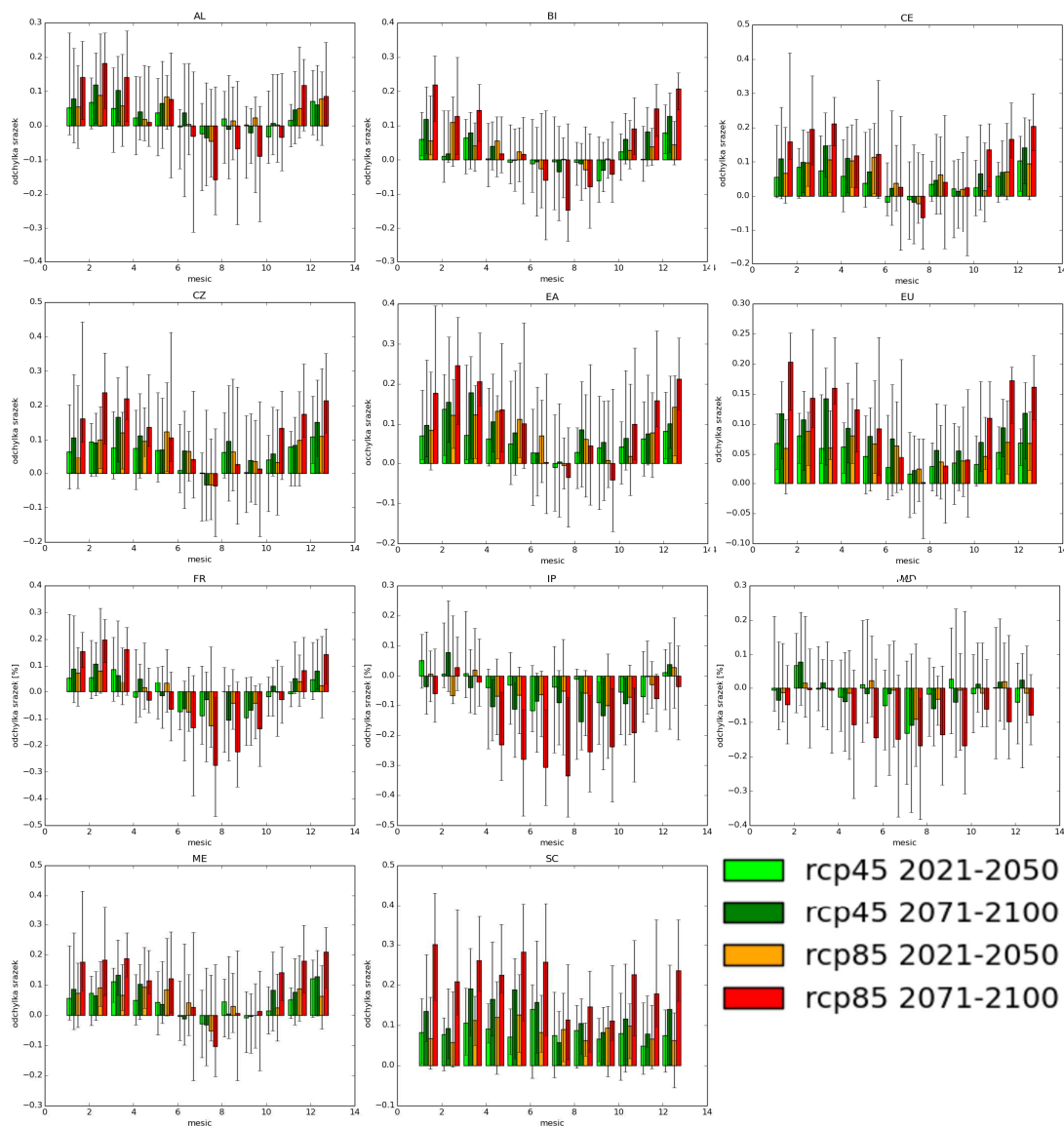
Nepřehlédnutelný je u budoucího vývoje také roční chod průměrných odchylek srážek ze souboru modelů. Tyto odchylky vyjádřené relativně vůči normálu jsou znázorněny v grafech na Obr. 29 včetně vyznačení prvního a devátého decilu z mezimodulového rozpětí.

Celkově je roční chod odchylek u všech scénářů podobný, ale u RCP8.5 jsou velikosti odchylek nejextrémnější. Největší záporné odchylky se vyskytují v letním období s maximem zpravidla v červenci. Největší kladné odchylky se naproti tomu objevují zejména v chladné části roku.

V některých oblastech je však přírůstek srážkových úhrnů patrný téměř ve všech měsících. Konkrétně se jedná o oblasti CE, CZ, EA, EU, ME a SC, které leží na severu Evropy nebo v jejím středu. V oblastech IP a MD oproti tomu vykazují modely až na několik málo zimních měsíců záporné odchylky, přičemž přírůstky srážek v těchto zimních měsících jsou jen velmi malé.



Obr. 28: Roční chody srážek průměrované za období 2021 – 2050, 2071 – 2100 a normál 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5



Obr. 29: Roční chody průměrných odchylek (vyjádřených relativně vůči normálu) srážkových úhrnů pro období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od srážkových úhrnů pro normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5

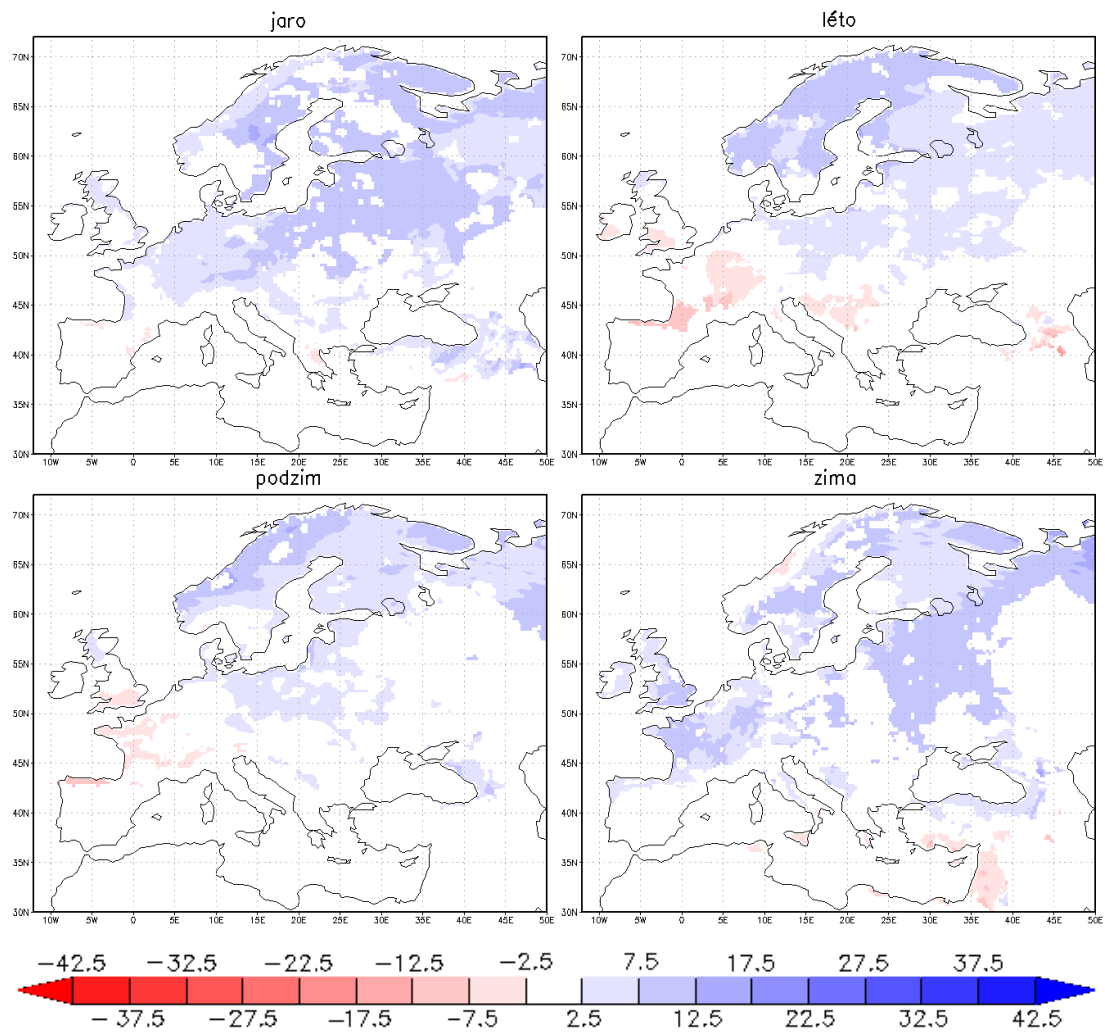
#### 4. 5. 4. Zhodnocení pomocí plošných map

Plošné mapy průměrných odchylek sezónních srážkových úhrnů za období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) a srážkových úhrnů za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 jsou vyobrazeny na Obr. 30 (respektive Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33) pro období 2021 – 2050 a scénář RCP4.5 (respektive období 2021 – 2050 a scénář RCP8.5, období 2071 – 2100 a scénář RCP4.5, období 2071 – 2100 a scénář RCP8.5). Tyto odchylky jsou vyjádřeny relativně (v procentech) vůči hodnotám referenčního období.

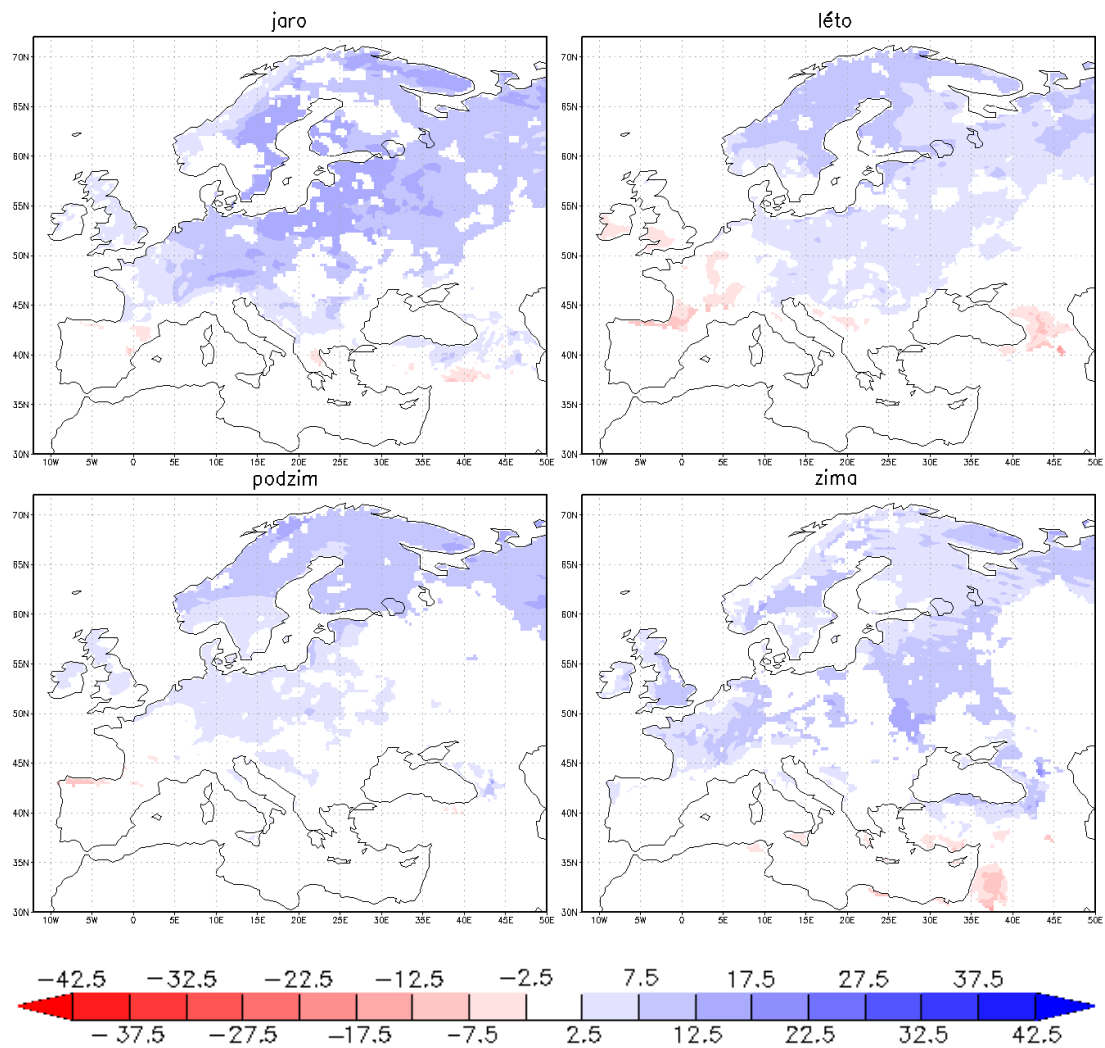
V období blízké budoucnosti jsou simulované změny poměrně malé a u obou analyzovaných scénářů přibližně srovnatelné. Výraznější jsou až u vzdálenějšího období, přičemž lépe jsou vidět u scénáře RCP8.5.

Celkově jsou patrné kladné (přibývání srážek) i záporné (ubývání srážek) odchylky. Přibývání srážek modely predikují pro severozápadní polovinu Evropy, doménou úbytku jsou jižní oblasti. Hranice mezi oběma oblastmi leží přibližně na 45. rovnoběžce, v letní sezóně se přesouvá až nad 50. rovnoběžku. Dobře je tato skutečnost patrná na Britských ostrovech, které mají v létě průměrnou odchylku zápornou, zatímco v ostatních obdobích kladnou.

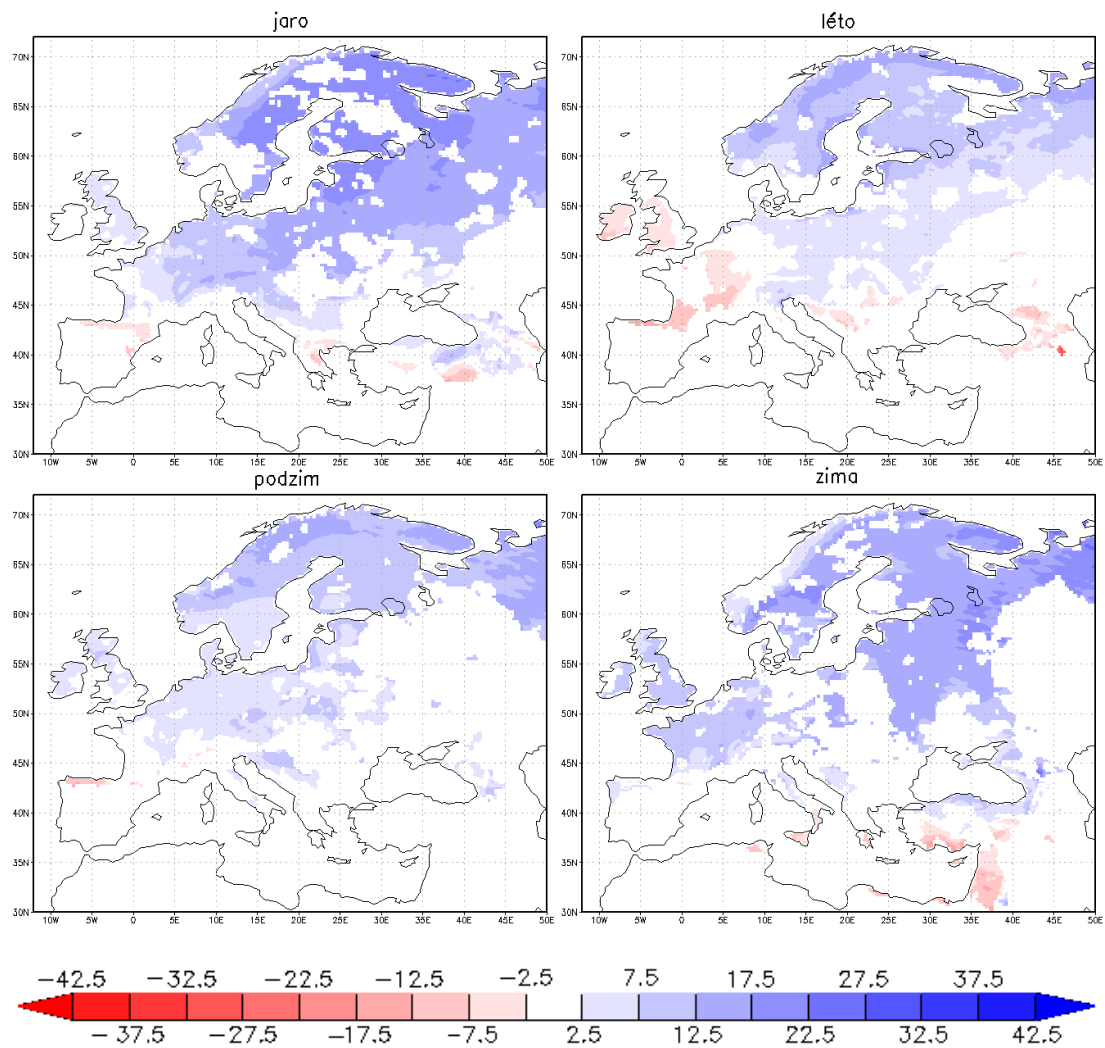
Z jednotlivých sezón jsou největší kladné odchylky patrné v zimě a na jaře, zatímco maximum záporných změn pozorujeme v létě.



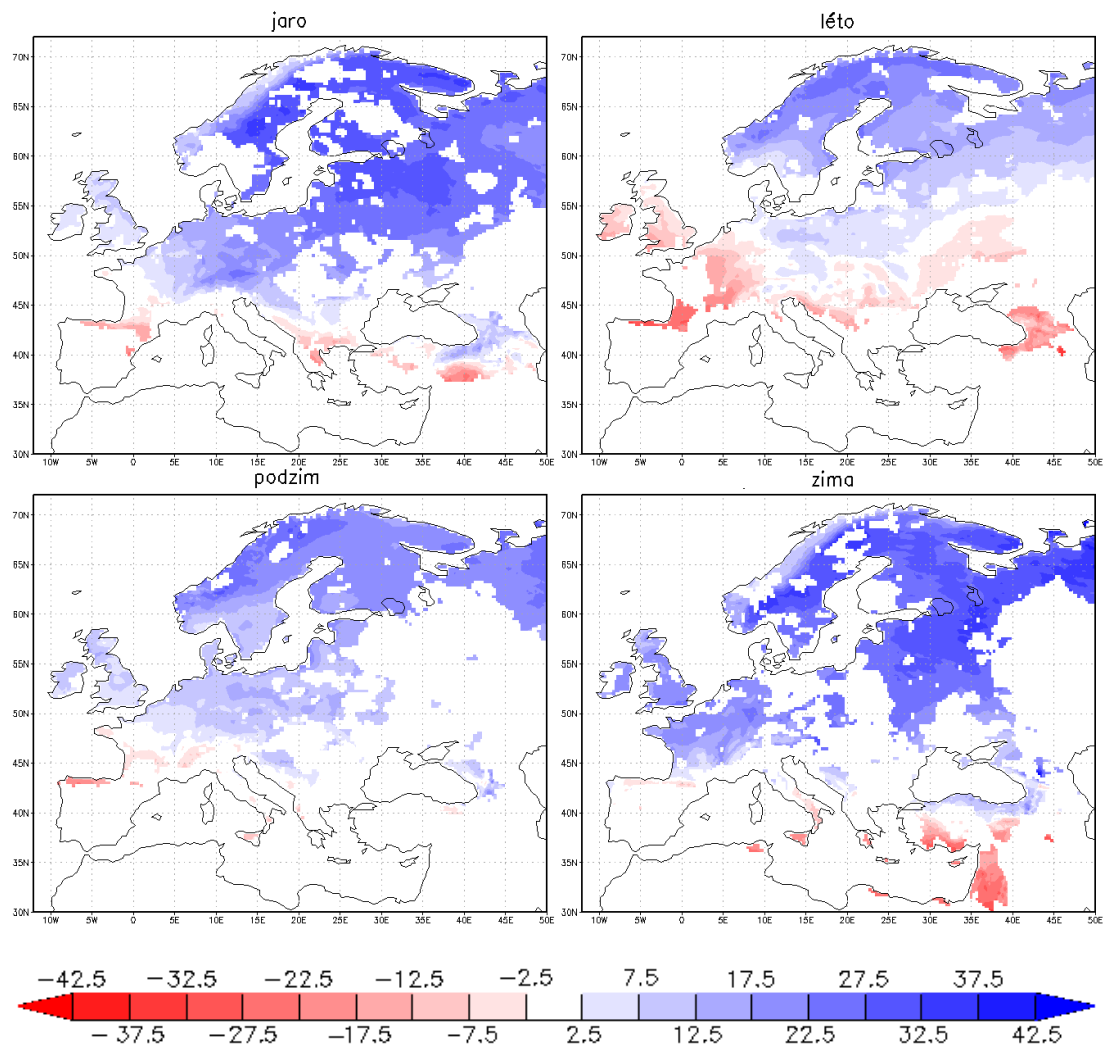
Obr. 30: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2021 – 2050 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5



Obr. 31: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2021 – 2050 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5



Obr. 32: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2071 – 2100 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5



Obr. 33: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2071 – 2100 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5



## **4. 6. Zhodnocení budoucího vývoje teplot pro jednotlivé modely**

### **4. 6. 1. Zhodnocení pomocí ročních chodů**

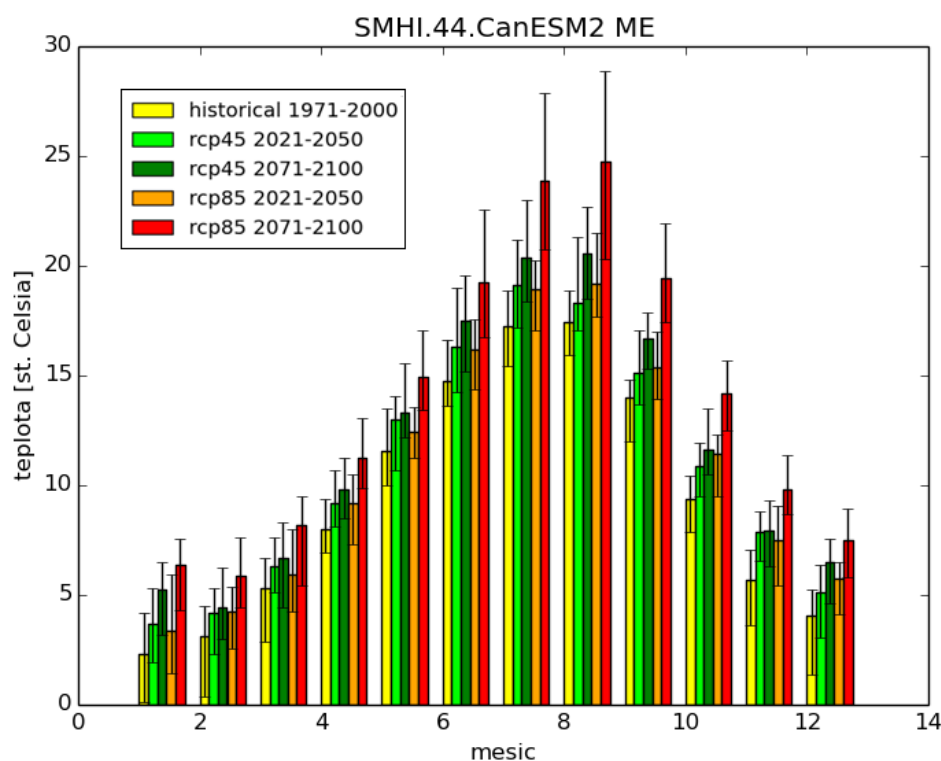
Roční chody teplot průměrované za období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) pro oblasti definované v Tab. 5 jsou pro regionální i globální klimatické modely založené na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 vykresleny v příloze G na příloženém CD v podobě sloupců s vyznačeným prvním a devátým decilem podle jednotlivých let.

Nejprve se zaměříme na globální klimatické modely, kterými jsou regionální modely z Euro-CORDEXu řízeny. Mezi nejteplejší GCM patří CanESM2 a HadGEM2-ES, následované modely IPSL-CM5A-MR a MIROC5. Nejnižší teploty naproti tomu vyplývají z modelu GFDL-ESM2M.

V kapitole 4. 4. 3 jsme zmiňovali náznak posunu maxima teplot z července do srpna. Ten je v náznaku patrný i u některých globálních modelů, v nejvíce oblastech u modelu MPI-ESM-LR, ale čteně také u NorESM1-M a GFDL-ESM2M. Posun minima z ledna do února u globálních modelů příliš často k nalezení není.

Teploty udávané regionálními modely jsou do značné míry podobné globálním modelům, kterými jsou tyto modely řízeny. Jako nejteplejší RCM lze označit KNMI.44.HadGEM2-ES, SMHI.11.HadGEM2-ES, SMHI.44.HadGEM2-ES, SMHI.44.CanESM2, SMHI.44.IPSL-CM5A-MR, SMHI.44.MIROC5 a SMHI.44.MPI. Nejchladnějším regionálním modelem je oproti tomu SMHI.44.GFDL-ESM2M a o něco méně chladné jsou ještě i KNMI.11.EC-EARTH, SMHI.44.CNRM-CM5 a SMHI.44.EC-EARTH.

Posun maxima a minima ročního chodu je ale nejlépe patrný u RCM instituce SMHI při řízení modely CanESM2 a EC-EARTH, přičemž u modelu SMHI.44.CanESM2 se náznak posunu maxima objevuje i při průměrování přes celou Evropu (region EU). Nejzřetelnější je ale tento posun u oblasti ME (viz Obr. 34).



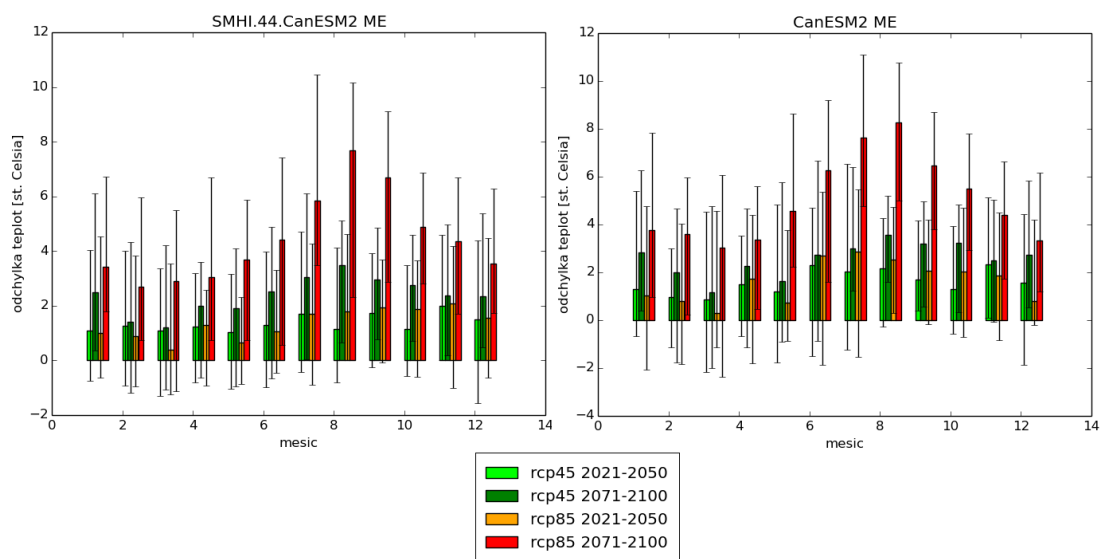
Obr. 34: Roční chody teplot pro období 2021 – 2050, 2071 – 2100 a normál 1971 – 2000 pro model SMHI.44.CanESM2 založený na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 v oblasti ME

Nyní se podíváme na roční chod samotných odchylek měsíčních teplot průměrovaných za období 2021 – 2050 (nebo 2071 – 2100) od teplot průměrovaných za normál 1971 – 2000. Ten je pro jednotlivé modely vyobrazen v příloze H na jednotce CD včetně vyznačení prvního a devátého decilu jednotlivých let.

Meziroční variabilita odchylek je poměrně malá, nejvyšší je v zimním období. Nejvyšší odchylky jsou pochopitelně patrné u scénáře RCP8.5 ve vzdálenějším období, ale u ostatních kombinací scénáře a období jsou odchylky u všech modelů opravdu výrazně nižší.

Roční chod odchylek má u globálních modelů maximum nejčastěji v pozdním létě (srpen). Výjimkou je oblast Skandinávie, u které jsou maximální odchylky teplot patrné v zimě. Nejlépe je tato skutečnost vidět u modelů CanESM2, HadGEM2-ES, NorESM1-M a MPI-ESM-LR. Tři z těchto modelů jsme zmiňovali už i při diskusi posunu maxima z července do srpna, ale model CanESM2, u kterého je srpnové maximum největší, mezi nimi nebyl. Důvodem je relativně velký teplotní rozdíl mezi červencem a srpnem v historickém období tohoto modelu.

Regionální klimatické modely roční chod odchylek ve většině případů kopírují z ročního chodu odchylek GCM, kterými jsou řízeny. Dobře je tento jev patrný například u modelu SMHI.44.CanESM2 (viz Obr. 35).



Obr. 35: Roční chody odchylek teplot pro období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od teplot pro normálové období 1971 – 2000 pro modely SMHI.44.CanESM2 a CanESM2 založené na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 v oblasti ME

#### **4. 6. 2. Zhodnocení pomocí plošných map**

Plošné mapy odchylek sezónních teplot za období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) a teplot normálového období 1971 – 2000 jsou pro globální a regionální modely založené na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 vyobrazené v příloze I na příložené jednotce CD.

Pomocí těchto map můžeme snadno rozhodnout, které modely simulují na základě emisních scénářů největší a které nejmenší změnu teplot. Z globálních modelů lze za nejmírnější označit model MPI-ESM-LR, dále relativně malou změnu dávají také modely GFDL-ESM2M, EC-EARTH a NorESM1-M. Na druhou stranu nejvyšší odchylky teplot plynou z modelů HadGEM2-ES a MIROC5, následované modely CanESM2, IPSL-CM5A-MR a CNRM-CM5.

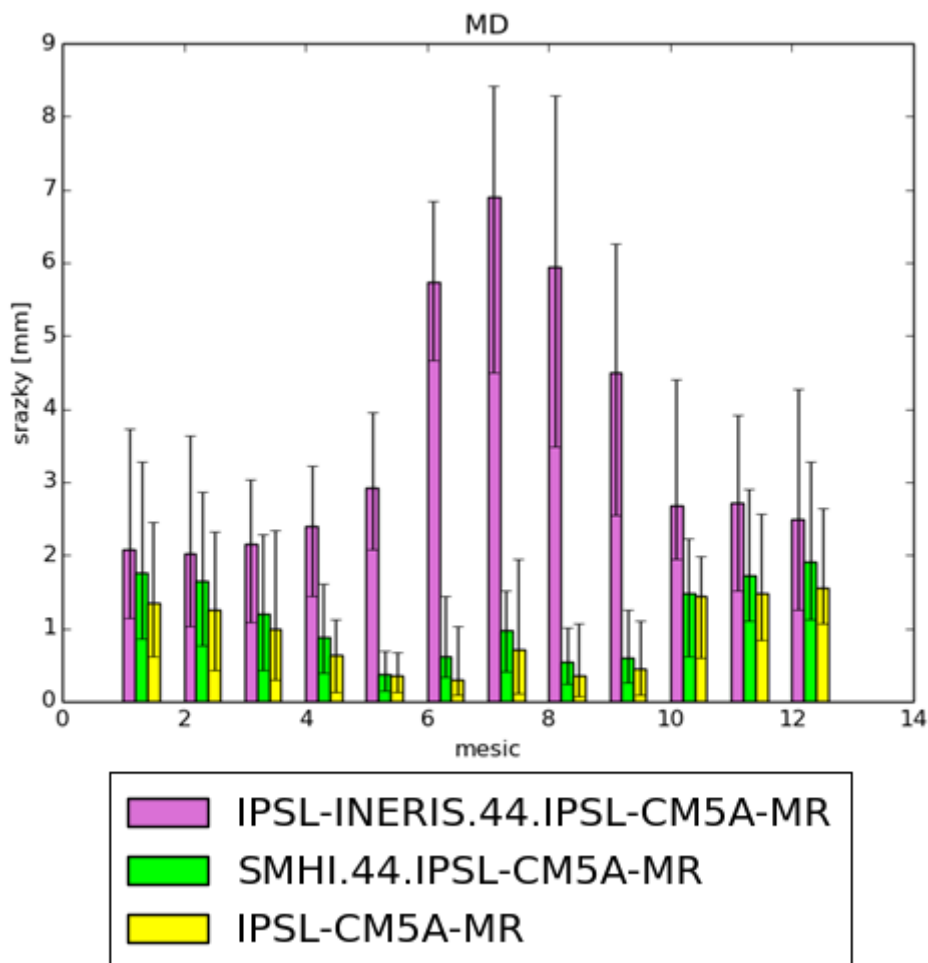
Regionální modely tuto velikost odchylek od svých řídicích modelů většinou přejímají. Viditelně nejmenší změnu simulují modely řízené modelem MPI-ESM-LR a největší kladné odchylky vykazují regionální modely, které jsou řízeny modely HadGEM2-ES, MIROC5 a IPSL-CM5A-MR.

Prostorové rozložení odchylek je u všech modelů dosti podobné a odpovídá již popisovanému rozložení průměrných odchylek (viz kapitola 4. 4. 4). Největší změny jsou tedy patrné na severovýchodě a nejmenší na jihozápadě. Výjimkou je letní sezóna, kdy se velké odchylky vyskytují také v blízkosti Středozemního moře.

## 4. 7. Zhodnocení budoucího vývoje srážek pro jednotlivé modely

### 4. 7. 1. Zhodnocení pomocí ročních chodů

Roční chody srážkových úhrnů průměrované za období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) pro oblasti definované v Tab. 5 jsou pro regionální a globální klimatické modely založené na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 vyobrazeny v příloze J na příloženém CD v podobě sloupců s vyznačeným prvním a devátým decilem podle jednotlivých let.



Obr. 36: Roční chody srážek pro období 2021 – 2050 pro RCM řízené globálním modelem IPSL-CM5A-MR založeném na scénáři RCP8.5 v oblasti MD

Obecně pozorujeme u jednoho modelu v dané oblasti u obou scénářů v obou časových periodách přibližné zachování ročního chodu srážek oproti historickému období. Nicméně u některých modelů pozorujeme zvýrazňování ročního chodu díky přírůstku srážek tam, kde měl chod i v referenčním období maximum, a úbytku srážek v měsících, ve kterých se v období 1971 – 2000 vyskytovalo minimum.

Z globálních modelů se tak děje zejména u CanESM2, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR a MPI-ESM-LR.

Stejně zvýrazňování ročního chodu pozorujeme také u regionálních modelů z Euro-CORDEXu, které jsou zmíněnými globálními modely řízeny. Zřetelný rozdíl globálního modelu a regionálního modelu řízeného tímto GCM je patrný pouze u modelu IPSL-CM5A-MR (viz Obr. 36), u kterého jsme už ale tuto neshodu pozorovali v historickém období (viz kapitola 4. 2. 1).

Ročním chodem odchylek se v této kapitole příliš zabývat nebudeme, jelikož je jejich meziroční variabilita a tedy i statistická významnost pro jednotlivé modely poměrně malá. Závěry by ovšem byly podobné závěrům učiněným v kapitole 4. 5. 3., kde jsme diskutovali chování celého souboru regionálních modelů.

#### **4. 7. 2. Zhodnocení pomocí plošných map**

Plošné mapy odchylek sezónních srážkových úhrnů za období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) a srážkových úhrnů za referenční období 1971 – 2000 jsou pro globální a regionální modely založené na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 vykresleny v příloze K na jednotce CD. Tyto odchylky jsou vyjádřeny relativně (v procentech) vůči hodnotám normálu.

U plošných map jednotlivých modelů obecně pozorujeme podobné rozložení odchylek jako u celého souboru regionálních modelů analyzovaného v kapitole 4. 5. 4, tedy kladné odchylky zejména na severozápadě a záporné na jihu. Největší kladné odchylky vycházejí při průměrování pro zimní a jarní období, největší záporné pak pro léto.

Z jednotlivých globálních modelů pozorujeme největší přírůstky srážek u modelu CanESM2 (s výjimkou léta, kdy jsou největší kladné odchylky patrné u modelu CNRM-CM5), největší snižování srážkových úhrnů u modelu HadGEM2-ES a minimální odchylky budoucích srážek od referenčních hodnot u modelu NorESM1-M.

Zajímavé je, že regionální modely z Euro-CORDEXu řízené výše zmíněnými GCM většinou nevykazují až tak velké kladné či záporné odchylky v porovnání s ostatními RCM. Z regionálních modelů jsou největší kladné odchylky predikovány u modelů řízených modely CNRM-CM5 a IPSL-CM5A-MR a největší záporné u modelů instituce MPI-CSC. Nejmenší změny jsou nicméně shodně s nejmenšími změnami v rámci GCM patrné u modelu SMHI.44.NorESM1-M.

#### 4. 8. Zhodnocení budoucího vývoje pro jednotlivé modely – shrnutí

Pro zhodnocení budoucího vývoje teploty a srážek dohromady byly obdobně jako u validace modelů do jednoho grafu vyneseny jak odchylky sezónních průměrů teplot budoucího období (2021 – 2050 nebo 2071 – 2100) od referenčního (1971 – 2000), tak odchylky mezi stejnými obdobími pro sezónní průměry srážek. Odchylky teplot jsou vynášeny na osu x, odchylky srážek uváděné relativně (v procentech) vůči hodnotám normálu na osu y. Pro modely založené na scénáři RCP8.5 v daleké budoucnosti (2071 – 2100) jsou tyto křížové grafy vyobrazeny na Obr. 37 (jaro), Obr. 38 (léto), Obr. 39 (podzim), Obr. 40 (zima) a pro oba scénáře (RCP4.5 a RCP8.5) i obě období (2021 – 2050 a 2071 – 2100) ještě kompletně v příloze L na přiloženém CD.

Jak již bylo uváděno v kapitolách 4. 4 a 4. 6, odchylky teplot jsou u všech scénářů pro všechny oblasti kladné, přičemž nejvyšší jsou pochopitelně pro scénář RCP8.5 při sledování vzdálenější budoucnosti. Ze všech modelů (globálních i regionálních) predikují největší oteplení nejčastěji modely MIROC5 a HadGEM2-ES.

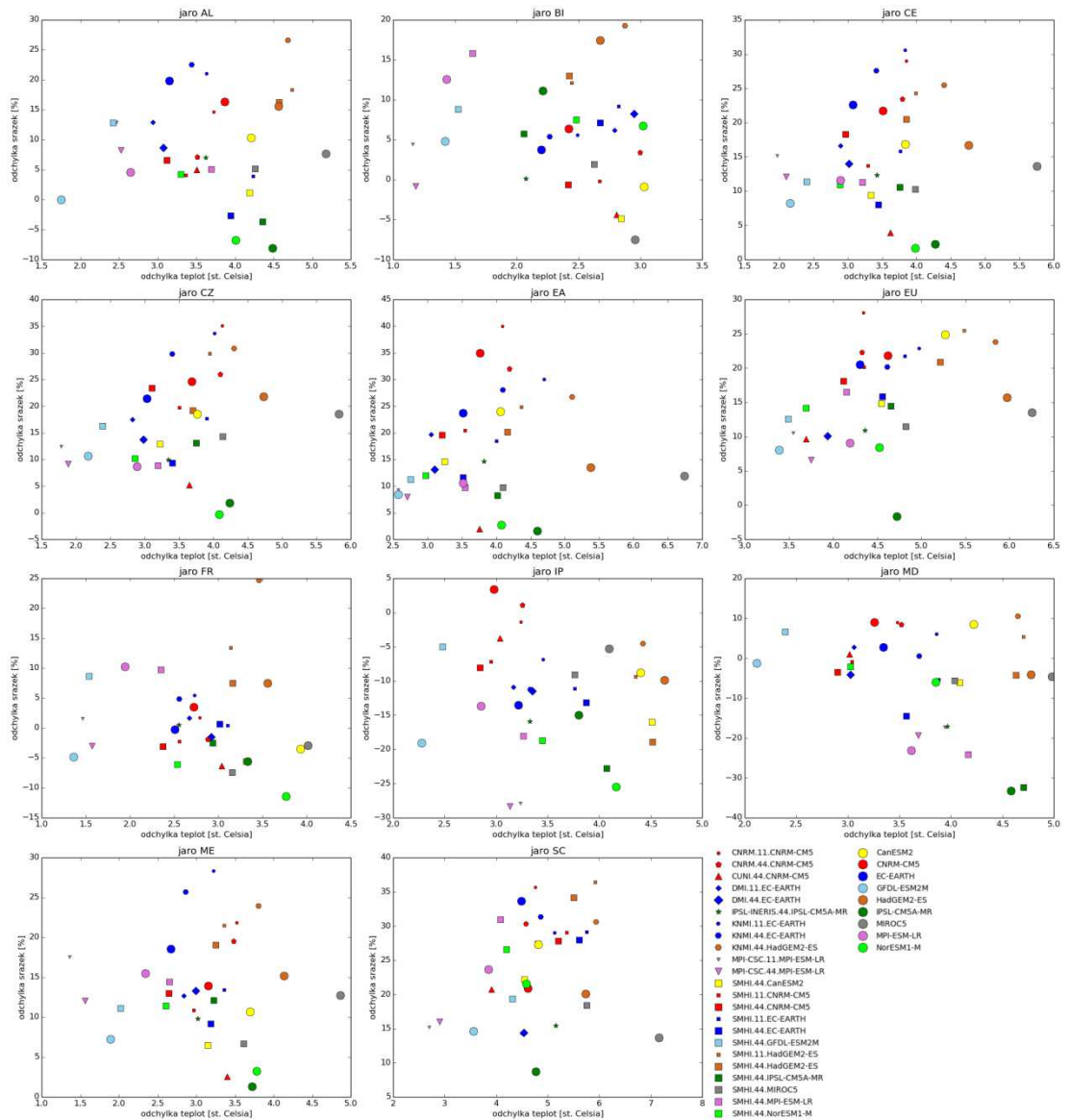
U srážek se naproti tomu objevují odchylky kladné i záporné (viz 4. 5 a 4. 7), přičemž jejich znaménko závisí především na zvolené oblasti a sezóně. V zimě prakticky ve všech oblastech dává většina modelů nárůst srážkových úhrnů, na jaře a na podzim už v jižních oblastech předpokládá o něco větší počet modelů úbytek srážek a v letním období jsou kladné odchylky doménou spíše jen oblastí Skandinávie a u oblastí střední a východní Evropy přisuzují jednotlivé modely odchylkám srážek znaménka různá.

Rozhodnout, které modely ve většině oblastí dávají ty největší odchylky (kladné či záporné), ale příliš nelze. Velké kladné odchylky jsou často patrné u modelů institucí SMHI a CNRM řízených globálním modelem CNRM-CM5, ale tato skutečnost rozhodně není pravidlem.

Obdobně jako v kapitole 4. 3 můžeme i zde zkoumat vzájemný vztah odchylek teploty a srážek. V létě u většiny oblastí pozorujeme, že modely, které předpokládají větší nárůst teplot, dávají menší kladnou nebo větší zápornou odchylku srážek v budoucnosti oproti normálu. Opačná situace platí pro zimu, kdy se větší oteplování vyskytuje u modelů s větším nárůstem srážkových úhrnů. Na podzim a na

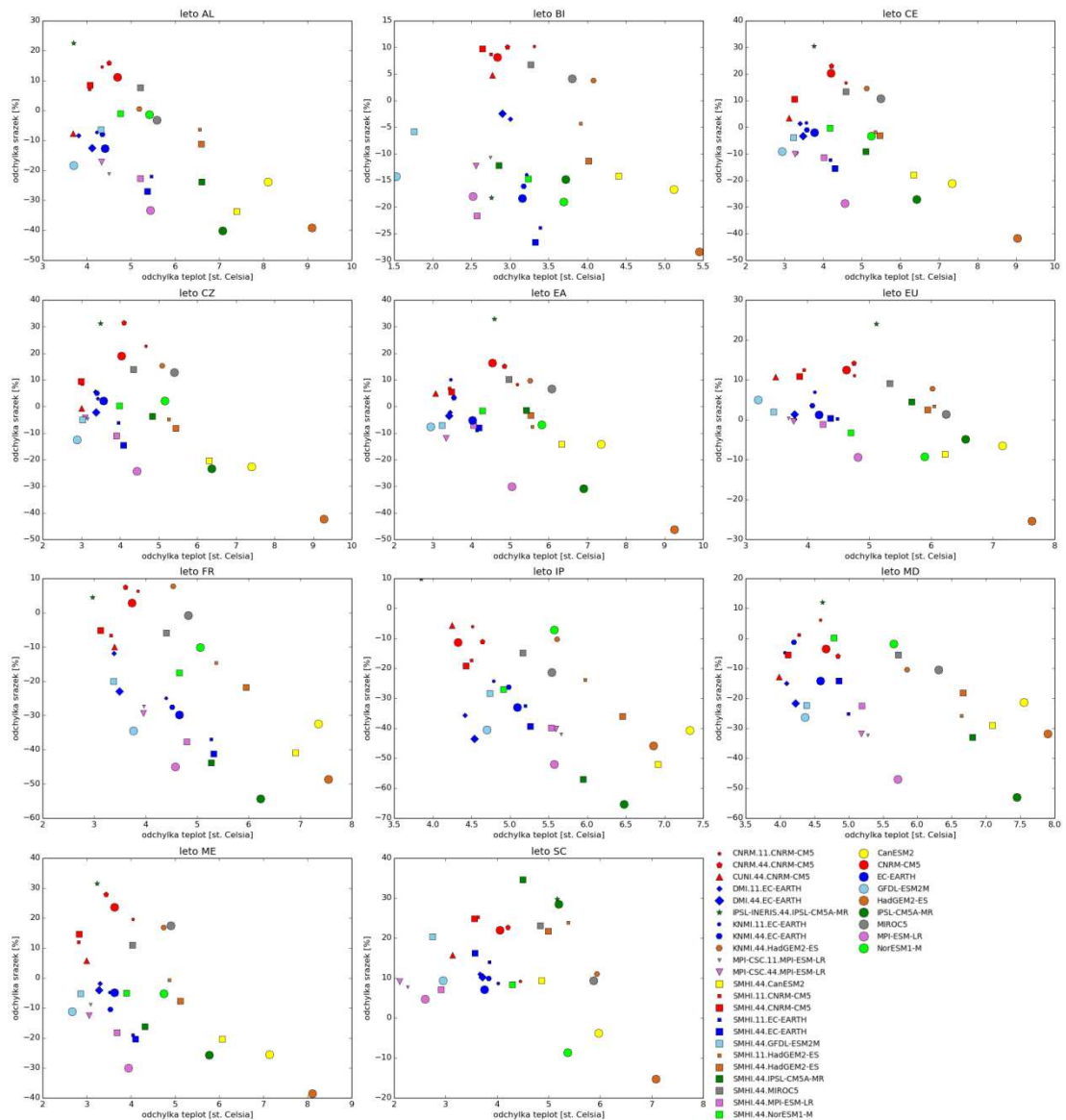
jaře není vztah mezi teplotou a srážkami až tak zřetelný, ale celkově je jaro více podobné zimě a podzim létu.

Na křížových grafech můžeme také jednoduše pozorovat nezanedbatelnou závislost regionálních klimatických modelů na globálních modelech, kterými jsou řízeny. RCM řízené jedním GCM (vyobrazené jednou barvou) se totiž v grafu často nacházejí blízko sebe.

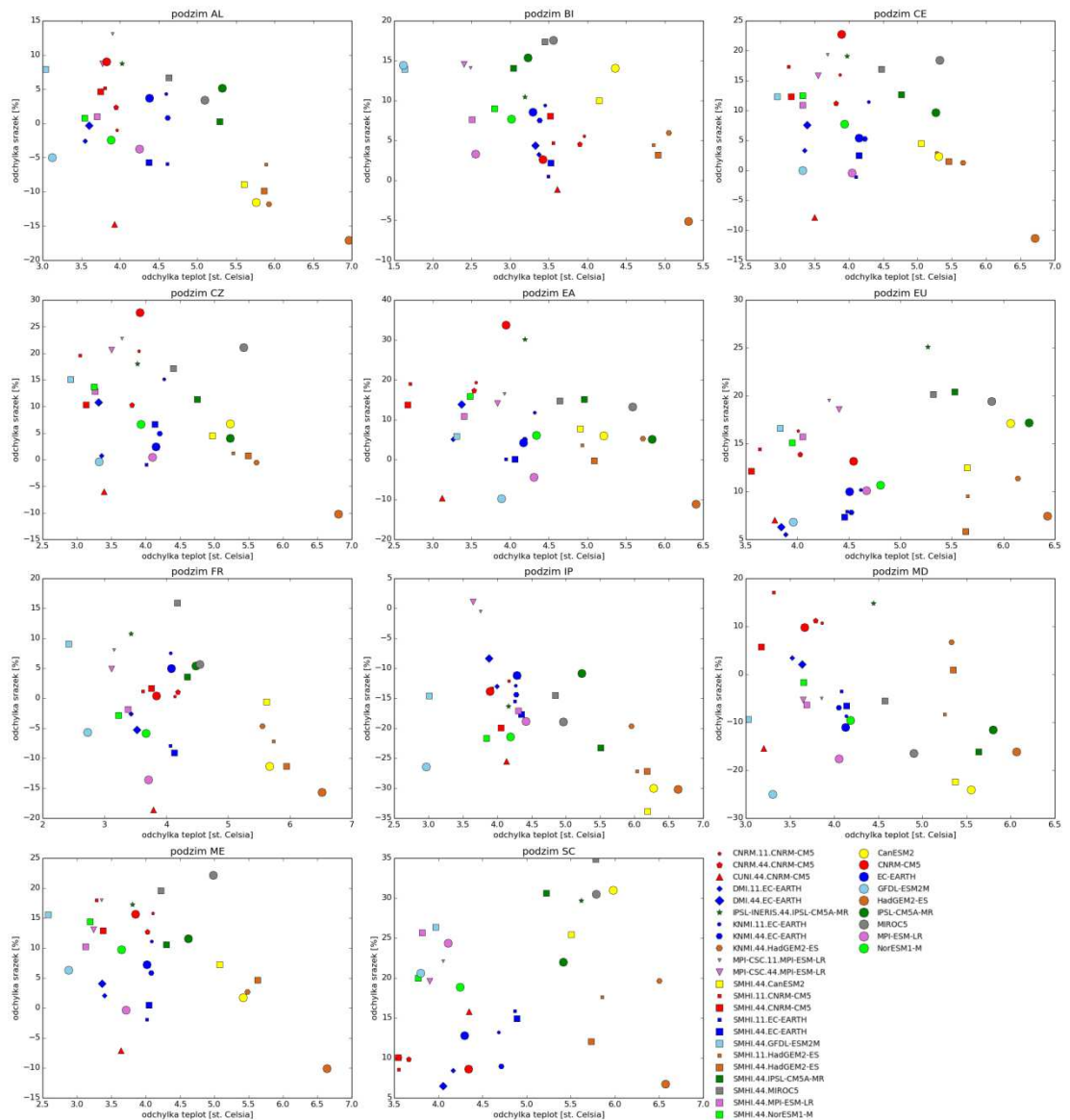


Obr. 37: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za jara období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za jara 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5

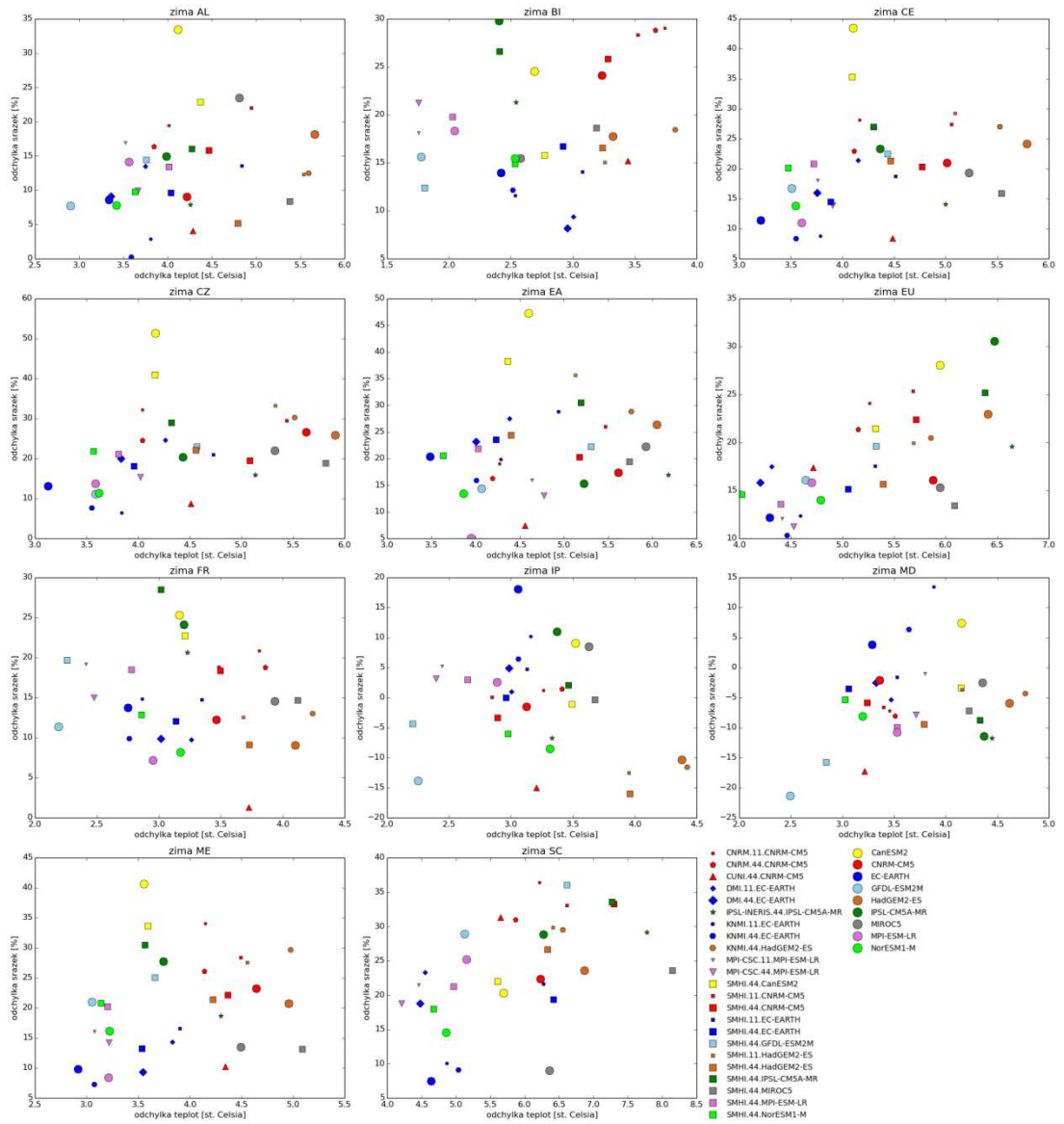




Obr. 38: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za léta období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za léta 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5



Obr. 39: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za podzim období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za podzimy 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5



Obr. 40: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za zimy období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za zimy 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5

## Závěr

V diplomové práci byly analyzovány výstupy z regionálních klimatických modelů z aktivity Euro-CORDEX v historických i budoucích bžích pro proměnné teplota a srážky.

Nejprve byly modely validovány na období 1989 – 2005 pomocí porovnání s databází E-OBS, která reprezentuje reálné hodnoty naměřené na stanicích (kapitoly 4. 1, 4. 2 a 4. 3). Pro zhodnocení vlivu globálních modelů, kterými jsou RCM z Euro-CORDEXu řízeny, a vlivu samotných parametrizací v RCM byly s hodnotami E-OBS porovnávány také vybrané globální klimatické modely z projektu CMIP5 a regionální klimatické modely z Euro-CORDEXu řízené re-analýzou.

V další části práce byly hodnoceny modelové simulace z Euro-CORDEXu pro 21. století založené na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5 pro každý model zvlášť (kapitoly 4. 6, 4. 7 a 4. 8) i pro všechny tyto modely jako skupinu (kapitoly 4. 4 a 4. 5). Pro analýzu byla vybrána období 2021 – 2050 (blízká budoucnost), 2071 – 2100 (daleká budoucnost) a jako normál bylo zvoleno období 1971 – 2000. Pro porovnání byly analyzovány také výstupy pro scénáře RCP4.5 a RCP8.5 z modelů projektu CMIP5.

Teploty se na období 1989 – 2005 dobře shodují s pozorováním, přičemž nejlepší shodu pozorujeme u RCM řízených re-analýzou. Odchylky jednotlivých RCM jsou kladné i záporné s tím, že jejich roční chod až na modely instituce MPI-CSC kopíruje roční chod GCM, kterými jsou řízeny (viz 4. 1. 1). Prostorově je obecně více teplotně nadhodnocovaný jih (zejména u globálních modelů CanESM2 a MIROC5), přičemž nejvýraznější je toto nadhodnocování v letní sezóně. Záporné odchylky jsou patrné hlavně v zimě a nejlépe se modely s pozorováním shodují na podzim. Celkově je velikost odchylek mezi modely a E-OBSem závislá především na korelaci mezi oběma datovými soubory.

U srážek je shoda modelů s pozorováním o poznání horší, zejména se u některých modelů (CNRM.11.CNRM-CM5, CNRM.44.CNRM-CM5, IPSL-INERIS.44.IPSL-CM5A-MR) vyskytuje problém u oblastí s letním minimem srážek. Nejlépe roční chod srážek podchycují globální modely EC-EARTH, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR a MPI-ESM-LR. Z regionálních modelů se s pozorováním nejlépe shodují modely od instituce KNMI řízené modelem EC-EARTH nebo re-analýzou.

Celkově je pro modely typické spíše nadhodnocování srážek, které je nejvýraznější na jaře. Největší záporné odchylky jsou naproti tomu patrné v letní sezóně. Důvodem odchylek jsou většinou stejně jako u teplot nízké korelace.

U klimatického signálu emisních scénářů bylo v analyzovaném období vyzorováno přibližně lineární zvyšování teplot, výraznější u scénáře RCP8.5. Obecně jsou změny teplot největší na severovýchodě Evropy a nejmenší na jihozápadě, přičemž roční chod těchto změn má na severovýchodě maximum v zimě a na jihu v létě. V ročním chodu teplot je nejzajímavější posun maxima a minima směrem doprava oproti referenčnímu období, který je u některých modelů patrný (viz 4. 7. 1).

Změny srážek v budoucím klimatu jsou oproti teplotním změnám méně triviální. Přibývání srážek je patrné na severu Evropy a ubývání na jihu, přičemž v létě se hranice mezi kladnými a zápornými změnami posouvá poněkud severněji.

## Seznam použité literatury

- [1] Český hydrometeorologický ústav: *Změna klimatu – základní informace*. <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zmena-klimatu/zakladni-informace>. 2016
- [2] The Heartland Institute. *Global Climate Models and their Limitations*. 2013
- [3] EURO-CORDEX: *New high-resolution climate change projections for European impact research*. 2014. doi: 10.1007/s10113-013-0499-2
- [4] Jones, R. G.; Noguera, M.; Hassell, D. C.; Hudson, D.; Wilson, S. S.; Jenkins, G. J.; Mitchell, J. F. B. (Met Office Hadley Centre). *Generating higher resolution climate change scenarios using PRECIS*. Exeter, UK, 2004
- [5] Karl E. Taylor, Ronald J. Stouffer, Gerald A. Meehl: *An overview of CMIP5 and the experiment design*. 2012. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- [6] Giorgi, F.; Jones, C.; Asrar, R. *Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework*. 2009. WMO Bulletin 58 (3) – July.
- [7] CORDEX domains for model integrations (updated on 17/06/13)
- [8] Project team ACA&D, Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI. *European Climate Assessment & Dataset*. 2013
- [9] Haylock, M. R.; Hofstra, N.; Klein, Tank A. M. G.; Klok, E. J.; Jones, P. D.; New, M. *A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation*. 2008. J Geophys Res (Atmospheres) 113, D20119, doi: 10.1029/2008JD10201
- [10] Vautard, R.; Gobiet, A.; Jacob, D.; Belda, M.; Colette, A.; Déqué, M.; Fernández, J.; García-Díez, M.; Goergen, K.; Güttler, I.; Halenka, T.; Karacostas, T.; Katragkou, E.; Keuler, K.; Kotlarski, S.; Mayer, S.; Meijgaard, E.; Nikulin, G.; Patarčić, M.; Scinocca, J.; Sobolowski, S.; Suklitsch, M.; Teichmann, C.; Warrach-Sagi, K.; Wulfmeyer, V. & Yiou, P. *The simulation of European heatwaves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project Climate Dynamics*. Springer-Verlag, 2013. 1-21
- [11] Rockel and Worth. *Extremes of Near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations*. 2007. ClimateChange, doi: 10.1007/s10584-006-9227-y
- [12] Taylor, K. E. *Taylor Diagram Primer*. 2005
- [13] *Wikipedie: Kvantil*. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kvantil>. 2016

## Seznam tabulek

Tab. 1: Definice domény Evropa v rámci CORDEX.....	7
Tab. 2: Modely z Euro-CORDEXu použité pro analýzu .....	8
Tab. 3: Parametrizační schémata použitých modelů z Euro-CORDEXu .....	9
Tab. 4: Parametrizační schémata použitých modelů z Euro-CORDEXu, 2. část .....	9
Tab. 5: Definice regionů pro analýzy. LP: levý poledník, PP: pravý poledník, DR: dolní rovnoběžka, HR: horní rovnoběžka.....	10
Tab. 6: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných jarních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných jarních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5..	37
Tab. 7: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných letních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných letních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5..	37
Tab. 8: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných podzimních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných podzimních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5.....	38
Tab. 9: Dolní a horní kvartil odchylek průměrných zimních teplot v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných zimních teplot v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5..	38
Tab. 10: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných jarních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných jarních srážkových úhrnů v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro- CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5.....	49
Tab. 11: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných letních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných letních srážkových úhrnů v období 1971 –	

2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5..... 49

Tab. 12: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných podzimních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných podzimních srážkových úhrnů v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5..... 50

Tab. 13: Dolní a horní kvartil odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) průměrných zimních srážkových úhrnů v období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od průměrných zimních srážkových úhrnů v období 1971 – 2000 vypočtený ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5..... 50



## Seznam obrázků

Obr. 1: Parametry pro popis domény .....	6
Obr. 2: Domény CORDEX .....	7
Obr. 3: Regiony dle PRUDENCE.....	11
Obr. 4: Roční chody odchylek průměrných měsíčních teplot za období 1989 – 2005 mezi regionálními modely od instituce MPI-CSC a E-OBS pro oblast EU.....	14
Obr. 5: Plošné mapy odchylek průměrných letních teplot za období 1989 – 2005 pro modely CNRM-CM5, CNRM.11.ERA, CNRM.11.CNRM-CM5.....	16
Obr. 6: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech v období 1989 – 2005.....	19
Obr. 7: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro jarní měsíce z období 1989 – 2005 .....	20
Obr. 8: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro letní měsíce z období 1989 – 2005 .....	21
Obr. 9: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro podzimní měsíce z období 1989 – 2005.....	22
Obr. 10: Taylorovy diagramy pro teploty v měsíčních průměrech pro zimní měsíce z období 1989 – 2005.....	23
Obr. 11: Roční chody srážek průměrované za období 1989 – 2005 pro modely od instituce IPSL-INNERIS, globální model IPSL-CM5A-MR a E-OBS.....	25
Obr. 12: Plošné mapy relativních odchylek zimních srážek za období 1989 – 2005 pro modely CNRM-CM5, CNRM.11.ERA a CNRM.11.CNRM-CM5 .....	27
Obr. 13: Taylorovy diagramy pro srážky v měsíčních průměrech v období 1989 – 2005.....	28
Obr. 14: Křížové grafy průměrných jarních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005 .....	30
Obr. 15: Křížové grafy průměrných letních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005 .....	31
Obr. 16: Křížové grafy průměrných podzimních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005 .....	32
Obr. 17: Křížové grafy průměrných zimních teplot (osa x) a srážek (osa y) za období 1989 – 2005 .....	33

Obr. 18: Budoucí vývoj průměrných ročních teplot v období 2006 – 2100 podle souboru klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech dle PRUDENCE .....	34
Obr. 19: Budoucí vývoj průměrných ročních teplot v období 2006 – 2100 podle souboru klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech stanovených teleskopicky .....	35
Obr. 20: Roční chody teplot pro období 2021 – 2050, 2071 – 2100 a normál 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 .....	40
Obr. 21: Roční chody průměrných odchylek teplot pro období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od teplot pro normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 .....	41
Obr. 22: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2021 – 2050 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5 .....	42
Obr. 23: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2021 – 2050 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5 .....	43
Obr. 24: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2071 – 2100 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5 .....	44
Obr. 25: Plošné mapy průměrných odchylek sezónních teplot za období 2071 – 2100 a teplot za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5 .....	45
Obr. 26: Budoucí vývoj průměrných ročních srážek v období 2006 – 2100 podle souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech dle PRUDENCE .....	46

- Obr. 27: Budoucí vývoj průměrných ročních srážek v období 2006 – 2100 podle souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na RCP4.5 a RCP8.5 v regionech stanovených teleskopicky... 47
- Obr. 28: Roční chody srážek průměrované za období 2021 – 2050, 2071 – 2100 a normál 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 .... 52
- Obr. 29: Roční chody průměrných odchylek (vyjádřených relativně vůči normálu) srážkových úhrnů pro období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od srážkových úhrnů pro normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních klimatických modelů z Euro-CORDEXu založených na scénářích RCP4.5 a RCP8.5..... 53
- Obr. 30: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2021 – 2050 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5..... 55
- Obr. 31: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2021 – 2050 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5..... 56
- Obr. 32: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2071 – 2100 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP4.5..... 57
- Obr. 33: Plošné mapy průměrných odchylek (vyjádřených v procentech vůči normálu) sezónních srážek za období 2071 – 2100 a srážek za normálové období 1971 – 2000 vypočtené ze souboru regionálních modelů z Euro-CORDEXu založených na emisním scénáři RCP8.5..... 58
- Obr. 34: Roční chody teplot pro období 2021 – 2050, 2071 – 2100 a normál 1971 – 2000 pro model SMHI.44.CanESM2 založený na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 v oblasti ME ..... 60
- Obr. 35: Roční chody odchylek teplot pro období 2021 – 2050 (respektive 2071 – 2100) od teplot pro normálové období 1971 – 2000 pro modely SMHI.44.CanESM2 a CanESM2 založené na scénářích RCP4.5 a RCP8.5 v oblasti ME ..... 61

- Obr. 36: Roční chody srážek pro období 2021 – 2050 pro RCM řízené globálním modelem IPSL-CM5A-MR založeném na scénáři RCP8.5 v oblasti MD... 63
- Obr. 37: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za jara období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000..... (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za jara 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5..... 66
- Obr. 38: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za léta období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000..... (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za léta 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5..... 67
- Obr. 39: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za podzimy období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000..... (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za podzimy 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5..... 68
- Obr. 40: Křížové grafy odchylek teplot průměrovaných za zimy období 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000..... (osa x) a relativních odchylek srážek průměrovaných za zimy 2071 – 2100 od referenčního období 1971 – 2000 (osa y) pro modely založené na scénáři RCP8.5..... 69

## Seznam použitých zkratk

AGCM	Model všeobecné cirkulace atmosféry (z anglického <u>A</u> tmospheric <u>G</u> eneral <u>C</u> irculation <u>M</u> odel)
AOGCM	Model atmosféricko-oceánské cirkulace (z anglického <u>A</u> tmosphere- <u>O</u> cean <u>G</u> eneral <u>C</u> irculation <u>M</u> odel), spojení AGCM a OGCM
AL	Oblast Alpy dle projektu PRUDENCE
BI	Oblast Britské ostrovy dle projektu PRUDENCE
CE	Oblast Střední Evropa stanovená teleskopicky
CMIP5	Projekt skupiny WGCM zabývající se vytvářením GCM (z anglického <u>C</u> limate <u>M</u> odel <u>I</u> ntercomparison <u>P</u> roject)
CORDEX	Rámcová aktivita WCRP pro vývoj a koordinaci RCM (z anglického the <u>C</u> oordinated <u>R</u> egional climate <u>D</u> ownscaling <u>E</u> xperiment)
CZ	Oblast Česká republika stanovená teleskopicky
EA	Oblast Východní Evropa dle projektu PRUDENCE
ECA&D	Evropská klimatologická společnost (z anglického the <u>E</u> uropean <u>C</u> limate <u>A</u> ssessment & <u>D</u> ataset project)
ECMWF	Evropské centrum pro předpověď počasí (z anglického the <u>E</u> uropean <u>C</u> entre for <u>M</u> edium- <u>R</u> ange <u>W</u> eather <u>F</u> orecast)
E-OBS	Mřížková verze pozorovaných dat
ESD	Metoda empiricko-statistického downscalingu (z anglického <u>E</u> mpirical- <u>S</u> tatistical <u>D</u> ownscaling)
ESM	Model systému Země (z anglického <u>E</u> arth <u>S</u> ystem <u>M</u> odel)
EU	Oblast Evropa stanovená teleskopicky
Euro-CORDEX	Evropská doména aktivity CORDEX
FR	Oblast Francie dle projektu PRUDENCE
GCM	Globální klimatický model (z anglického <u>G</u> lobal <u>C</u> limate <u>M</u> odel)
IP	Oblast Pyrenejský poloostrov dle projektu PRUDENCE
MD	Oblast Středomoří dle projektu PRUDENCE
ME	Oblast Střední Evropa dle projektu PRUDENCE

OGCM	Model všeobecné oceánské cirkulace (z anglického <u>O</u> cean <u>G</u> eneral <u>C</u> irculation <u>M</u> odel)
RCM	Regionální klimatické model (z anglického <u>R</u> egional <u>C</u> limate <u>M</u> odel)
RCPs	Cesty referenčních koncentrací pro vytváření klimatických scénářů (z anglického <u>r</u> eference <u>c</u> oncentration <u>p</u> athways)
RCP4.5	Reprezentativní směr vývoje koncentrací se stabilizační hladinou 4,5 Wm <sup>-2</sup>
RCP8.5	Reprezentativní směr vývoje koncentrací se stabilizační hladinou 8,5 Wm <sup>-2</sup>
SC	Oblast Skandinávie dle projektu PRUDENCE
WGCM	Pracovní skupina pod institucí WCRP (z anglického <u>W</u> orking <u>G</u> roup on <u>C</u> oupled <u>M</u> odeling)
WCRP	Celosvětová meteorologická instituce (z anglického <u>W</u> orld <u>C</u> limate <u>R</u> esearch <u>P</u> rogram)