



MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA  
Univerzita Karlova

## DIPLOMOVÁ PRÁCA

Jakub Hudek

# Reprezentácia kontinentality v regionálnych klimatických modeloch

Katedra fyziky atmosféry

Vedúci diplomovej práce: Mgr. Michal Belda, Ph.D.

Študijný program: Fyzika

Študijný obor: Meteorológia a klimatológia

Praha 2021

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

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 ..... dne .....

.....

Podpis autora

Chcel by som sa týmto poďakovať vedúcemu práce Mgr. Michalovi Beldovi, Ph. D. za trpezlivosť, cenné rady, pripomienky a čas venovaný konzultáciám ohľadom tejto diplomovej práce a za pomoc pri zaobstarávaní ťažšie dostupnej literatúry a pri úpravách dát pomocou programu CDO.

**Názov práce:** Reprezentácia kontinentality v regionálnych klimatických modeloch

**Autor:** Jakub Hudek

**Katedra:** Katedra fyziky atmosféry

**Vedúci diplomovej práce:** Mgr. Michal Belda, Ph. D., Katedra fyziky atmosféry

**Abstrakt:** Kontinentalita podnebia je jedným zo základných fenoménov podnebia, popisujúcim klímu na danom mieste z hľadiska zmien základných meteorologických prvkov počas roka, akými sú teplota, zrážky, atď. Jej miera býva obvykle vyjadrená pomocou indexov a býva určovaná buď na základe pozorovaní pomocou zozbieraných dát alebo simulovaná pomocou klimatických modelov. Cieľom je obvykle zistiť schopnosť klimatických modelov reprezentovať súčasnú klímu, resp. určiť a analyzovať scenáre možného budúceho vývoja pre Európu ako skúmanú oblasť. V tejto diplomovej práci sú stručne predstavené pojmy ako kontinentalita, jej indexy, globálne a regionálne klimatické modely, reanalýza ERA-Interim ako aj iniciatíva EURO-CORDEX. Následne sú spracované a analyzované jednotlivé simulácie a porovnávané s pozorovaniami podľa dátového súboru E-OBS.

**Kľúčové slová:** kontinentalita, regionálny klimatický model, modelová validace, klimatické scénáre

**Title:** Continentality representation in regional climate models

**Author:** Jakub Hudek

**Department:** Department of Atmospheric Physics

**Supervisor:** Mgr. Michal Belda, Ph. D., Department of Atmospheric Physics

**Abstract:** Continentality of climate is one of the basic climate phenomena, describing the climate at current place according to annual changes of basic meteorological elements such as temperature, precipitation, etc. Its measure is usually expressed by indices and is being determined either according to observations using collected data or simulated by climate models. The goal is usually to determine the ability of climate models to represent the present state of climate and to determine and analyse the scenarios of future evolvement for Europe as an examined area. In present diploma thesis are briefly introduced terms like continentality, its indices, global and regional climate models, the ERA-Interim reanalysis, as well as the EURO-CORDEX initiative. Subsequently individual simulations are processed, analysed and compared with the observations according to the E-OBS dataset.

**Keywords:** continentality, regional climate model, model validation, climate scenarios

# Obsah

Úvod .....	2
<b>1. Teoretický úvod .....</b>	<b>3</b>
1.1 Kontinentalita .....	3
1.2 Pozorovania a E-OBS .....	5
<b>2. Klimatické modely .....</b>	<b>8</b>
2.1 Globálne klimatické modely .....	8
2.2 Regionálne klimatické modely .....	9
2.3 ERA-Interim .....	11
2.4 Iniciatíva EURO-CORDEX .....	12
2.5 Prehľad použitých modelov.....	14
<b>3. Modelové výstupy .....</b>	<b>17</b>
3.1 Simulácie ERA-Interim .....	17
3.2 Regionálne simulácie riadené globálnymi, historické .....	23
3.3 Regionálne simulácie riadené globálnymi, budúce .....	30
<b>4. Zhrnutie výsledkov .....</b>	<b>47</b>
4.1 Historické simulácie a ERA-Interim .....	47
4.2 Budúce simulácie .....	50
<b>5. Záver .....</b>	<b>52</b>
<b>Použitá literatúra .....</b>	<b>53</b>
<b>Zoznam obrázkov .....</b>	<b>55</b>
<b>Zoznam tabuliek .....</b>	<b>56</b>
<b>Zoznam použitých skratiek .....</b>	<b>57</b>
<b>Prílohy .....</b>	<b>58</b>

# Úvod

Kontinentalita podnebia predstavuje jednu zo základných charakteristík podnebia, ktorá je podmienená pôsobením pevniny a oceánu. Jej miera je charakteristická nárastom od oceánu smerom do vnútra pevniny pričom sa výrazne a významne prejavuje v ročnom aj dennom chode množstva klimatických a meteorologických prvkov. Jedným z kontinentov kde je rozloženie miery kontinentality veľmi rozmanité a kde sa jej charakteristiky z priestorového hľadiska významne menia je Európa. Teplý Severoatlantický prúd obmývajúci západné pobrežia Európy je významným klimatotvorným činiteľom v danej oblasti a je zodpovedný za výrazne odlišné podnebie západného pobrežia v porovnaní s oblasťami hlbšie vo vnútrozemí.

Miera kontinentality reprezentovaná rôznymi indexami býva obvykle určená na základe pozorovaní, meraní a rôznych výpočtov za určité obdobie. Okrem toho však môže byť simulovaná pomocou rôznych klimatických modelov, ktoré majú veľký význam hlavne pri predikcii do budúcnosti. Veľký význam pre oblasť Európy majú hlavne regionálne klimatické modely, ktoré poskytujú informácie vo vysokých gridových rozlíšeniach vhodných pre štúdie regionálnych fenoménov a vplyvov na podnebie (Christensen et al., 1997, Giorgi, 2019).

Táto práca je zameraná hlavne na termickú kontinentalitu v Európe, jej indexy a ich reprezentáciu v regionálnych klimatických modeloch. Jednotlivé indexy sú určené na základe týchto modelov pre určité 30-ročné obdobia jednak historické, ktoré sú porovnateľné s pozorovaniami a budúce, podľa scenárov vývoja do konca 21. storočia. Okrem toho pracuje so simuláciami v dvoch rozlíšeniach ( $0,11^\circ$  a  $0,44^\circ$  zem. šírky resp. dĺžky).

Práca je rozčlenená do niekoľkých častí. V prvej kapitole sú krátko predstavené základné informácie o danej téme, teda o termickej kontinentalite, indexoch, ktoré určujú jej mieru. Ďalej je popísaný spôsob a zdroj získavania klimatologických dát z jednotlivých staníc v Európe potrebných pre evaluáciu kontinentality (dátový súbor E-OBS). Na základe toho je spracované grafické znázornenie indexov pomocou dát zo súboru E-OBS a spôsob úpravy dát pre tento účel.

Druhá kapitola sa zaoberá samotnými simuláciami. Sú tu podrobne rozobrané jednotlivé regionálne modely použité pri simuláciách, taktiež globálne modely a reanalýza ERA-Interim, ktorými sú jednotlivé regionálne modely riadené. Ďalej predstavenie iniciatívy EURO-CORDEX, ktorá sa danou problematikou a regionálnym klimatickým modelovaním (downscalingom) pre Európu zaoberá.

V tretej kapitole sú podrobne spracované a popísané samotné výsledky, ktoré sú číselne aj graficky spracované. Konkrétne sa jedná o modelové simulácie jednotlivých indexov kontinentality, ich podrobná analýza aj porovnanie s pozorovaniami, teda schopnosť reprezentovať súčasnú klímu v simuláciách riadených reanalýzou. Dôraz je kladený aj na scenáre možného budúceho vývoja v simuláciách globálnych modelov. V štvrtej kapitole sú jednotlivé výsledky zhrnuté a učená je tiež ich podrobná diskusia. V poslednej piatej kapitole je zo získaných výsledkov, z ich zhrnutia a podrobnej diskusie učený záver.

# 1. Teoretický úvod

Hlavnou témou tejto práce je kontinentalita. V tejto kapitole sú popísané základné pojmy akými sú kontinentalita, jej charakteristiky, vyjadrenia pomocou rôznych indexov, ktoré sú použité a analyzované v tejto práci. Dôraz je kladený hlavne na ich definíciu a závislosť od jednotlivých klimatických faktorov. Takisto dáta, ktoré sú pre tento účel potrebné a sú k dispozícii. Okrem toho sú rozpracované aj mapy rozložení jednotlivých indexov v Európe na základe uvedených dát, čo následne slúži pre analýzu s modelovými výstupmi.

## 1.1 Kontinentalita

Podnebie svetových kontinentov je veľmi rozmanité a ovplyvňované mnohými faktormi ako napr. slnečná radiácia, prevládajúce prúdenie vetra atď. No značný vplyv na ich podnebie má aj rozloženie oceánov ako aj rozloženie a tvar samotných kontinentov. Oceán pôsobí ako tepelný zotrvačník hlavne v oblastiach západných brehov kontinentov v miernom podnebnom pásme severnej pologule. Smerom do vnútrozemia jeho vplyv klesá a začína sa prejavovať vplyv pevniny a fenomén, ktorý nazývame kontinentalita.

Kontinentalitu chápeme ako akýsi súhrn vlastností klímy, ktoré sú podmienené pôsobením pevniny na procesy genézie klímy (Český meteorologický slovník, 1993). Charakteristický je nárast so vzdialenosťou od oceánu smerom do pevniny, čo je v protiklade s tzv. oceanitou, opakom kontinentality. Okrem oblastí hlboko vo vnútrozemí je kontinentálne aj podnebie východných brehov obmývaných studenými morskými prúdmi. Okrem vzdialenosti od oceánu závisí aj na mnohých iných faktoroch (napr. reliéf krajiny). Kontinentalita ovplyvňuje variabilitu v ročnom a prípadne aj v dennom chode klimatických prvkov, akými sú napr. teplota, tlak, zrážky atď. Podľa toho rozlišujeme 3 základné typy kontinentality a to termickú, založenú na ročnej amplitúde teploty (Hudek, 2017, 2018), ombrickú, založenú na variabilite časového a priestorového rozloženia zrážok a barickú, ktorá je vyjadrená v tlakovom poli prítomnosti sezónnych tlakových útvarov (Český meteorologický slovník, 1993).

V tejto práci sa budeme venovať hlavne termickej kontinentalite, teda kombinácii ročnej amplitúdy a zemepisnej šírky od ktorej je závislá. Mieru termickej kontinentality vyjadrujú určité indexy, ktoré v sebe zahrňujú ročnú amplitúdu a zemepisnú šírku.

Existuje 5 základných indexov termickej kontinentality, z ktorých 3 sú nezávislé, zvyšné sa líšia o konštantu. Indexy boli navrhnuté šiestimi vedcami, ktorí sa danou problematikou kontinentality zaoberali a to Gorczyńskim, Conradom a Pollakom, Helom, Johanssonom a Rauniom (Mikolášková, 2009, Hudek, 2018). Indexy sú zároveň navrhnuté tak, aby vyjadrovali mieru kontinentality v rozmedzí 0 až 100 % (pre Gorczyńského index -6 až 100 %), teda 0 % pre oblasti s absolútne oceánskym podnebím (100 % oceanita) a 100 % pre oblasti s absolútne

kontinentálnym podnebím (0 % oceanita). Okrem toho rozlišujeme v rámci samotnej miery kontinentality niekoľko kategórií podnebí a to oceánske (pre hodnoty 0 až 33 %), kontinentálne (33 až 66 %) a silne kontinentálne (66 až 100 %). Konkrétne pre skúmanú oblasť Európy sa silne kontinentálne hodnoty indexov (nad 66 %) nevyskytujú. Pre podrobnejší prehľad kontinentality a ročnej amplitúdy by som doporučil bakalársku prácu (Hudek, 2018).

Samozrejme okrem indexov termickej kontinentality existujú aj indexy popisujúce ostatné druhy kontinentality, a to ombrickú aj barickú. V tab. 1.1 je definovaných 5 základných indexov termickej kontinentality, ktoré sú v tejto práci aj analyzované.

Index	Interval hodnôt	Definícia	
Gorczyński	-6 až 100 %	$G = 1,7 \frac{A}{\sin(\varphi)} - 20,4$	(1)
Conrad-Pollak	0 až 100 %	$C = 1,7 \frac{A}{\sin(\varphi + 10^\circ)} - 14$	(2)
Hela	0 až 100 %	$H = 1,97 \frac{A}{0,92 + \sin(\varphi - 53^\circ)} - 13,3$	(3)
Johansson	0 až 100 %	$J = 1,6 \frac{A}{\sin(\varphi)} - 11,7$	(4)
Raunio	0 až 100 %	$R = 1,57 \frac{A}{\sin(\varphi)} - 11,7$	(5)

**Tab. 1.1:** Základné indexy termickej kontinentality a ich definícia (A značí ročnú amplitúdu a  $\varphi$  zemepisnú šírku)

Na základe tabuľky 1.1 si možno všimnúť, že indexy Gorczyński, Johansson a Raunio sa líšia iba o konštanty a ako už bolo vyššie spomenuté, sú teda na sebe závislé. Naopak indexy Conrad-Pollak a Hela sú voči ostatným nezávislé, majú posunutú zemepisnú šírku o niekoľko šírkových stupňov. U indexu Conrada-Pollaka je to kvôli korekcii na interval hodnôt v rozmedzí 0 až 100 %, čo je akási korekcia indexu Gorczyńského, ktorá umožňuje aj jeho použiteľnosť v oblasti rovníku. Index Helu bol definovaný tak, aby v oblasti rovníka nadobúdal index hodnotu okolo 0, hlavne pre typické ekvatoriálne podnebie.

Samozrejme nie všetky indexy sú všade, vo všetkých zemepisných šírkach dobre definované. Napríklad 3 závislé indexy Gorczyński, Johansson a Raunio nadobúdajú singularitu v blízkosti rovníka ( $\varphi$  sa blíži k 0). Index Conrada-Pollaka nie je platný pre zemepisné šírky nad 80°. Pre oblasť Európy sú však všetky dostatočne dobre definované.

Existujú aj iné indexy termickej kontinentality, ktoré neberú do úvahy len ročnú amplitúdu, ale aj priebeh teploty vzduchu počas roka. Jedným z nich je napríklad tzv. Kernerov index oceanity, ktorý berie do úvahy asymetrický priebeh teploty vzduchu počas roka. Je založený na rozdieloch priemernej teploty jarných a jesenných mesiacov. Vychádza z úvahy, že jarné mesiace sú chladnejšie ako jesenné v oblastiach s oceánskym podnebím (v oblastiach s kontinentálnym podnebím naopak). Nadobúda kladné hodnoty v oceánskych oblastiach a záporné v kontinentálnych.



Iné indexy berú okrem teploty do úvahy aj dĺžku hlavných a prechodných ročných období akými sú leto, zima resp. jar a jeseň. Hlavne prechodné obdobia, ktoré bývajú dlhé v oblastiach s oceánskym podnebím a krátke v oblastiach s kontinentálnym podnebím.

Na obrázku 1.1 a v prílohe 9 sú graficky znázornené rozloženia jednotlivých indexov kontinentality na základe dát z dátového súboru E-OBS. Jedná sa o rozloženia za 2 pozorované obdobia 1971 – 2000 a 1990 – 2008 v dvoch rozlíšeniach a to  $0,11^\circ$  a  $0,44^\circ$ . Tieto sú analyzované s modelovými výstupmi klimatických modelov v kapitole 3.

## 1.2 Pozorovania a E-OBS

Jedným zo spôsobov vyhodnotenia indexov kontinentality v Európe je, ako už bolo spomenuté, na základe pozorovaní. Jedná sa o namerané hodnoty meteorologických prvkov zo staníc naprieč celou Európou. Merané veličiny sú hlavne teplota, zrážky, tlak a rôzne iné. Pre vyhodnocovanie kontinentality je však dôležitá hlavne teplota. Dáta sú zozbierané zo staníc po celej Európe a nakoniec analyzované a spracované na denné priemery.

Dátový súbor E-OBS (*European High-Resolution Gridded Data Set*) je dátový súbor minimálnej, maximálnej, priemernej povrchovej teploty, prízemného tlaku na morskej úrovni, množstva zrážok a globálnej radiácie. K dispozícii sú dáta od roku 1950 až po súčasnosť. Dáta sú interpolované do pravidelnej siete uzlových bodov a to v časových radoch na základe pozorovaní zo staníc v Európe. V súčasnosti sú k dispozícii 2 rozlíšenia a to  $0,25^\circ$  a  $0,1^\circ$  vhodné pre regionálne klimatické modely (Haylock et al., 2008).

Projekt E-OBS vznikol vo februári 2005 pôvodne z projektu ENSEMBLES. Pôvodne zbieral dáta z 250 staníc v Európe, ktorých počet však postupom času neustále rástol a v súčasnosti viac ako 10000 staníc (Cornes et al., 2017). Nevýhodou však i naďalej ostáva nerovnomerné rozloženie staníc s najväčšou hustotou v západnej a severnej Európe. Na rozdiel od starších dátových súborov, ktoré mali menšiu dĺžku pozorovaní a všeobecne horšie priestorové rozlíšenie, je E-OBS vhodný pre potreby klimatického modelovania. Podrobnejšie informácie o dátovom súbore E-OBS sú uvedené v bakalárskej práci (Hudek, 2018).

Pomocou dát zo súboru E-OBS boli spracované priestorové rozloženia jednotlivých indexov kontinentality v Európe, ktoré boli neskôr v kapitole 3 použité pri analýze s modelovými výstupmi. Mapy sú znázornené na obrázkoch 1.1 a 1.2 pre každý index kontinentality a dve obdobia 1971 - 2000 a 1990 - 2008. Pre tento účel boli dáta E-OBS v rozlíšení  $0,25^\circ$  interpolované na rozlíšenie  $0,44^\circ$  totožné s modelovými výstupmi a taktiež  $0,1^\circ$  na  $0,11^\circ$ . Použitá bola najnovšia sada dát, ktorá bola k dispozícii a to z roku 2020 ([https://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access\\_eobs.php](https://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access_eobs.php)). Dáta pôvodne obsahovali denné priemery pre každý deň až po súčasnosť. Boli následne upravené na mesačné priemery za uvedené obdobia a spočítané indexy. Uvedená úprava a interpolácia boli vykonané pomocou programu CDO (Schulzweida, 2019)

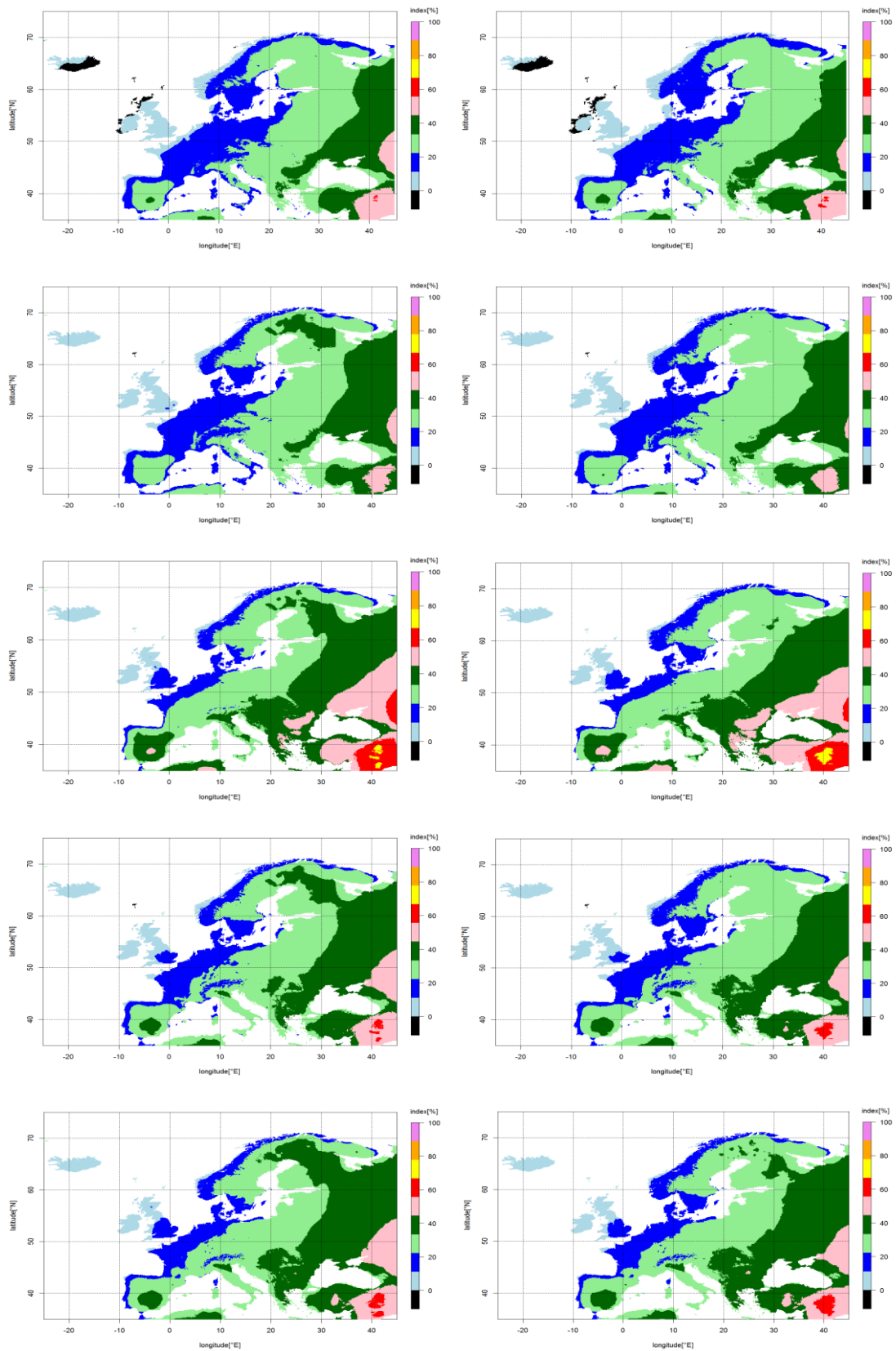
Na obr. 1.1 a v prílohe 9 môžeme teda pozorovať priestorové rozloženia uvedených indexov kontinentality vypočítaných na základe dát zo súboru E-OBS. Na základe týchto pozorovaní možno teda usúdiť ako sa v rámci Európy mení rozloženie kontinentality v závislosti od polohy, a že dobre odpovedá základným charakteristikám termickej kontinentality popísaným v predošlej podkapitole. Smerom od pobrežia do vnútrozemia možno v Európe pozorovať výrazný nárast kontinentality. Okrem toho je patrný taktiež pokles s nadmorskou výškou v horských oblastiach. U jednotlivých indexov je nárast odlišný. Najvýraznejší možno pozorovať u indexu Helu, ktorý je na zmeny najcitlivejší, keďže hlavne vo východnej časti Európy s vysokými hodnotami možno u tohto indexu pozorovať najvyššie. U indexu Helu hodnoty v skúmanej oblasti stúpajú v najkontinentálnejších oblastiach až k 70 % (u ostatných indexov väčšinou len okolo 60 %, u Conrada-Pollaka len okolo 50 %).

Pri rozloženiach v rozlíšení  $0,11^\circ$  možno lepšie pozorovať a rozlíšiť zmeny spôsobené najmä orografickými vplyvmi, ale aj inými spôsobené hlavne tvarmi pobrežia. U Gorczyńského indexu, ktorého obor hodnôt začína v záporných hodnotách možno tieto záporné hodnoty pozorovať hlavne na Islande a v miestach s najvyššou oceanitou (severozápad Veľkej Británie a Írska). Západné pobrežia hlavného Európskeho kontinentu majú hodnoty (u Gorczyńského) okolo 10 %. Smerom do vnútrozemia ale kontinentalita značne rastie a v strednej Európe sa hodnoty pohybujú už v intervale 20 – 30 % (u Helu až okolo 35 %). V oblastiach s najkontinentálnejším podnebím v Európe (západ Ruska) sa pohybujú v intervale až 40 – 60 % (u indexu Helu v skúmanej oblasti mimo Európu až nad 66 %, čo už je na hranici silne kontinentálneho podnebia).

Hranica 33 % oddeľujúca oceánske a kontinentálne podnebie je pre oblasť Európy pre potreby nášho výskumu veľmi dôležitá. Na základe uvedených obrázkov možno povedať, že prechádza východnou Európou od severovýchodu smerom na juhozápad. V závislosti od jednotlivých indexov je posunutá viac na severozápad resp. juhovýchod (u indexu Helu prechod strednou Európou). Jej prechod je komplexnejší hlavne v Karpatskom pohorí, čo možno dobre pozorovať pri rozlíšení  $0,11^\circ$ . Jej posun v čase bude dôkladne skúmaný hlavne pri budúcich simuláciách. Takisto možno pozorovať rozdiely v rozloženiach medzi obdobiami 1971 – 2000 a 1990 – 2008. V severnej Európe možno pozorovať určitý pokles indexov, naproti tomu v južnej Európe mierny nárast. V stredných oblastiach Európy (okolo  $50^\circ\text{N}$ ) sú zmeny takmer zanedbateľné.

Prakticky väčšina pevniny v skúmanej oblasti má podľa klasifikácie tried kontinentality oceánske podnebie (60 - 70 %, u indexu Helu okolo 50 %).

Problematika indexov kontinentality a ich rozloženia bola témou bakalárskej práce (Hudek, 2018), kde boli takisto vytvorené mapy rozložení, ale za iné (30-ročné) obdobia a s pôvodným rozlíšením poskytnutým E-OBS. Obr. 1.1 a príloha 9, popisujú rozloženia indexov kontinentality v súlade s teóriou popísanou v predošlej podkapitole.



**Obr. 1.1:** Rozloženie jednotlivých indexov kontinentality v Európe na základe dát z E-OBS s rozlíšením  $0,11^\circ$  za obdobie 1971 – 2000 (vľavo) a 1990 – 2008 (vpravo) (od hora postupne Gorczynski, Conrad-Pollak, Hela, Johansson, Raunio)

## 2. Klimatické modely

Táto práca je zameraná na kontinentalitu reprezentovanú regionálnymi klimatickými modelmi a to riadenými buď reanalýzou alebo pomocou globálnych modelov. V kapitole 1 boli uvedené základné charakteristiky kontinentality, indexy a graficky znázornené ich geografické rozloženie v Európe. Boli vytvorené na základe dát pozorovaní z dátového súboru E-OBS za jednotlivé obdobia. V tejto kapitole je uvedená problematika klimatických modelov, ich druhy a delenie a sú rozobrané jednotlivé modely použité a analyzované v tejto práci. Pomocou klimatických modelov sú simulované jednotlivé rozloženia indexov kontinentality v Európe.

### 2.1 Globálne klimatické modely

Globálny klimatický model alebo model všeobecnej cirkulácie (GCM, *Global Climate Model*, *General Circulation Model*) je model simulujúci klímu resp. klimatické prvky celosvetovo na základe obecnej cirkulácie planetárnej atmosféry alebo oceánu (McGuffie, Henderson-Sellers, 2001). Obecne sa jedná o matematicko-fyzikálny model riešený numericky na počítačoch. Jeho kľúčovými zložkami sú atmosférické a oceánske modely so započítaním morského ľadu a zemského povrchu. Spolu vytvárajú model všeobecnej cirkulácie atmosféry a oceánu. Submodely morského ľadu a evapotranspirácie nad zemským povrchom sa spolu s atmosférickým a oceánskym modelom stávajú základom pre úplný model klímy. Ich obecné využitie má uplatnenie ako predpovedné modely, na porozumenie podnebia a predpovedanie zmien klímy do budúcnosti.

Počiatky globálneho klimatického modelovania sa datujú do 50. rokov 20. storočia, keď bol vyvinutý prvý model schopný realisticky znázorňovať mesačné a sezónne zmeny v troposfére. Jednalo sa o prvý úspešný klimatický model. Postupom času vznikali modely, ktoré dokázali kombinovať atmosférické a oceánske procesy a ich vplyv na celkovú klímu. Modely boli neustále vylepšované prakticky až do súčasnosti. Neskôr bola doplnená rola gravitačných vln, ktoré sú významné pri prenose simulácii cirkulácie v regionálnom aj globálnom meradle.

Pri simuláciách budúceho vývoja klímy sa všeobecne využíva niekoľko scenárov vývoja, či sa už jedná o emisné scenáre alebo scenáre radiačného forcingu. Medzi scenáre radiačného forcingu patria napríklad RCP2.5, RCP4.5 alebo RCP8.5 pre nárast radiačného forcingu do roku 2100 na 2,5; 4,5; resp. 8,5 W.m<sup>-2</sup> (Van Vuuren et al., 2011).

Dnes nájdeme globálne modely uplatnenie hlavne ako základný nástroj výskumu klímy (Belda et al., 2014). Okrem toho ale aj ako doplnok pri riadení regionálnych modelov simulujúcich v obmedzenej oblasti (McGregor, 1997, Vautard et al., 2013), a ktoré sú hlavným nástrojom pri skúmaní v tejto práci. V tejto práci je využitých niekoľko radiacií globálnych modelov, celkovo 9. Patria sem CanESM2, CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, CM5A-MR, MIROC5, ESM2M, ESM-LR, NorESM1-M. Tieto globálne modely slúžia ako nástroj riadenia regionálnych

modelov pri ich simulácii (vid' tab. 2.1 a 2.2 v podkapitole 2.5). Použité regionálne modely sú rozpísané v nasledujúcej podkapitole.

## 2.2 Regionálne klimatické modely

Regionálne klimatické modely (RCM) boli vyvinuté za účelom tzv. „downscalingu“ klimatických polí, ktoré boli vyprodukované globálnymi modelmi s hrubým (nízkym) rozlíšením. Hlavným cieľom bolo poskytnúť informácie vo vysokom tzv. sub-globálnom rozlíšení vhodnom pre štúdie regionálnych fenoménov a posúdenia ich dopadov a zraniteľnosti. Pre dosiahnutie týchto cieľov sa používajú modely simulujúce v obmedzených oblastiach. Na základe toho sa pre regionálne modelovanie používa aj termín „dynamický downscaling“ (Giorgi, 2019).

Globálne klimatické modely všeobecne popisujú dopady veľkoškálových forcingov ako napr. skleníkové plyny, zmeny v solárnej radiácii atď. na globálnu cirkuláciu. Ich rozlíšenie však nie je dost' jemné na to aby rozlíšilo maloškálové (mezoškálové) atmosférické cirkulácie, hlavne tie zapríčinené orografiou, aj keď najnovšie generácie GCM to už dokážu. Naproti tomu regionálne modely priestorovo a časovo rozlíšia a zjemnia tieto informácie veľkého rozsahu započítaním vplyvov sub-globálnych forcingov a procesov. Hlavne kvôli zložitej topografii horských a pobrežných oblastí, vplyvom kontinentálnych vodných plôch a rozloženia pevniny. Okrem toho rozlíšia aj mezoškálové dynamické procesy vyskytujúce sa v atmosfére (McGregor, 1997).

Počiatky regionálneho klimatického modelovania resp. dynamického downscalingu sa datujú do obdobia približne konca 80. rokov 20 storočia (Giorgi et al., 2015, 2019, Dickinson et al., 1989). V posledných troch desaťročiach došlo k značnému a neustále pokračujúcemu nárastu. Dnes sú k dispozícii mnohé regionálne klimatické modely z laboratórií po celom svete pre širokú škálu aplikácii od procesných štúdií až po simulácie klimatickej zmeny. Aj napriek rýchlemu vývoju bolo regionálne klimatické modelovanie vždy značne diskutabilnou oblasťou výskumu klimatického modelovania. Regionálne klimatické modely sú aj napriek ich širokému využitiu v mnohých štúdiách nie vždy spoľahlivé a majú samozrejme svoje nevýhody a obmedzenia vyžadujúce značné porozumenie (Giorgi, 2019).

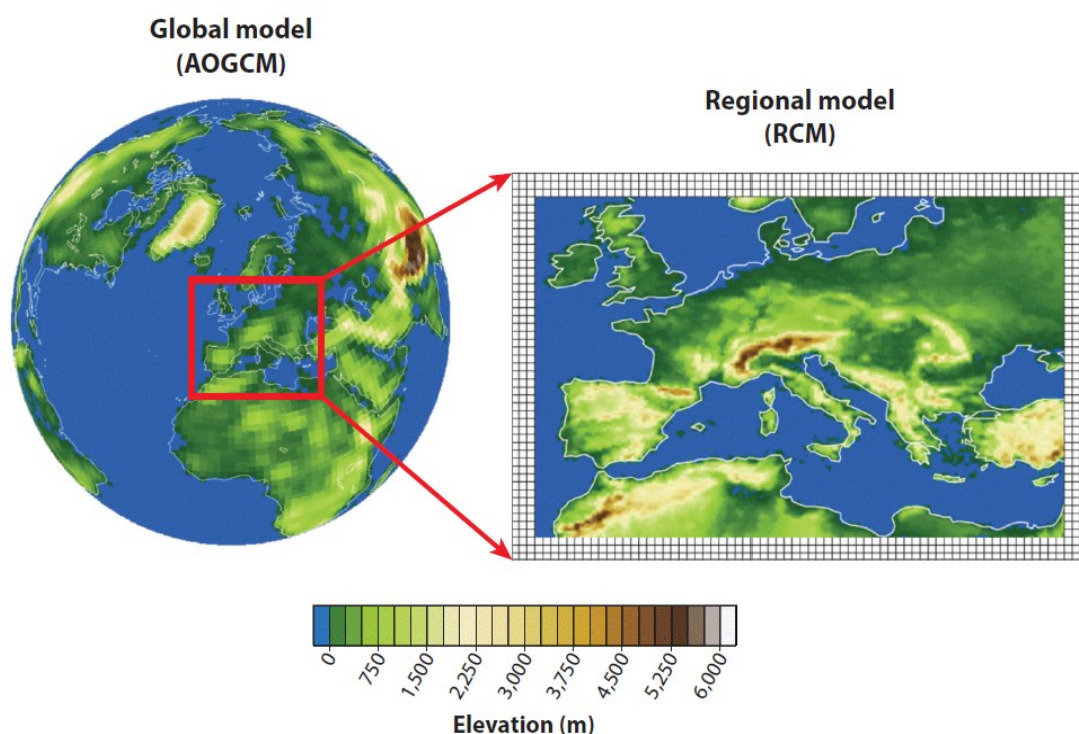
Pri zaoberaní sa regionálnym klimatickým modelovaním sa možno zamyslieť nad tým, aký je jeho skutočný význam, keďže sa očakáva, že globálne modely dosiahnú stejné rozlíšenie v horizonte 10 rokov. Naproti tomu ale treba vziať do úvahy fakt, že posledných približne 30 rokov došlo k značnému nárastu využívania regionálnych klimatických modelov (Giorgi, 2019).

Základná technika regionálneho klimatického modelovania (tzv. sieťového, dynamický downscaling) je znázornená na obr. 2.1. Pozostáva zo simulácie regionálneho klimatického modelu na obmedzenej oblasti záujmu po dlhý simulačný čas riadenej počiatočnými a okrajovými časovo závislými meteorologickými podmienkami. Tieto podmienky sú obvykle obsiahnuté z globálnych reanalýz pozorovaní alebo z globálnych klimatických modelov. Okrajové podmienky sú aktualizované najčastejšie každých 6 hodín (obecne sa využívajú aj iné časové kroky) s časovou interpoláciou na časový krok modelu. Pomer rozlíšení polí globálneho

modelu a príslušného sieťového regionálneho modelu by nemal byť obvykle väčší ako 12.

Technika regionálneho modelovania je obvykle označovaná ako „jednosmerné hniezdenie“ keďže informácia prúdi od veľkoškálových podmienok globálneho modelu k regionálnemu modelu a nie naopak. V podstate vznikne dynamická rovnováha medzi informáciou z okrajového forcingu prenikajúc do vnútornej oblasti a vnútornej modelovej dynamiky. Výsledkom sú často chyby veľkých mier v hraničných oblastiach pochádzajúcich obvykle z regionálnych modelov. Vo všeobecnosti hniezdené regionálne modely nie sú schopné opraviť chyby prítomné vo veľkoškálových globálnych modelových poliach, ale len pridať realistický sub-globálny škálový detail.

V tejto práci sú použité a analyzované simulácie regionálnych klimatických modelov pochádzajúcich z prvej fázy iniciatívy EURO-CORDEX (podkapitola 2.4) a z nich odvodené indexy kontinentality uvedené v kapitole 1. Všetky regionálne modely sú riadené globálnymi. Príslušné indexy sú simulované vždy určitou dvojicou GCM\_RCM, teda globálny a regionálny model. K dispozícii je niekoľko regionálnych modelov, celkovo 15. Sú to ALADIN53, ALADIN52, RACMO2, RCA4, HadGEM 3RA, PROMES, REMO, WRFV35D, HadRM3P, WRF331C, WRF331F, WRF331G, CCLM-COSMO, REGCM42, WRF341I. Všetky sú riadené buď globálnou reanalýzou ERA-Interim (tab. 3.1) alebo viacerými globálnymi modelmi uvedenými podkapitole 2.1 (viď tab. 2.1 a 2.2 v podkapitole 2.5). Výsledky simulácií sú uvedené v nasledujúcej kapitole.



**Obr. 2.1:** Znáozornenie jednosmernej hniezdovej techniky regionálneho klimatického modelovania. Vpravo zjemnenie topografie a pobrežia pri použití regionálneho modelu a štvorcové okraje znázorňujú bočnú nárazníkovú zónu (Giorgi et al., 2015).

## 2.3 ERA-Interim

V tejto práci sú regionálne modely najčastejšie riadené pomocou reanalýzy ERA-Interim. ERA-Interim je globálna atmosférická reanalýza produkovaná Európskym centrom pre predpoveď počasia stredného rozsahu ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*). Táto reanalýza pôvodne pokrývala obdobie od roku 1989, neskôr rozšírená od roku 1979 (1.1.1979) (Dee et al., 2011, Berrisford et al., 2011, Vautard et al., 2013) a obecné končí v roku 2019 kedy ju nahrádza nová reanalýza ERA-5, nástupca ERA-Interim.

Projekt ERA-Interim vznikol v roku 2006 za účelom nahradenia staršej reanalýzy ERA-40 (pred ňou ešte staršia ERA-15), ktorá siahala až do 50 rokov 20. storočia. Má slúžiť ako most medzi úspešnou reanalýzou ERA-40 a budúcimi reanalýzami od ECMWF. Hlavnými cieľmi sú zlepšenie určitých aspektov ERA-40 akými sú reprezentácia hydrologického cyklu, kvalita cirkulácie v stratosfére a rôzne zmeny v pozorovanom systéme. Tieto ciele boli dosiahnuté kombináciou faktorov zahrňujúcich mnohé zlepšenia modelu napr. 4-rozmerná variačná analýza, vlhkosťná analýza a iné.

ERA-Interim ako atmosférický model a systém reanalýzy využíva cyklus 3I2 z IFS (*Intergrated Forecast System*) pôvodne predstaveného v roku 2006 (Berrisford et al., 2011). Bol konfigurovaný na rozlíšenie 60 vertikálnych hladín až po 0,1 hPa a redukované rovnomerne rozložené Gaussovské súradnice. Gridové dáta obsahujú širokú škálu 3 hodinových povrchových parametrov a 6 hodinových parametrov pokrývajúcich troposféru a stratosféru.

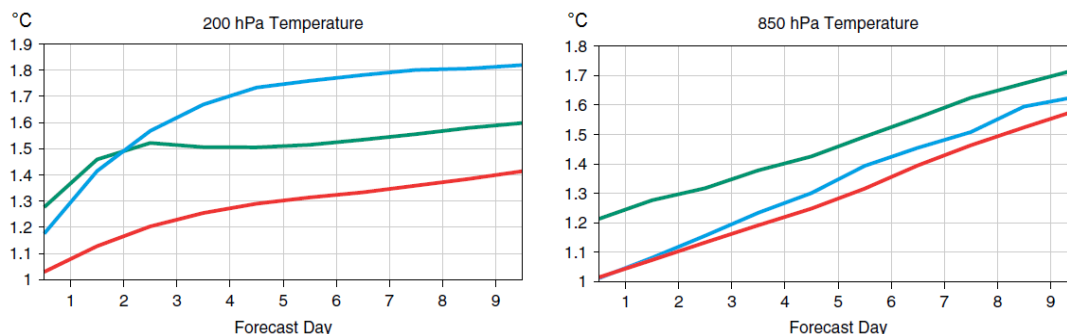
Reanalýza ERA-Interim je vytvorená so sekvenčnou schémou asimilácie dát postupujúcou vpred v čase využívajúcou analýzu v 12 hodinových cykloch. Dostupné informácie sú v každom cykle kombinované s prioritnými informáciami predpovedného modelu. Cieľom je odhadnúť stav vyvíjajúcej sa globálnej atmosféry a príslušného povrchu. ERA-Interim obecné zahŕňa predpovedný model s tromi plne zdvojenými komponentami a to atmosféru, povrch pevniny a oceánske vlny.

Modelové dáta sú založené na meraniach. Prípadne vyskytujúce sa zdroje chýb pochádzajú z tzv. „falošne“ meraných dát asimilovaných do modelu. Jednak aj zjednodušenia alebo chyby samotného modelu. Kvalita asimilácie dát však bola značne vylepšená oproti ERA-40 a samotný model má vysokú kvalitu. Aktuálne sú k dispozícii dáta na webových stránkach ECMWF vo formáte NetCDF.

Kvalita produktov ERA-Interim však prekonala očakávania aj napriek tomu, že projekt bol pôvodne vedený s obmedzenými zdrojmi. Len nepatrné úsilie bolo vynaložené k využitiu najlepších dostupných vstupných dát. Kľúčovým cieľom bolo adresovať niekoľko náročných problémov s asimiláciou dát, s ktorými sa bolo možné často stretnúť v ERA-40. Na obr. 2.2 sú znázornené rozdiely jednotlivých reanalýz ERA-40 a ERA-Interim, čo sa týka nárastu chýb v závislosti od počtu predpovedných dní. Možno pozorovať, že práve pre reanalýzu ERA-Interim chyba narastá najmenej, dokonca menej ako samotný predpovedný systém ECMWF.

Ako bolo už spomenuté, táto globálna reanalýza riadi niekoľko regionálnych modelov, ktoré sú riadené aj samostatnými globálnymi modelmi (dvojice GCM\_RCM). Keďže sa jedná priamo o európsku reanalýzu, mala by najlepšie a najpresnejšie simulovať charakteristiky kontinentality v Európe (výsledky v kapitole

3). Simulácie sú v dvoch rozlíšeníach  $0,11^\circ$  a  $0,44^\circ$  rovnako ako pri GCM\_RCM a za obdobie 1990 – 2008.



**Obr. 2.2:** Predpovedné chyby teploty v 200 a 850 hPa spriemerované cez všetky predpovede získavané denne v čase 12:00 SEČ v roku 1989 pre ERA-Interim (červená), ERA-40 (modrá) a ECMWF predpovedný systém (zelená). Chyby sú relatívne k fixovanej sade rádiosondážnych pozorovaní (Dee et al., 2011)

## 2.4 Iniciatíva EURO-CORDEX

Posudzovanie a vyhodnocovanie klimatických dopadov a vývoj príslušných postupov vyhodnocovania vyžaduje dostupnosť scenárov klimatickej zmeny s vysokým rozlíšením. Taktiež posúdenie ich robustnosti a neurčitostí. EURO-CORDEX (*European Coordinated Regional Downscaling Experiment*) poskytuje medzinárodný široký koordinovaný rámec pre zlepšenie regionálnych klimatických scenárov (Jacob et al., 2014, 2020). Jedná sa o dobrovoľné úsilie po regionálnom klimatickom výskume v Európe a je súčasťou WCRP (*World Climate Research Programme*). Obecne zahŕňa harmonizáciu aktivít modelového vyhodnocovania v rôznych modelových centrách a generovanie multi-modelových ansámblov regionálnych klimatických projekcií.

EURO-CORDEX poskytuje projekcie regionálnej klímy pre Európu v dvoch rozlíšeníach a to EUR-44 a EUR-11. EUR-44, čo odpovedá  $0,44^\circ$  (50 km) a EUR-11 ( $0,11^\circ$  resp. 12,5 km). V týchto rozlíšeníach sú následne simulované aj modelové výstupy uvedené v kapitole 3.

Medzi hlavné ciele iniciatívy EURO-CORDEX patri:

- i) lepšie pochopiť relevantné regionálne lokálne klimatické fenomény, ich premenlivosť a zmeny,
- ii) vyhodnotiť a zlepšiť regionálne klimatické modelovanie a techniky,
- iii) vytvoriť koordinované sady regionálnych modelovaných projekcií celosvetovo,
- iv) podporovať komunikáciu a znalosti pri výmene regionálnych klimatických informácií (Jacob et al., 2020).

K dosiahnutiu týchto cieľov napomáha aj samotná WCRP, ktorá má takisto svoje samostatné ciele a výzvy.

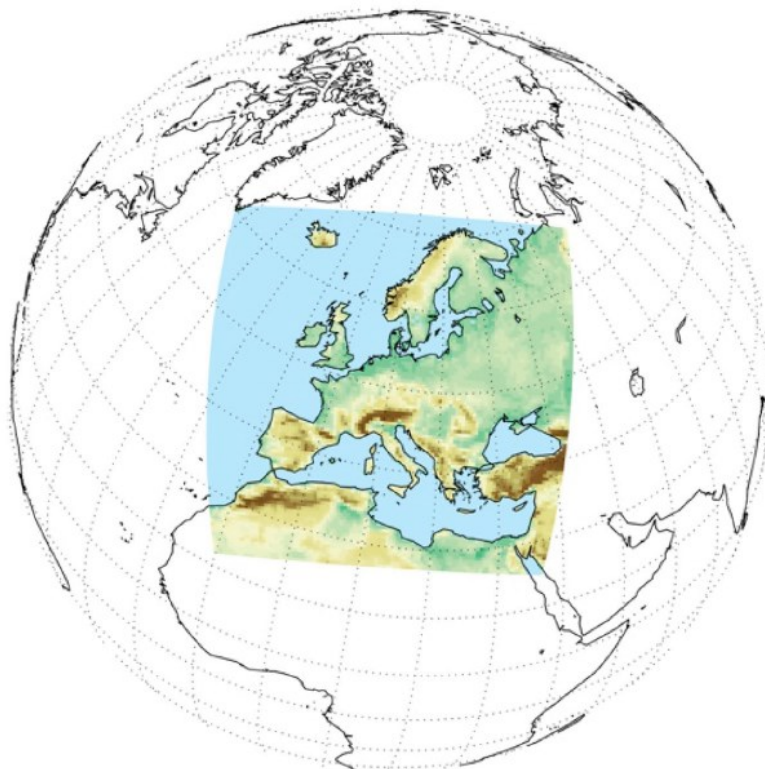
EURO-CORDEX vznikla ako kľúčový prírastok k samotnej iniciatíve CORDEX s viac ako 30 modelovacími skupinami spolupracujúcimi v simuláciách Európskej klímy. Na základe toho poskytuje verejne dostupné dáta regionálnych



klimatických modelov cez ESGF (*Earth System Grid Federation*). Mnoho skupín v komunite EURO-CORDEX prispievalo širokou škálou simulácií regionálnych podnebí v iných oblastiach CORDEXu a hrali dôležitú rolu v definovaní štandardov pri publikáciách ESGF.

Iniciatíva EURO-CORDEX vznikla z pôvodných európskych projektov regionálneho klimatického modelovania. Medzi tieto pôvodné projekty patrili PRUDENCE a ENSEMBLES. Pri vzniku CORDEXu sa usúdilo, že pre vytvorenie a analýzu veľkých regionálnych ansámblových klimatických simulácií je potrebné veľké a koordinované spoločenské úsilie. Pôvodne EURO-CORDEX započala jednak ako štatistická ale hlavne aj ako dynamická aktivita. Modelové skupiny zameriavajúce sa na dynamický downscaling používajú mnohé regionálne klimatické modelové systémy ako ALADIN, CCLM, HIRHAM, RACMO, RCA, RegCM, REMO, PROMES, WRF a ALARO-0 (Jacob et al., 2020). Modelové skupiny zameriavajúce sa na empirický štatistický downscaling využívajú širokú škálu prístupov. Uvedené dva prístupy sú pre komunitu EURO-CORDEX komplementárne.

Za účelom vytvárania ansámblových simulácií vysokej kvality, bola implementovaná jednoznačná stratégia modelovania. Obecne pozostáva z kontrolovaného experimentálneho nastavenia obsahujúceho fixovanú oblasť simulácie, predefinované horizontálne rozdelenie súradníc, simulácie vyhodnotenia pre každý model a simulácie jednak historické ako aj simulácie klimatickej zmeny.



**Obr. 2.3:** Oblasť skúmania simulácií EURO-CORDEX v rozlíšení 0,11° (Jacob et al., 2020)

Ako už bolo spomenuté pri simuláciách je použitá jedna doména (oblasť Európy) v dvoch rozlíšeniach EUR-11 a EUR-44 (0,11° a 0,44°), teda štandardné a vysoké rozlíšenie. Simulácie s vysokým rozlíšením (0,11°) boli vytvorené za účelom lepšieho rozlíšenia rôznych meteorologických fenoménov v Európe. V oboch rozlíšeniach boli urobené 3 druhy experimentov a to:

i) simulácie riadené reanalýzou pre posúdenie kapacity vhodne simulovať regionálnu klímu s najvhodnejšími okrajovými podmienkami, resp. (validačné) simulácie vyhodnotenia (*Evaluation*, ERA-Interim) za obdobie 1990 - 2008

ii) historické simulácie riadené globálnymi modelmi, resp. simulácie kontrolného obdobia (*Control*) 1951-2005

iii) projekcie navrhnuté za účelom posudzovania súčasnej a budúcej klimatickej zmeny, resp. scenáre (*Scenarios*) za obdobie 2006-2100 (Jacob et al., 2014, 2020)

Globálne simulácie sú priamo simulované s použitím regionálnych modelov.

Všetky regionálne modely použité v EURO-CORDEXe sú vyhodnocované pomocou reanalýzou riadených simulácií, predtým než sú spustené regionálne projekcie klimatickej zmeny riadené globálnymi modelmi. Simulácie vyhodnocovania (*Evaluation*) resp. validačné sú riadené dátami z kvázi-pozorovaní. To poskytuje nejaké informácie o výkone samostatných regionálnych modelov v Európe.

## 2.5 Prehľad použitých modelov

GCM_RCM	1971 - 2000	2021 - 2050, RCP4.5	2021 - 2050, RCP8.5	2071 - 2100, RCP4.5	2071 - 2100, RCP8.5
CNRM-CERFACS CNRM-CM5_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
CNRM-CERFACS CNRM-CM5_CNRM ALADIN53	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
ICHEC EC-EARTH_KNMI RACMO2	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
ICHEC EC-EARTH_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
IPSL CM5A-MR_IPSLINERIS WRF331F	Áno	Áno	Nie	Áno	Nie
IPSL CM5A-MR_SMHI RCA4	Áno	Nie	Áno	Nie	Áno
MOHC HadGEM2-ES_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Nie	Nie
MPI-M ESM-LR_CSC REMO	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
MPI-M ESM-LR_SMHI RCA4	Áno	Nie	Áno	Nie	Áno

**Tab. 2.1:** Modelové simulácie GCM\_RCM k dispozícii pre jednotlivé simulované obdobia a scenáre v rozlíšení 0,11° (Áno – k dispozícii, Nie – nie je k dispozícii)

<b>GCM_RCM</b>	<b>1971 - 2000</b>	<b>2021 - 2050, RCP4.5</b>	<b>2021 - 2050, RCP8.5</b>	<b>2071 - 2100, RCP4.5</b>	<b>2071 - 2100, RCP8.5</b>
CCCma CanESM2_UCAN WRF34I1	Áno	Áno	Nie	Áno	Nie
CCCma CanESM2_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
CNRM-CERFACS CNRM-CM5_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
CNRM-CERFACS CNRM-CM5_CNRM ALADIN53	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
CNRM-CERFACS CNRM-CM5_HMS ALADIN52	Áno	Nie	Áno	Nie	Áno
ICHEC EC-EARTH_IDL WRFV35D	Áno	Nie	Áno	Nie	Áno
ICHEC EC-EARTH_KNMI RACMO2	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
MOHC HadGEM2-ES_WEGC CCLM-COSMO	Áno	Áno	Nie	Áno	Nie
ICHEC EC-EARTH_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
IPSL CM5A-MR_IPSLINERIS WRF331F	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
IPSL CM5A-MR_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
MIROC MIROC5_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
MOHC HadGEM2-ES_DHMZ REGCM42	Áno	Nie	Nie	Nie	Nie
MOHC HadGEM2-ES_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Nie	Nie
MPI-M ESM-LR_CSC REMO	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
MPI-M ESM-LR_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
NCC NorESM1-M_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno
NOAA-GFDL ESM2M_SMHI RCA4	Áno	Áno	Áno	Áno	Áno

**Tab. 2.2:** Modelové simulácie GCM\_RCM k dispozícii pre jednotlivé simulované obdobia a scenáre v rozlíšení 0,44° (Áno – k dispozícii, Nie – nie je k dispozícii)

V tabuľkách 2.1 a 2.2 sú uvedené všetky modelové dvojice pomocou ktorých sú simulované jednotlivé indexy kontinentality za jednotlivé obdobia historické aj budúce a podľa rôznych scenárov (simulácie GCM\_RCM). Pri simuláciách riadených reanalýzou ERA-Interim sú použité regionálne modely uvedené v tab. 3.1.

Celkovo teda 9 simulácií v rozlíšení 0,11° a 18 v rozlíšení 0,44°. Názvy jednotlivých simulácií uvedených v tabuľkách sú vždy jeden riadiaci globálny a jeden

riadený regionálny model oddelených podtržníkom (\_). Každý globálny aj regionálny model sú produkované nejakou inštitúciou, ktorá je od modelu oddelená medzerou. Napríklad simulácia ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4 je simulácia regionálneho modelu RCA4 produkovaného inštitúciou SMHI a je riadený globálnym modelom EC-EARTH produkovaným inštitúciou ICHEC. Alebo CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4 analogicky regionálny model SMHI RCA4 (viď vyššie) riadený globálnym CNRM-CM5 od inštitúcie CNRM-CERFACS.

Každý globálny aj regionálny model sú vždy produkované nejakou inštitúciou. Niekedy je globálny aj regionálny model produkovaný tou istou inštitúciou napr. CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53.

## 3. Modelové výstupy

V tejto kapitole sú zobrazené a podrobne popísané resp. analyzované jednotlivé modelové výstupy. Jedná sa o modelové výstupy s rozlíšením  $0,11^\circ$  a  $0,44^\circ$  zem. šírky resp. dĺžky. Do tejto spoločnej pravidelnej siete boli výstupy interpolované z pôvodných (nativných) projekcií modelov. Jedná sa teda ako už bolo v úvode spomenuté o regionálne modely riadené globálnou reanalýzou ERA-Interim a regionálne modely riadené globálnymi. Výstupy sú spracované ako samotné mapy rozloženia jednotlivých skúmaných indexov kontinentality v Európe za určité obdobia historické (GCM\_RCM), validačné (ERA-Interim) a budúce (GCM\_RCM). Ďalej sú podrobne analyzované a porovnávané s pozorovaniami, teda s meraniami z dátového súboru E-OBS. Cieľom je zistiť do akej miery jednotlivé modely dokážu popisovať resp. simulovať skutočnosť.

U historických a validačných (ERA-Interim) simulácii je skúmaná schopnosť reprezentovať súčasnú klímu a u budúcich scenáre možného budúceho vývoja. Danou mierou je priestorová korelácia jednotlivých indexov medzi modelovými simuláciami a pozorovaniami. Keďže sa jedná o regionálne modely riadené globálnymi, určitou mierou do korelácie prispieva daný regionálny a určitou mierou daný globálny model. Na základe toho je pri analýze vybraný jeden regionálny model riadený niekoľkými globálnymi a naopak niekoľko regionálnych riadených jedným globálnym modelom.

Pri analýze budúcich simulácii je braná na zreteľ hlavne zmena v čase ako taká, ale aj posun jednotlivých hraníc kategórii kontinentality (v Európe 33 %). Podľa toho sú výsledky analyzované a spracované v jednotlivých podkapitolách.

### 3.1 Simulácie ERA-Interim

Simulácie ERA-Interim sú simulácie regionálnych modelov riadených reanalýzou, ktorá regionálnym modelom poskytuje okrajové podmienky na okrajoch domény (viď obr. 2.3). ERA-Interim je globálna atmosférická reanalýza produkovaná spoločnosťou ECMWF. Táto reanalýza riadi niekoľko regionálnych modelov uvedených nižšie. Pre Európu sú spracované simulácie simulujúce súčasný stav za obdobie 1990 - 2008 pre obe gridové rozlíšenia  $0,11^\circ$  a  $0,44^\circ$ . Výsledky sú uvedené na obr. 3.2, 3.3 a 3.4 a v tab. 3.2 a 3.3, kde sú uvedené hodnoty priestorových korelácií s pozorovaniami za rovnaké obdobie 1990 – 2008.

Na uvedenom obrázku môžeme teda celkovo dobre pozorovať geografické rozloženie jednotlivých indexov kontinentality, simulovaných pomocou 12 regionálnych modelov riadených reanalýzou. Z toho je 6 modelov v rozlíšení  $0,11^\circ$ , 10 modelov v rozlíšení  $0,44^\circ$ , z toho 2 v rozlíšení len  $0,11^\circ$ , 6 v rozlíšení len  $0,44^\circ$  a 4 v oboch rozlíšeniach. Jednotlivé použité regionálne modely v jednotlivých rozlíšeniach sú uvedené v tab. 3.1. Vyšší počet simulácii pre rozlíšenie  $0,44^\circ$  odpovedá hlavne menšej náročnosti simulácie, teda menšiemu počtu gridových bodov pre menšie rozlíšenie.

Regionálny model	Rozlíšenie	
CNRM ALADIN53	0,11°	0,44°
MOHC HADGEM-3RA	0,11°	
SMHI RCA4	0,11°	0,44°
KNMI RACMO2	0,11°	0,44°
UCLM PROMES	0,11°	
CSC REMO	0,11°	0,44°
HMS ALADIN52		0,44°
UCAN WRF331G		0,44°
MOHC HadRM3P		0,44°
IDL WRFV35D		0,44°
BCCR WRF331C		0,44°
WEGC CCLM-COSMO		0,44°

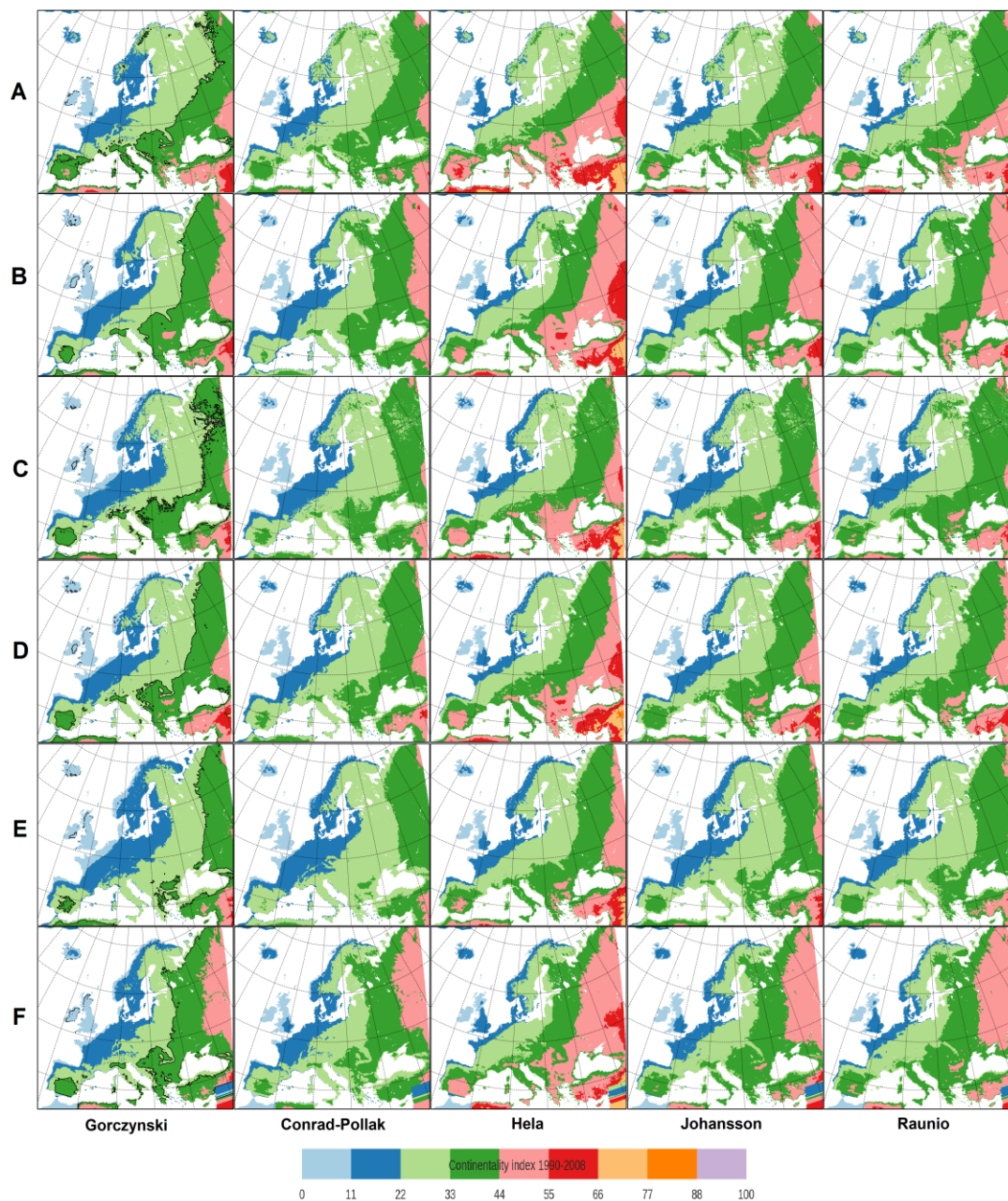
**Tab. 3.1:** Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim v ich príslušnom rozlíšení

Čo sa týka kvalitatívneho popisu rozloženia jednotlivých indexov kontinentality simulovaných pomocou reanalýzou riadených modelov, tak možno pozorovať rovnaké charakteristiky typické pre termickú kontinentalitu ako pri rozloženiach určených na základe pozorovaných dát na obr. 1.1 a v prílohe 9. Možno pozorovať nárast indexov smerom do vnútrozemia ako aj pokles s nadmorskou výškou. Najvýraznejšie rozdiely medzi východnou a západnou Európou u indexu Helu a najmenej výrazné u Conrada-Pollaka. Záporné hodnoty u Gorczyńskiego indexu, ktoré nie sú v oblasti hodnôt škály sú na mapách oddelené čiernou čiarou (oblasť Britských ostrovov a Islandu).

Z jednotlivých modelových simulácii uvedených na obr. 3.1 je zrejmé, že nie všetky modely popisujú rozloženie kontinentality rovnako. Možno pozorovať rozdiely medzi jednotlivými indexmi ako aj medzi jednotlivými modelovými výstupmi. Čo sa týka miery do akej dané modely popisujú skutočnosť, teda výstupy na základe pozorovaných hodnôt E-OBS (obr. 1.1), sú uvedené ako priestorové korelácie v tab. 3.2 a 3.3 pre každý index a model. Každý model bude mať teda inú mieru podobnosti so skutočnosťou.

Z map však možno vyčítať polohy dôležitej hranice 33 % oddeľujúcej oblasti s oceánskym a kontinentálnym podnebím, ktorá sa medzi jednotlivými modelmi posúva v smere západ/východ až juhovýchod/severozápad. Jej poloha sa však v porovnaní s pozorovaniami E-OBS za rovnaké obdobie podstatne líši, u jednotlivých modelov odlišne. Pri simuláciách v rozlíšení 0,11° sa hranica nachádza najzápadnejšie u modelu CSC REMO (miestami aj o viac ako 500 km) a najvýchodnejšie u modelu UCLM PROMES (v porovnaní s pozorovaniami ale len o 200 – 300 km na východ až juhovýchod, prevažne v južnej časti). Pri simuláciách v rozlíšení 0,44° sa hranica nachádza najzápadnejšie resp. najseverozápadnejšie u simulácie MOHC HadRM3P, v porovnaní s pozorovaniami aj o viac ako 500 km smerom na severozápad. Naopak najvýchodnejšie resp. najjuhovýchodnejšie sa hranica nachádza v simuláciách CNRM

ALADIN53 v severnej a SMHI RCA4 v strednej Európe. Samozrejme nie vo všetkých zemepisných šírkach je daná hranica pri uvedených simuláciách najzápadnejšie-najseverozápadnejšie resp. najvýchodnejšie-najjuhovýchodnejšie. Uvedené simulácie boli vybrané ako oblasti s najväčším resp. najmenším plošným podielom oblastí s kontinentálnym podnebím.



**Obr. 3.1:** Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením  $0,11^\circ$  za obdobie 1990 - 2008 a) CNRM ALADIN53, b) MOHC HadGEM-3RA, c) SMHI RCA4, d) KNMI RACMO2, e) UCLM PROMES a f) CSC REMO

	<b>G</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>J</b>	<b>R</b>
<b>MOHC HadGEM-3RA</b>	0.960	0,952	0,967	0,960	0,960
<b>KNMI RACMO2</b>	0.944	0,928	0,958	0,944	0,944
<b>UCLM PROMES</b>	0.934	0,914	0,950	0,934	0,934
<b>SMHI RCA4</b>	0.918	0,893	0,937	0,918	0,918
<b>CNRM ALADIN53</b>	0,865	0,818	0,902	0,865	0,865
<b>CSC REMO</b>	0.724	0,712	0,750	0,724	0,724

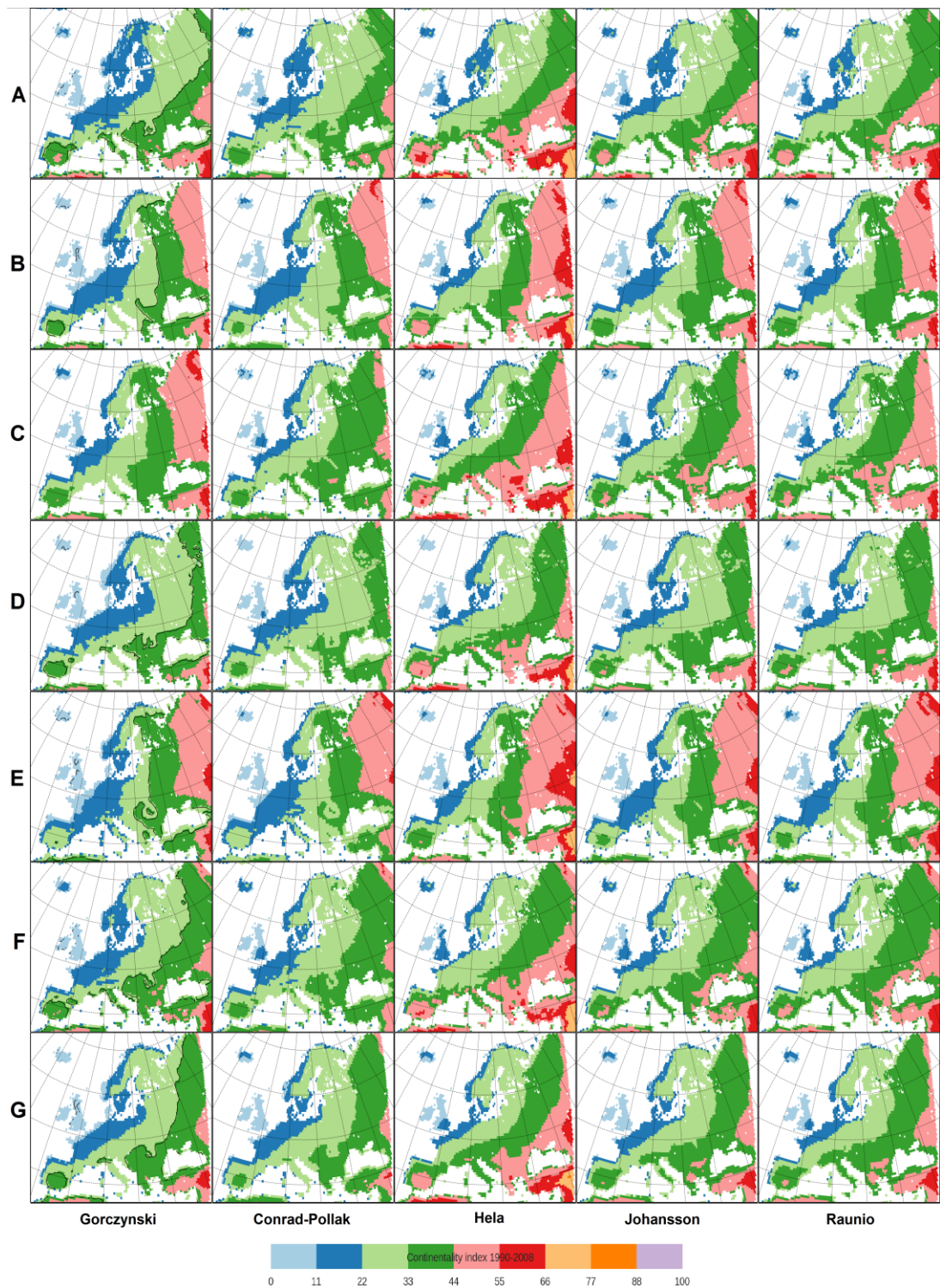
**Tab. 3.2:** Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov riadených reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením  $0,11^\circ$  s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1990 - 2008 (**G**orczynski, **C**onrad-Pollak, **H**ela, **J**ohansson, **R**aunio)

V uvedenej tabuľke 3.2 sú teda uvedené korelácie jednotlivých simulácií s výstupmi na základe pozorovaní z dát zo súboru E-OBS. Analýza bola urobená tak, že každý model a daný index bol analyzovaný s príslušným rozložením indexu určeného na základe pozorovaní. Korelácie obecné nadobúdajú hodnoty -1 až 1. Kladné hodnoty určujú mieru podobnosti (priamej úmery) a záporné naopak mieru nepriamej úmery medzi rozloženiami. Hodnota 0 znamená nelineárny vzťah. V našom prípade sa však vyskytujú len kladné hodnoty, keďže pozorovania aj simulácie znázorňujú nárast kontinentality od západu na východ (resp. od pobrežia smerom do vnútrozemia). Z tabuľky teda možno určiť, ktorý model najlepšie popisuje skutočnosť. Jedná sa o model MOHC HadGEM-3RA, ktorého podobnosť s pozorovaniami nadobúda korelácie 0,95 až 0,97. Naopak najhoršie na tom je model CSC REMO s hodnotami len okolo 0,71 až 0,75. Prakticky všetky modelové výstupy okrem CSC REMO celkom dobre simulujú skutočnosť na základe pozorovaní z E-OBS.

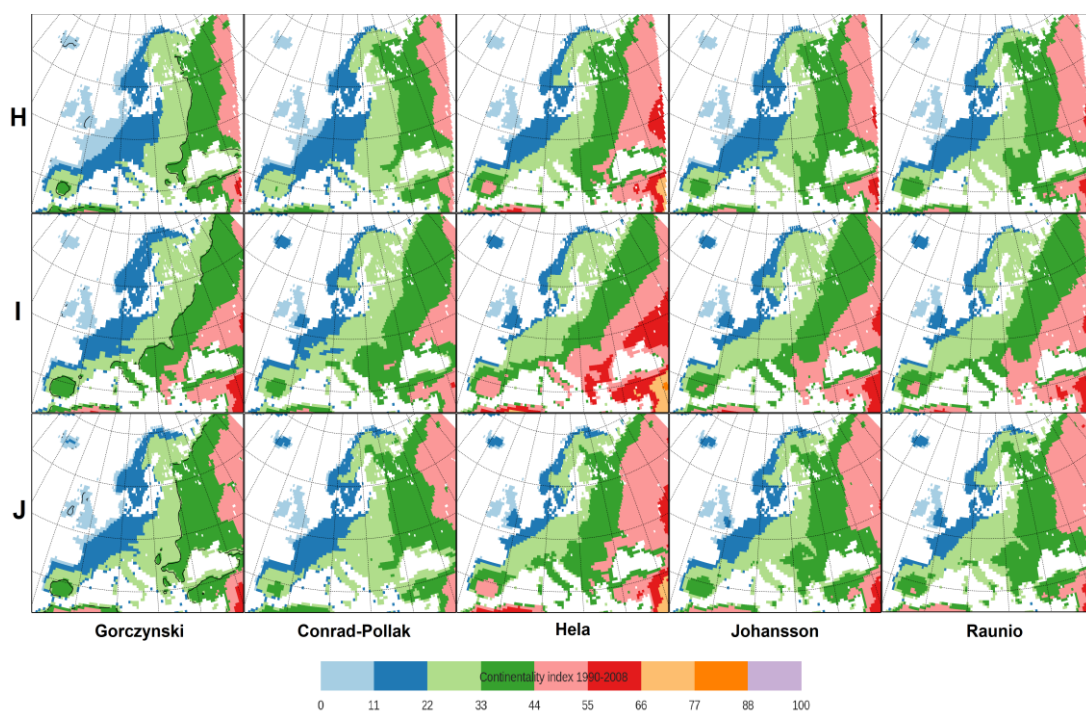
Čo sa týka samotných indexov, tak najvyššie hodnoty korelácií možno pozorovať u indexu Helu, kde sa objavujú najvyššie hodnoty u všetkých modelových výstupov. Naopak najnižšie u indexu Conrada-Pollaka takisto prakticky u všetkých modelov. To znamená, že pri presnosti schopnosti daného modelu simulovať skutočnosť, záleží okrem voľby vhodného modelu aj na voľbe indexu. Možno si však tiež všimnúť, že korelácie indexov Gorczynski, Johansson a Raunio sú pre všetky modely identické. Jedná sa vlastne o 3 už v úvode spomínané závislé indexy líšiac sa len o konštanty (tab. 1.1). Pre tieto indexy teda na ich voľbe nezáleží.

Väčší počet modelových simulácií ERA-Interim máme pre rozlíšenie  $0,44^\circ$  pre menšiu náročnosť výstupov. Rozloženie indexov je popísané na obr. 3.2 a 3.3 a miery korelácií so skutočnosťou v tab. 3.3. Analyzované sú prakticky rovnakým spôsobom ako u rozlíšenia  $0,11^\circ$ . Pre nižšie rozlíšenie nemožno až tak dobre rozlíšiť zmeny medzi jednotlivými modelmi ako aj indexmi. Hlavne posun jednotlivých hraníc v určitých oblastiach nie je tak dobre rozlíšiteľný. V tab. 3.1, 3.2 a 3.3 si možno všimnúť, že uvedené simulácie (modely) v oboch rozlíšeniach sú CNRM ALADIN53, SMHI RCA4, KNMI RACMO2 a CSC REMO. V rámci nich možno na obr. 3.1 – 3.3 vidieť rozdiely spôsobené rozlíšením.





**Obr. 3.2:** Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením  $0,44^\circ$  za obdobie 1990 - 2008 a) CNRM ALADIN53, b) IDL WRFV35D, c) MOHC HadRM3P, d) SMHI RCA4, e) BCCR WRF331C, f) HMS ALADIN52, g) KNMI RACMO2



**Obr. 3.3:** Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením  $0,44^\circ$  za obdobie 1990 – 2008 h) UCAN WRF331G, i) WEGC CCLM-COSMO, j) CSC REMO

	<b>G</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>J</b>	<b>R</b>
<b>UCAN WRF331G</b>	0,952	0,946	0,957	0,952	0,952
<b>IDL WRFV35D</b>	0,944	0,938	0,952	0,944	0,944
<b>MOHC HadRM3P</b>	0,938	0,922	0,953	0,938	0,938
<b>KNMI RACMO2</b>	0,936	0,918	0,952	0,936	0,936
<b>CSC REMO</b>	0,934	0,920	0,946	0,934	0,934
<b>BCCR WRF331C</b>	0,927	0,924	0,937	0,927	0,927
<b>WEGC CCLM-COSMO</b>	0,926	0,894	0,949	0,926	0,926
<b>HMS ALADIN52</b>	0,902	0,872	0,927	0,902	0,902
<b>SMHI RCA4</b>	0,899	0,868	0,925	0,899	0,899
<b>CNRM ALADIN53</b>	0,868	0,810	0,909	0,868	0,868

**Tab. 3.3:** Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov riadených reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením  $0,44^\circ$  s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1990 - 2008 (**G**orczyński, **C**onrad-Pollak, **H**ela, **J**ohansson, **R**aunio)

Na základe hodnôt korelácií uvedených v tabuľke 3.3 možno usúdiť, že celkovo modely v nižšom rozlíšení  $0,44^\circ$  mierne horšie korelujú so skutočnosťou ako modely v rozlíšení  $0,11^\circ$  (okrem modelu CSC REMO). Jedná sa ale z väčšej časti o iné modely a len 4 z nich simulujú aj v rozlíšení  $0,11^\circ$  (viď vyššie, resp. tab. 3.1). Hodnoty sa pohybujú prevažne v intervale 0,81 až 0,96, teda na rozdiel od predošlého prípadu žiadne neklesajú pod 0,8. Rozdiely medzi jednotlivými modelmi sú pomerne malé,

podstatne menšie ako v predošlom prípade. Najvyššie hodnoty (0,94 – 0,96) možno pozorovať u modelu UCAN WRF331G, ktorý teda najlepšie danú skutočnosť v súlade s pozorovaniami popisuje. Podobne vysoké hodnoty sú aj u modelu IDL WRFV35D. Naopak najnižšie u modelu CNRM ALADIN53, u ktorého sa hodnoty pohybujú od 0,81 až 0,91, čiže dosť veľké zmeny aj medzi jednotlivými indexmi. U väčšiny modelov sú však hodnoty korelácií nad 0,9, čo je prakticky veľmi dobrá podobnosť so skutočnosťou.

Opäť sa najvyššie hodnoty vyskytujú u indexu Helu a najnižšie u Conrada-Pollaka. Nižšie hodnoty ako u predošlého rozlíšenia sa vyskytujú u modelov KNMI RACMO2, SMHI RCA4. Výrazne vyššie u CSC REMO. U každého zo spomenutých modelov sa vplyv rozlíšenia na koreláciu prejavil inak. U CSC REMO sa pri vyššom rozlíšení viac prejavili zmeny v rozložení, ktoré boli v určitých oblastiach komplexnejšie (horské pásma, pobrežné oblasti, polostrovy, atď.).

Všetky simulácie prislúchajú jednej a tej istej globálnej reanalýze. Rozdiely sú teda dané len regionálnymi modelmi, ktoré sú v prípade najlepšej a najhoršej simulácie uvedené vyššie. V nasledujúcej podkapitole sú analyzované simulácie riadené viacerými globálnymi modelmi. Je teda venovaná väčšia pozornosť analýzy príspevkov jednotlivých regionálnych aj globálnych modelov do celkovej korelácie každej simulácie so skutočnosťou.

## **3.2 Regionálne simulácie riadené globálnymi, historické**

V tejto podkapitole sú analyzované výstupy simulácií regionálnych klimatických modelov riadených globálnymi. Každý regionálny model je riadený nejakým globálnym (podľa názvu v tab. 2.1 a 2.2). Jedná sa o historické simulácie za 30-ročné obdobie 1971 – 2000, takisto v dvoch rozlíšeniach 0,11° a 0,44°. K dispozícii je niekoľko simulácií regionálnych modelov pričom každý regionálny môže byť riadený viacerými globálnymi a naopak. Použitý je prakticky rovnaký spôsob analýzy ako u simulácii ERA-Interim v predošlej podkapitole.

Pre tento typ modelov máme k dispozícii podstatne viac simulácií ako v prípade simulácií riadených reanalýzou ERA-Interim. Hlavne pre rozlíšenie 0,44°, kde máme k dispozícii celkovo 18 simulácií (na obrázku 3.5 je 7 vybraných, zvyšok v prílohe 3 a 4), teda kombinácii GCM\_RCM. Pre rozlíšenie 0,11° ich je k dispozícii 9 (na obrázku 3.4 je 7 vybraných, zvyšok v prílohe 1). Výsledky sú popísané na obr. 3.4 a 3.5 a príslušné priestorové analýzy s pozorovaniami E-OBS v tab. 3.4 a 3.5. Modely simulujú jednotlivé indexy kontinentality celkom podľa očakávaní ako je z uvedených obrázkov zrejme (v porovnaní s obrázkom 1.1 uvedenom v 1. kapitole a prílohou 9). Na uvedených obrázkoch však nie sú uvedené všetky modelové simulácie, ktoré máme k dispozícii z dôvodu ich veľkého počtu hlavne pre rozlíšenie 0,44°. Pre každý index a každé rozlíšenie je na obrázkoch 3.4 a 3.5 uvedených 7 simulácií (zvyšok v prílohách 3 a 4). Napríklad pre rozlíšenie 0,44° sú uvedené len simulácie regionálneho modelu SMHI RCA4 a to tie, ktoré sú k dispozícii aj pre

budúce simulácie (kapitola 3.3). V tabuľkách 3.4 a 3.5 sú samozrejme uvedené korelácie všetkých, ktoré boli k dispozícii.

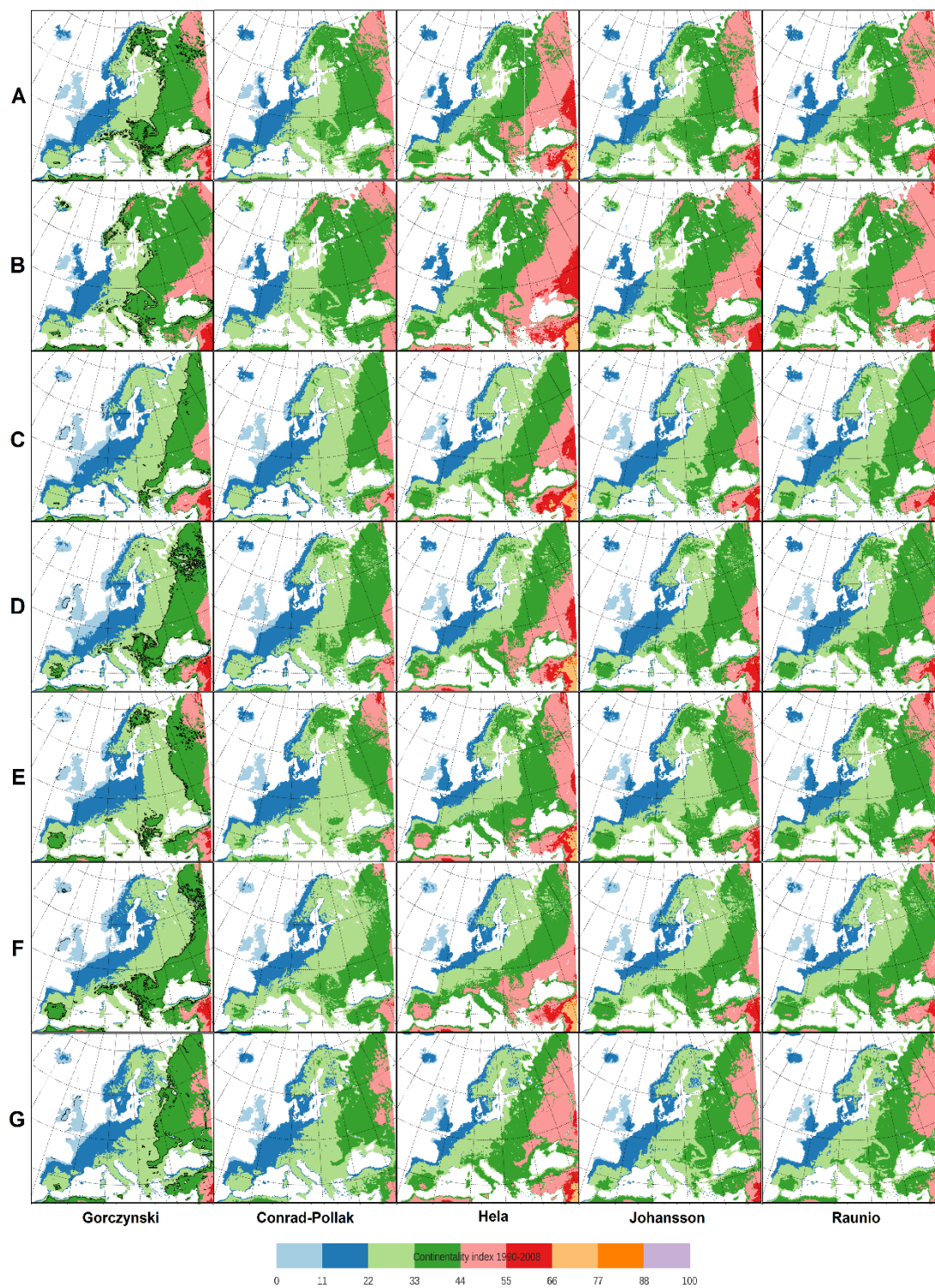
Na základe výsledkov uvedených v tab. 3.4 vidíme, že jednotlivé modely odlišne simulujú jednotlivé indexy kontinentality s rôznymi hodnotami korelácií s pozorovaniami. Hodnoty sa pohybujú prevažne v intervale 0,71 až 0,95, čo sú o niečo málo nižšie hodnoty ako pri simuláciách ERA-Interim. Okrem toho možno pozorovať aj značné rozdiely medzi jednotlivými modelmi, z ktorých väčšina sa pohybuje v intervale 0,8 až 0,9. Najpresnejšia simulácia s hodnotami okolo 0,93 až 0,95 je dvojica CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4. Naopak najhoršia, najmenej presná je IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F s hodnotami 0,71 až 0,74. Okrem tejto najhoršej simulácie sa už však žiadne pod úroveň 0,8 nenachádzajú.

Rozdiely medzi jednotlivými indexmi sú podobné ako v prípade simulácii ERA-Interim. Najlepšie je simulovaný index Helu, kde hodnoty len zriedka klesnú pod 0,9 (okrem uvedenej najhoršej simulácie s hodnotami okolo 0,71 – 0,74) a najhoršie index Conrada-Pollaka, ktorý sa naopak zväčša drží pod hodnotou 0,9. Taktiež platí totožnosť v hodnotách troch už spomínaných nezávislých indexov rovnako ako u predošlých reanalýzou riadených simulácií. Celkovo sa však jedná o celkom dobrú podobnosť s pozorovaniami (okrem najhoršej simulácie IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F) podobne ako aj u simulácii ERA-Interim aj keď s o niečo nižšími hodnotami.

Keďže sa však jedná o regionálne modely, ktoré sú riadené globálnymi, teda simulácie regionálnych modelov pomocou globálnych, odlišnou mierou ku korelácií prispieva daný regionálny a daný globálny model. K dispozícii máme viac regionálnych modelov riadených jedným globálnym a takisto aj jeden regionálny riadený viacerými globálnymi. Najčastejšie sa vyskytujúci regionálny model je SMHI RCA4. Podľa tab. 3.3 je riadený dohromady pomocou 5 globálnych modelov a to CNRM-CERFACS CNRM-CM5, ICHEC EC-EARTH, IPSL CM5A-MR, MOHC HadGEM2-ES a MPI-M ESM-LR.

Najčastejšie sa vyskytujúce globálne modely sú CNRM-CM5, EC-EARTH, CM5A-MR a ESM-LR ktoré oba riadia 2 regionálne modely. Na základe toho sa dá odhadnúť, ktorý regionálny resp. globálny model prispieva do celkovej miery korelácie najviac resp. najmenej. V prvom prípade keď porovnáme niekoľko simulácií s jedným regionálnym modelom riadenými niekoľkými globálnymi, podľa veľkosti celkovej hodnoty korelácie poznám, ktorý globálny model prispieva najviac, resp. najmenej, keďže sa jedná o simulácie s jedným a tým istým regionálnym modelom. Analogicky takto zistím aj príspevky jednotlivých regionálnych modelov pri simuláciách s jedným globálnym.

V prípade simulácií s regionálnym modelom SMHI RCA4 najviac prispieva globálny model CNRM-CERFACS CNRM-CM5, ktorý riadi SMHI RCA4 lepšie ako reanalýza (viď tab. 3.2 a 3.3) s hodnotami okolo 0,93 až 0,95 prakticky pre všetky indexy. Okrem toho aj model ICHEC EC-EARTH je u SMHI RCA4 mierne lepší ako reanalýza. Naopak najmenej model MOHC HadGEM2-ES s hodnotami okolo 0,83 až 0,91. Globálne modely CNRM CM5, EC-EARTH, CM5A-MR a ESM-LR riadia každý dva regionálne. Modely CNRM-CM5 a CM5A-MR najlepšie riadia model SMHI RCA4, EC-EARTH najlepšie riadi KNMI RACMO2 a ESM-LR oba modely CSC REMO a SMHI RCA4 približne rovnako.



**Obr. 3.4:** Modelové simulácie GCM\_RCM historické s rozlíšením  $0,11^\circ$  za obdobie 1971 - 2000 a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_SMHI RCA4, f) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, g) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO

	<b>G</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>J</b>	<b>R</b>
<b>CNRM-CERFACS CNRM-CM5_SMHI RCA4</b>	0,937	0,930	0,947	0,937	0,937
<b>ICHEC EC-EARTH_KNMI RACMO2</b>	0,932	0,915	0,949	0,932	0,932
<b>ICHEC EC-EARTH_SMHI RCA4</b>	0,923	0,902	0,941	0,923	0,923
<b>IPSL CM5A-MR_SMHI RCA4,</b>	0,898	0,880	0,917	0,898	0,898
<b>MPI-M ESM-LR_CSC REMO</b>	0,888	0,866	0,910	0,888	0,888
<b>MPI-M ESM-LR_SMHI RCA4</b>	0,884	0,854	0,911	0,884	0,884
<b>MOHC HadGEM2-ES_SMHI RCA4</b>	0,877	0,838	0,911	0,877	0,877
<b>CNRM-CERFACS CNRM-CM5_CNRM ALADIN53</b>	0,844	0,811	0,880	0,844	0,844
<b>IPSL CM5A MR_IPSLINERIS WRF331F</b>	0,714	0,743	0,732	0,714	0,714

**Tab. 3.4:** Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov s rozlíšením  $0,11^\circ$  s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1971 - 2000 (Gorczyński, Conrad-Pollak, Hela, Johansson, Raunio)

Čo sa týka kvalitatívneho posúdenia rozloženia jednotlivých indexov, tak rovnako ako pri reanalýze riadených simuláciách možno pozorovať charakteristické znaky termickej kontinentality. Čo sa týka dôležitej hranice 33 % oddeľujúcej oceánske a kontinentálne podnebie, tak jej poloha je pre jednotlivé simulácie odlišná. Odlišnosť medzi jednotlivými indexmi je otázkou ich definície. U indexu Helu leží táto hranica najzápadnejšie až najseverozápadnejšie naopak u indexu Conrada-Pollaka najvýchodnejšie až najjuhovýchodnejšie.

Pri simuláciách s rozlíšením  $0,11^\circ$  leží najzápadnejšie až najseverozápadnejšie u simulácie CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, kde leží miestami až viac ako 1000 km západnejšie až severozápadnejšie ako u pozorovaní. Naopak naj(juho)východnejšie leží u ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2 v severnej a u IPSL CM5A-MR\_SMHI RCA4 v južnej časti Európy. U prvého je to o takmer 500 km, u druhého aj o viac ako 500 km východnejšie až juhovýchodnejšie. Pri simuláciách s rozlíšením  $0,44^\circ$  leží naj(severo)západnejšie pri MOHC HadGEM2-ES\_DHMZ REGCM42 a najvýchodnejšie pri MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4 a MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4, ktoré sú oproti pozorovaniam posunuté miestami až o 1000 km uvedenými smermi a to hlavne v južnej časti Európy. Rovnako ako u simulácii ERA-Interim sú dané extrémny určené podľa plošného podielu kontinentálneho podnebia.

Pri analýze simulácii s rozlíšením  $0,44^\circ$  možno opäť usúdiť, že sa jedná o málo nižšie hodnoty ako pri rozlíšení  $0,11^\circ$ . Podobne ako pri simuláciách riadených reanalýzou ERA-Interim, kde sa vyššie korelácie vyskytovali práve rovnako pri

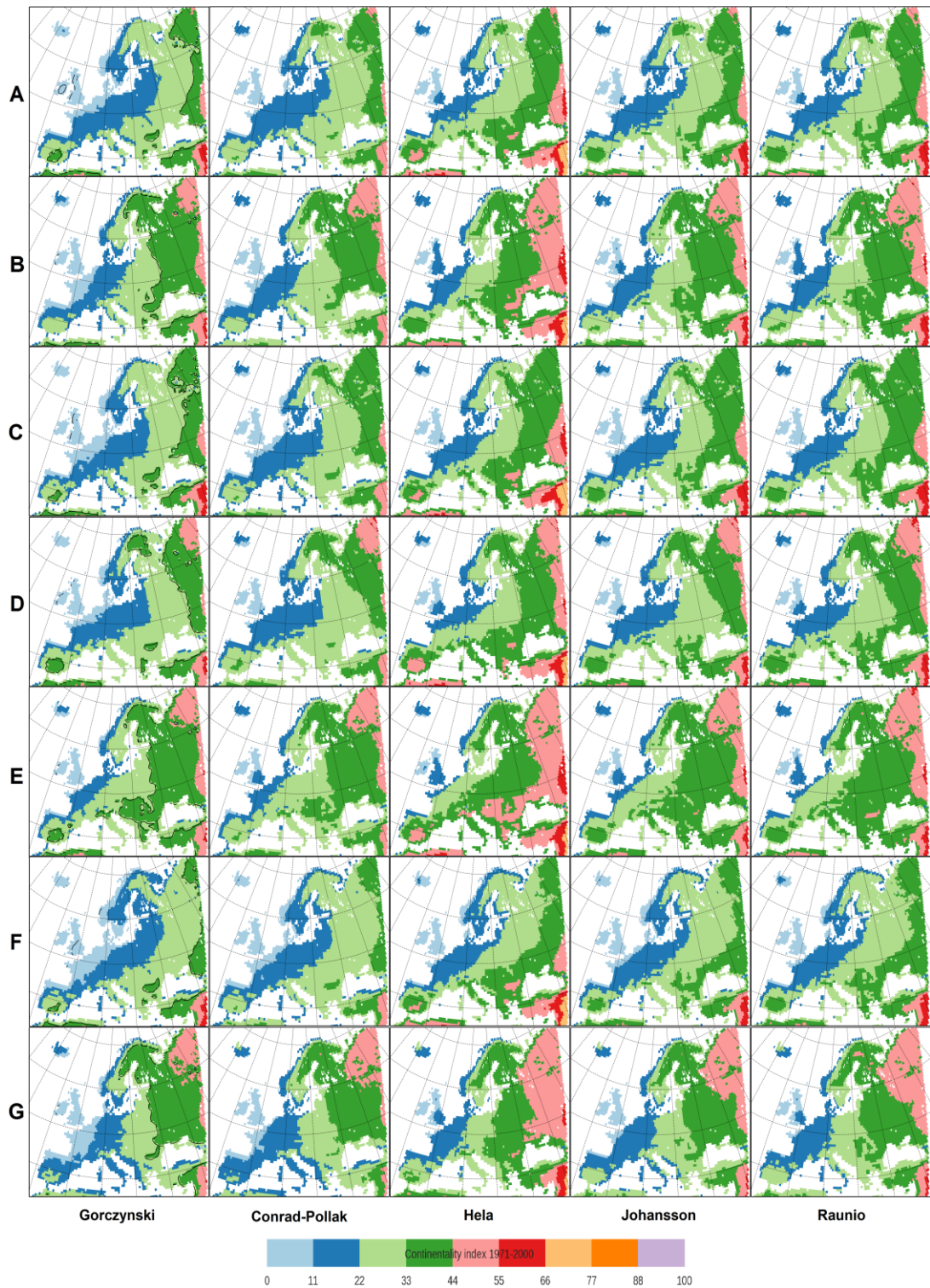
vyššom rozlíšení  $0,11^\circ$ . Tentokrát sú všetky simulácie v rozlíšení  $0,11^\circ$  aj v rozlíšení  $0,44^\circ$  a takmer u všetkých sa vyššie hodnoty vyskytujú u  $0,11^\circ$ . Uvedené hodnoty v tab. 3.4 sa pohybujú prevažne v intervale 0,69 až 0,95. Najlepšie simuluje skutočnosť simulácia ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D s hodnotami 0,93 až 0,95. Naopak najmenej simulácia IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F s hodnotami len 0,69 až 0,73. Sú to o niečo nižšie hodnoty ako pri rozlíšení  $0,11^\circ$ . Ostatné hodnoty však neklesajú pod 0,8 a v prípade simulácie MOHC HadGEM2-ES\_DHMZ REGCM42 sú blízko hodnotám zo simulácie ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D, u indexu Helu dokonca mierne nad (o 0,003). Najlepšie je simulovaný rovnako ako v predošlom prípade index Helu a najhoršie index Conrada-Pollaka. Taktiež sú totožné hodnoty pri 3 nezávislých indexoch.

Opäť možno odhadnúť akou mierou prispievajú jednotlivé regionálne a globálne zložky k celkovej korelácii uvedených simulácií. Najčastejšie sa vyskytujúci regionálny model je rovnako ako aj v predošlom prípade SMHI RCA4, ktorý je riadený pomocou 9 globálnych modelov. Sú to CCCma CanESM2, CNRM-CERFACS CNRM-CM5, ICHEC EC-EARTH, IPSL CM5A-MR, MIROC MIROC5, MPI-M ESM-LR, NCC NorESM1-M, NOAA-GFDL ESM2M a MOHC HadGEM2-ES. Tento je najlepšie riadený pomocou MIROC MIROC5 s hodnotami 0,91 až 0,93 (lepšie ako reanalýza u  $0,44^\circ$ , vid' tab. 3.3). Okrem toho ešte aj ICHEC EC-EARTH s veľmi blízkymi hodnotami. Naopak najhoršie pomocou NOAA-GFDL ESM2M s hodnotami 0,84 až 0,85.

Často vyskytujúci sa globálny model je CNRM-CM5 riadiaci 3 regionálne modely. Pri porovnávaní simulácií riadených globálnym modelom CNRM-CM5, tak najlepšie je na tom regionálny model SMHI RCA4 s hodnotami 0,89 – 0,92 a najhoršie HMS ALADIN52 s hodnotami okolo 0,84 až 0,89 pre všetky indexy. Pre globálny model EC-EARTH najviac prispieva regionálny IDL WRFV35D s hodnotami 0,93 až 0,95 čo sú najvyššie hodnoty korelácií spomedzi všetkých simulácií ako už bolo aj predtým spomenuté. Najmenej model SMHI RCA4 s hodnotami okolo 0,89 až 0,93, ktorý naopak pri predošlom globálnom modeli CNRM-CM5 prispieval najviac. Celkovo sa však pri globálnom modeli EC-EARTH jedná o najvyššie podobnosti s pozorovanou skutočnosťou.

Ešte možno spomenúť globálny model HadGEM2-ES, ktorý takisto riadi 3 regionálne a to CCLM COSMO, DHMZ REGCM42 a SMHI RCA4. V tomto prípade najlepšie prispieva regionálny model DHMZ REGCM42 s hodnotami okolo 0,92 až 0,95 a najhoršie SMHI RCA4 s hodnotami okolo 0,81 až 0,9. Okrem toho 2 regionálne modely riadia aj modely CCCma CanESM2 a ESM-LR.

Pri porovnaní so simuláciami ERA-Interim možno dospieť k záveru, že simulácie GCM\_RCM korelujú s pozorovaniami E-OBS o niečo horšie ako simulácie ERA-Interim (až na uvedené výnimky riadiacich globálnych modelov u niektorých regionálnych). Pri simuláciách ERA-Interim ani korelácia najhoršej simulácie neklesla pod 0,7 a najlepšie sa blížili až k 0,97. Keďže pri reanalýze sa používajú skutočné merania, ktoré sú do reanalýzy asimilované (Berrisford et al., 2011), dokážu tieto reanalýzou riadené simulácie lepšie simulovať klimatické podmienky v Európe ako simulácie GCM\_RCM. Naproti tomu je GCM inicializovaný ďaleko v histórii. U GCM sú asimilované len koncentrácie skleníkových plynov a iné okrajové podmienky (napr. land-use), ktoré určujú časovú osu (McGuffie, Henderson-Sellers, 2001).



**Obr. 3.5:** Modelové simulácie GCM\_RCM regionálneho modelu SMHI RCA4 historické s rozlíšením  $0,44^\circ$  za obdobie 1971 - 2000 a) CCCma CanESM2, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5, c) ICHEC EC-EARTH, d) IPSL CM5A-MR, e) MIROC MIROC5, f) NCC NorESM1-M, g) NOAA-GDFL ESM2M



	<b>G</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>J</b>	<b>R</b>
<b>ICHEC EC-EARTH_IDL WRFV35D</b>	0,939	0,935	0,943	0,939	0,939
<b>MOHC HadGEM2- ES_DHMZ REGCM42,</b>	0,934	0,922	0,945	0,934	0,934
<b>ICHEC EC-EARTH_KNMI RACMO2</b>	0,922	0,902	0,942	0,922	0,922
<b>MIROC MIROC5_SMHI RCA4</b>	0,919	0,910	0,933	0,919	0,919
<b>ICHEC EC-EARTH_SMHI RCA4</b>	0,912	0,889	0,931	0,912	0,912
<b>CCCma CanESM2_UCAN WRF341I</b>	0,908	0,899	0,922	0,908	0,908
<b>CNRM-CERFACS CNRM- CM5_SMHI RCA4</b>	0,902	0,892	0,916	0,902	0,902
<b>MOHC HadGEM2- ES_WEGC CCLM-COSMO</b>	0,884	0,841	0,920	0,884	0,884
<b>MPI-M ESM-LR_CSC REMO</b>	0,879	0,850	0,905	0,879	0,879
<b>CNRM-CERFACS CNRM- CM5_CNRM ALADIN53</b>	0,877	0,855	0,903	0,877	0,877
<b>IPSL CM5A-MR_SMHI RCA4</b>	0,875	0,851	0,898	0,875	0,875
<b>NCC NorESM1-M_SMHI RCA4</b>	0,874	0,828	0,908	0,874	0,874
<b>CCCma CanESM2_SMHI RCA4</b>	0,874	0,836	0,904	0,874	0,874
<b>CNRM-CM5_HMS ALADIN52</b>	0,865	0,842	0,892	0,865	0,865
<b>MPI-M ESM-LR_SMHI RCA4</b>	0,864	0,828	0,896	0,864	0,864
<b>MOHC HadGEM2- ES_SMHI RCA4</b>	0,864	0,815	0,904	0,864	0,864
<b>NOAA-GFDL ESM2M SMHI RCA4</b>	0,842	0,839	0,857	0,842	0,842
<b>IPSL CM5A-MR_ IPSLINERIS WRF331F</b>	0,699	0,730	0,714	0,699	0,699

**Tab. 3.5:** Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov s rozlíšením 0,44° s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1971 - 2000 (Gorczynski, Conrad-Pollak, Hela, Johansson, Raunio)

### 3.3 Regionálne simulácie riadené globálnymi, budúce

Okrem historických simulácií GCM\_RCM, ktoré simulovali obdobie od 1960 do 2005 s vybraným 30-ročným obdobím 1971 - 2000 sú k dispozícii aj budúce, tzv. scenáre (*scenarios*), simulujúce od 2006 do 2100 s dvoma vybranými 30-ročnými obdobiami a to 2021 - 2050 a 2071 - 2100. Uvedené budúce simulácie slúžia pre analýzu vývoja do budúcnosti, teda zmeny v priestorovom rozložení indexov kontinentality v rámci Európy. Jednak zmeny od historických simulácií ako aj od pozorovaní.

Budúce simulácie sú k dispozícii pre všetky analyzované historické simulácie GCM\_RCM s rozlíšením  $0,11^\circ$ , s rozlíšením  $0,44^\circ$  okrem MOHC HadGEM2-ES\_DHMZ REGCM42. Okrem rozlíšení sú k dispozícii aj dva možné scenáre budúceho vývoja a to RCP4.5 a RCP8.5 (*Representative Concentration Pathway*) pre hodnoty radiačného forcingu 4,5 a  $8,5 \text{ W.m}^{-2}$  v roku 2100 (Van Vuuren et al., 2011). Pre každé obdobie a scenár nie sú ale k dispozícii rovnaké dvojice GCM\_RCM (viď tabuľky 2.1 a 2.2).

Pri analýze sa skúma hlavne posun hranice 33 %, ktorá oddeľuje oceánske a kontinentálne podnebie. Jednotlivé simulácie sú uvedené na obr. 3.6 až 3.13. Podľa máp, ktoré sú na uvedenom obrázku, možno vyvodiť, že došlo k určitej zmene v priestorovom rozložení kontinentality a to pre všetky indexy. Jednotlivé hranice (11 %, 22 %, ...) rovnako ako aj hranica 33 % sa posúvajú určitými smermi. V niektorých oblastiach dochádza k nárastu kontinentality, v iných zasa naopak k poklesu. Rozdiel oproti historickým simuláciám 1971 - 2000 je patrnejší v simuláciách za obdobie 2071 - 2100. Jedná sa prakticky o 100 rokov systematickej klimatickej zmeny, ktorú dané simulácie zohľadňujú.

Samozrejme je zmena v rámci jednotlivých indexov odlišná pre rôzne budúce obdobia, no všetky celkovo zohľadňujú charakteristiky danej zmeny. Rozdiel možno pozorovať väčšinou len v miere do akej sa dané hranice posunuli. Lepšie možno určiť rozdiely pri simuláciách s rozlíšením  $0,11^\circ$ , kde možno určiť komplexnejší posun jednotlivých hraníc ako pri  $0,44^\circ$ . Pri  $0,44^\circ$  zase možno lepšie určiť smer a mieru posunu. Okrem toho sú rozdiely aj medzi jednotlivými scenármi možného budúceho vývoja RCP4.5 a RCP8.5. Scenár RCP8.5 uvažuje nárast radiačného forcingu až na hodnotu  $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ , čiže väčší dopad na klimatickú zmenu. Možno teda očakávať, že pri tomto scenári budú zmeny výraznejšie. Na kontinentalitu však môže výsledný dopad byť odlišný a to podľa miery odlišnosti zmien v teplote u určitých obdobiach počas roka. Zmeny sú oproti historickým simuláciám popísané len kvalitatívne (najväčšia resp. najmenšia zmena), oproti pozorovaniám sú uvedené aj konkrétne posuny a ich smer (tab. 3.6 až 3.9).

Čo sa týka zmien oproti historickým simuláciám, tak u indexu Gorczyńskiego je posun hranice kontinentality 33 % prevažne východným smerom, ktorá predstavuje rozhranie medzi oceánskym a kontinentálnym pásmom. U tejto hranice možno pozorovať najvýraznejší posun smerom na východ medzi  $50^\circ$  a  $70^\circ \text{N}$  a to v období 2071 – 2100. V južnej časti medzi  $40^\circ$  a  $50^\circ \text{N}$  u niektorých simulácií mierny posun na severozápad. Prakticky v severných oblastiach Európy sa kontinentalita zmierňuje

(pokles indexu) a naopak v južných sa ešte mierne prehľbuje (nárast indexu), hlavne na polostrovoch. Na uvedených obrázkoch možno pozorovať nárast hlavne na Pyrenejskom polostrove a na Balkáne. Zmeny sú samozrejme výraznejšie u simulácii so scenárom RCP8.5 v porovnaní so scenárom RCP4.5.

U indexu Conrada-Pollaka, ktorý je vlastne korigovaným tvarom indexu Gorczyńskiego, sú zmeny podobné. Akurát o niečo menej výrazné zmeny v porovnaní s Gorczyńskim v oblastiach južnej Európy, kde v rámci tohto indexu možno pozorovať do budúcnosti o niečo menšie zmeny v náraste. U niektorých modelových výstupov dochádza dokonca k poklesu (napr. Balkán). Pokles indexu v severnej Európe je u mnohých modelov výraznejší. Hranica 33 % sa posúva prevažne východným až juhovýchodným smerom, v južnej časti Európy západným až severozápadným smerom. Komplexnejší je posun hranice hlavne v strednej a juhovýchodnej Európe, kadiaľ táto hranica prechádza. Je to zapríčinené prítomnosťou horských pásiem, kde je zmena kontinentality zložitejšia. Rovnako ako u indexu Gorczyńskiego sú zmeny výraznejšie u scenára RCP8.5.

U indexu Helu sú zmeny pravdepodobne najvýraznejšie. Obecne u tohto indexu sú najväčšie rozdiely v rozložení rámci Európy medzi oceánskymi a kontinentálnymi oblasťami. Taktiež tu možno pozorovať na mnohých miestach oveľa vyššie hodnoty ako u iných indexov, pričom hodnoty v rámci Európy prekračujú až 60 % u historických simulácii. U budúcich a to hlavne v období 2071 - 2100 so scenárom RCP8.5 možno pozorovať hodnoty blízke 70 %. Rovnako ako u predošlých dvoch indexov dochádza k poklesu v severnej a nárastu v južnej Európe, akurát sú zmeny výraznejšie. Posun hranice 33 % prevažne východným smerom akurát so značnými rozdielmi medzi jednotlivými simuláciami. U mnohých prevažne juhovýchodným smerom. Rozdiely medzi RCP4.5 a RCP8.5 sa značne líšia v závislosti od jednotlivých simulácii.

Indexy Johanssona a Raunia sú závislé od Gorczyńskiego, keďže sa líšia iba o konštanty. Zmeny ako aj posuny uvedenej hranice prevažne rovnakým smerom akurát mierne odlišnou mierou pre každý index. Zmena je u RCP8.5 rovnako ako u Gorczyńskiego výraznejšia takmer u všetkých modelov. U niektorých modelov sú však v porovnaní s inými zmeny výraznejšie. Neplatí tu však vždy ako u indexu Gorczyńskiego, že na severe kontinentalita klesá a na juhu stúpa. Hlavne u indexu Johanssona u niektorých simulácii možno pozorovať nárast kontinentality v niektorých oblastiach severnej Európy.

Čo sa týka zmien v závislosti od jednotlivých modelov, je analyzované aj ktoré modely simulujú najväčšiu resp. najmenšiu zmenu. Líšia sa v závislosti od budúceho obdobia ale aj scenára. Pri simuláciách s rozlíšením  $0,11^\circ$ , scenárom RCP4.5 za obdobie 2021 – 2050 simuluje najväčšiu zmenu resp. aj najväčší posun hranice 33 % dvojica ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4 a naopak najmenšiu dvojica MPI-M ESM-LR\_CSC REMO. Pri rovnakom scenári akurát za obdobie 2071 - 2100 sú to CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4 s najväčšou zmenou (posunom) a rovnako ako v predošlom prípade MPI-M ESM-LR\_CSC REMO s najmenšou. Pri scenári RCP8.5 za obdobie 2021 - 2050 je simulácia s najväčšou zmenou dvojica ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4 a s najmenšou MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4. Za obdobie 2071 – 2100 sa jedná o CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4 s najväčšou a ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2 s najmenšou zmenou.

Pri simuláciách s rozlíšením  $0,44^\circ$  sú na obr. 3.8, 3.9 a 3.12, 3.13 už len simulácie riadiace regionálny model SMHI RCA4 (ostatné v prílohe 5 až 8). V tomto prípade sú uvedené už len príslušné riadiace globálne modely. Pre scenár RCP4.5 a obdobie 2021 - 2050 sú to NOAA-GFDL ESM2M\_SMHI RCA4 s najväčšou a NCC NorESM1-M\_SMHI RCA4 s najmenšou zmenou. Pre rovnaký scenár a obdobie 2071 - 2100 sa jedná takisto o NOAA-GFDL ESM2M\_SMHI RCA4 s najväčšou a NCC NorESM1-M\_SMHI RCA4 s najmenšou zmenou. Zatiaľ to platí pre všetky indexy. U scenára RCP8.5 a obdobie 2021 - 2050 sú to rovnako NOAA-GFDL ESM2M\_SMHI RCA4 s najväčšou zmenou, ale okrem indexu Raunia, kde sa jednalo o dvojicu ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4. Najmenšiu zmenu simulovala rovnako dvojica NCC NorESM1-M\_SMHI RCA4. Rovnako a pre všetky indexy rovnako to platilo aj pre obdobie 2071 - 2100. Možno si všimnúť, že všetky uvedené modely riadia regionálny model SMHI RCA4.

Zmeny sú lepšie a presnejšie viditeľné u simulácií s rozlíšením  $0,11^\circ$ , ktoré sú podrobne popísané vyššie. Dvojice GCM\_RCM, ktoré simulujú v rozlíšení  $0,11^\circ$ , simulujú aj v  $0,44^\circ$ . U simulácií s rozlíšením  $0,44^\circ$  možno pozorovať rovnaké trendy ako u  $0,11^\circ$ , ale lokálne nie sú dané zmeny až tak zrejme. U rozlíšenia  $0,11^\circ$  sú zmeny v oblastiach hranice 33 % komplexnejšie, čo platí aj pre posun danej hranice, kde u  $0,44^\circ$  je zjavný viac-menej len smer posunu. Nemožno určiť komplexnejší charakter posunu v určitých lokálnych oblastiach (napr. stredná Európa a Balkán).

Smer posunu a miera do akej sa posúva dôležitá hranica 33 % v porovnaní s pozorovaniami E-OBS sú dôkladnejšie rozobrané a analyzované v tab. 3.5 až 3.8 pre simulácie s rozlíšením  $0,11^\circ$  (obr. 3.6, 3.7, 3.10, 3.11 a príloha 2). Pre simulácie s rozlíšením  $0,44^\circ$  sú tabuľky uvedené v prílohe 10 a 11. Posuny boli určené na základe vyčítania hranice z máp simulácií (obr. 3.6 - 3.13, prílohy 2, 5 - 8) a pozorovaní E-OBS (obr. 1.1 a príloha 9) samozrejme s presnosťou na 100 km. Z máp bola vyčítané polohy a posuny v šírkových a dĺžkových stupňoch a z toho približne určený posun v km. Na  $70^\circ\text{N}$  sú poludníky vzdialené približne 40 km, na  $60^\circ\text{N}$  55 km, na  $50^\circ\text{N}$  70 km a na  $40^\circ\text{N}$  približne 85 km. Rovnobežky sú vzdialené všade rovnako. Z toho boli určené približné vzdialenosti rovnobežiek na mapách. Pre oblasť Európy sú  $10^\circ$  poludníky vzdialené 400 - 900 km.  $10^\circ$  rovnobežky asi 1100 km. Samozrejme uvažujeme Gaussovské súradnice. Smer posunu bol určený podľa toho ako bola hranica orientovaná (napr. sever-juh, severovýchod-juhozápad, atď.).

Ako už bolo spomenuté, približný posun hranice je buď ústup smerom na východ až juhovýchod, resp. návrat späť na západ až severozápad. Posuny sú však odlišné pre rôzne zemepisné šírky. V závislosti od jednotlivých modelových výstupov ako aj indexov sú v uvedených tabuľkách rozobrané a popísané a to pre zemepisné šírky sever Európy ( $60^\circ - 70^\circ\text{N}$ ), stred ( $50^\circ - 60^\circ\text{N}$ ) a juh ( $40^\circ - 50^\circ\text{N}$ ).

Hranica sa posúva odlišným smerom pre jednotlivé oblasti zemepisných šírok. U niektorých modelov, kde napríklad v severnej a strednej časti Európy prevažuje posun východným až juhovýchodným smerom, je v južnej časti posun celkom opačný a to najčastejšie severozápadným smerom. U niektorých simulácií a indexov sa hranica posúva len v jednej oblasti, u iných zasa napríklad len v dvoch. U väčšiny simulácií však prevažuje posun na východ až juhovýchod (zriedka severovýchod) nad simuláciami s posunom na západ až severozápad (zriedka juhozápad). Zriedkavejšie sa vyskytujú posuny aj na sever resp. juh.

Prakticky u všetkých simulácii aj indexov je maximálny posun cca 1000 km a len veľmi zriedka je táto miera prekročená. Pre chýbajúce hodnoty v tabuľkách je posun prakticky zanedbateľný resp. nepatrný (menej ako 100 km). Na základe tabuliek možno usúdiť, že k najvýraznejším posunom dochádza v priemere práve v severnej Európe a k najmenším v strednej Európe, kde sú aj minimálne zmeny kontinentality. Simulácia s najvýraznejším posunom hraníc je IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F pre obdobie 2021 – 2050 a scenár RCP4.5 a to s posunom až do 1000 km. Pre obdobie 2021 – 2050 a scenár RCP8.5 je to CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53 s posunom značne nad 500 km. Pre obdobie 2071 – 2100 a scenár RCP4.5 je to rovnaký model s posunom takisto až do 1000 km a rovnako aj pre scenár RCP8.5, kde sa hranica takisto posúva až do 1000 km. Posuny u uvedených simulácii sú najvýraznejšie pre všetky indexy a k výrazným posunom dochádza prakticky vo všetkých zemepisných šírkach.

Naopak najmenší posun hranice 33 % je u MPI-M ESM-LR\_CSC REMO pre obdobie 2021 – 2050 a scenár RCP4.5, kde sa hranica posúva len do 500 km a to len v strednej a severnej Európe. U indexov Gorczynského a Conrada-Pollaka len v strednej Európe. Ďalej je to ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2 pre obdobie 2021 – 2050 a scenár RCP8.5, kde takisto dochádza k posunu len do 500 km a to len v severnej a strednej Európe. Pre obdobie 2071 – 2100 sú to rovnako MPI-M ESM-LR\_CSC REMO a ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2 pre scenáre RCP4.5 resp. RCP8.5 už ale s o niečo väčším posunom. U scenára RCP8.5 je tento posun miestami väčší ako 500 km a dochádza k nemu už aj v južnej Európe.

Posun uvedenej hranice a hlavne jej miera na základe budúcich simulácii nám teda určuje ktorým smerom a o koľko ustúpi, resp. postúpi oblasť s kontinentálnym podnebiem v horizonte 50 resp. 100 rokov. Z toho možno na základe uvedených tabuliek (tab. 3.6 až 3.9) určiť približný ročný posun uvedenej hranice do budúca. Takýto priemerný ročný posun možno určiť ako výsledný vektor  $\vec{P}$  jednotlivých vektorových posunov  $\vec{p}_i$  u jednotlivých modelov, kde vektor udáva smer posunu a jeho veľkosť mieru:

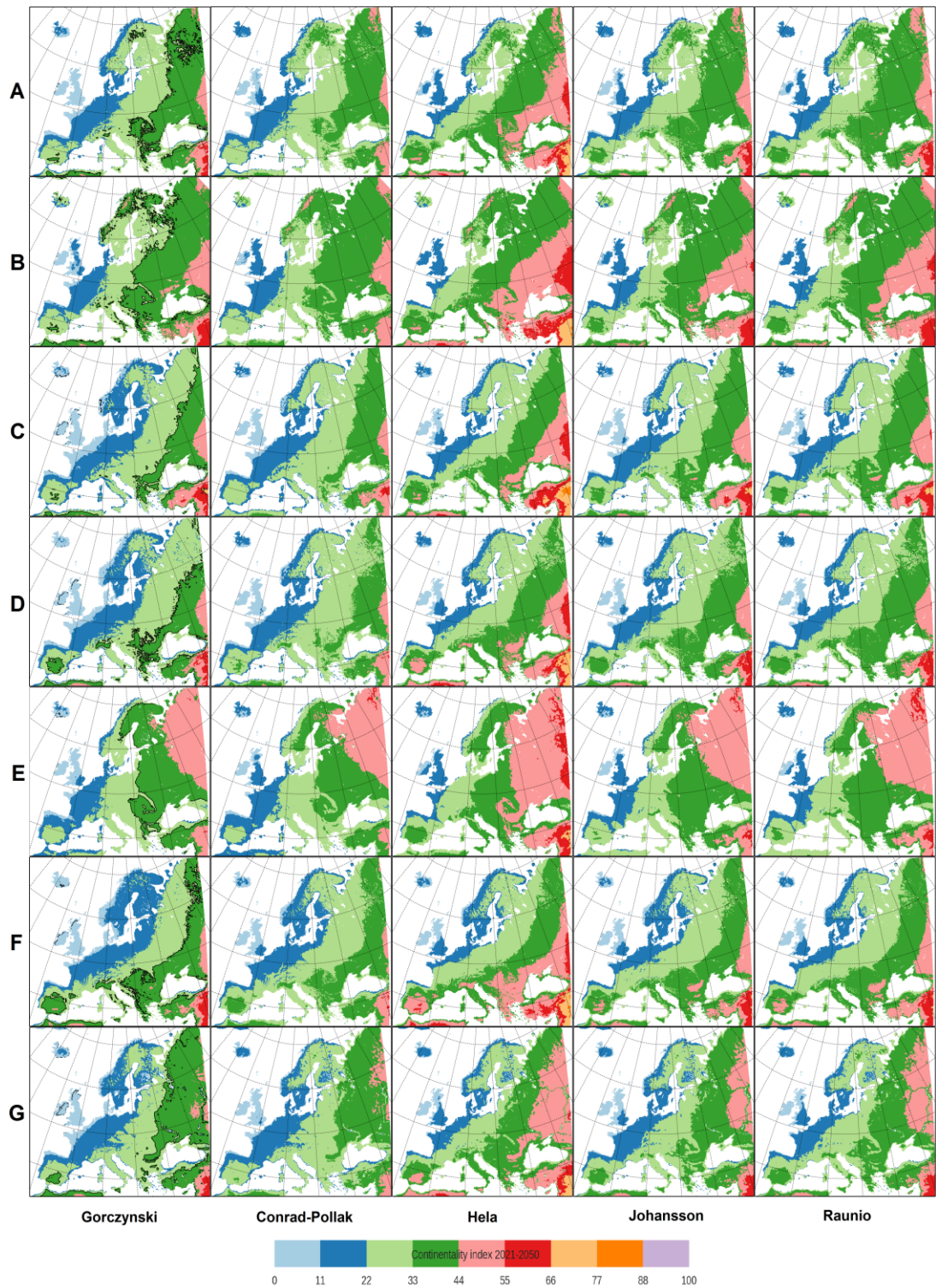
$$\vec{P} = \frac{1}{Nd} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i = \frac{1}{Nd} \sum_{i=1}^N p_i \vec{e}_i \quad (6)$$

$N$  značí počet simulácii, z ktorých je priemer počítaný a  $d$  je časový rozdiel medzi referenčným (historické simulácie resp. pozorovania E-OBS, 1971 – 2000) a budúcim obdobím (2021 – 2050 resp. 2071 – 2100).  $\vec{e}_i$  značí jednotkový vektor v smere posunu. Veľkosti posunov  $p_i$  sú uvedené v tabuľkách 3.6 – 3.9. Vždy sa berie do úvahy najväčší posun. Ak je pri posune znak <, berie sa do úvahy uvedený posun. Ak je znak >, berie sa posun o 100 km väčší. Veľkosť vektora  $\vec{P}$  udáva priemerný ročný posun. V tab. 4.1 sú uvedené jednotlivé priemerné ročné posuny v jednotlivých šírkových oblastiach a pre jednotlivé RCP scenáre. Do úvahy sme brali budúce obdobie 2071 – 2100, teda  $d = 100$ .

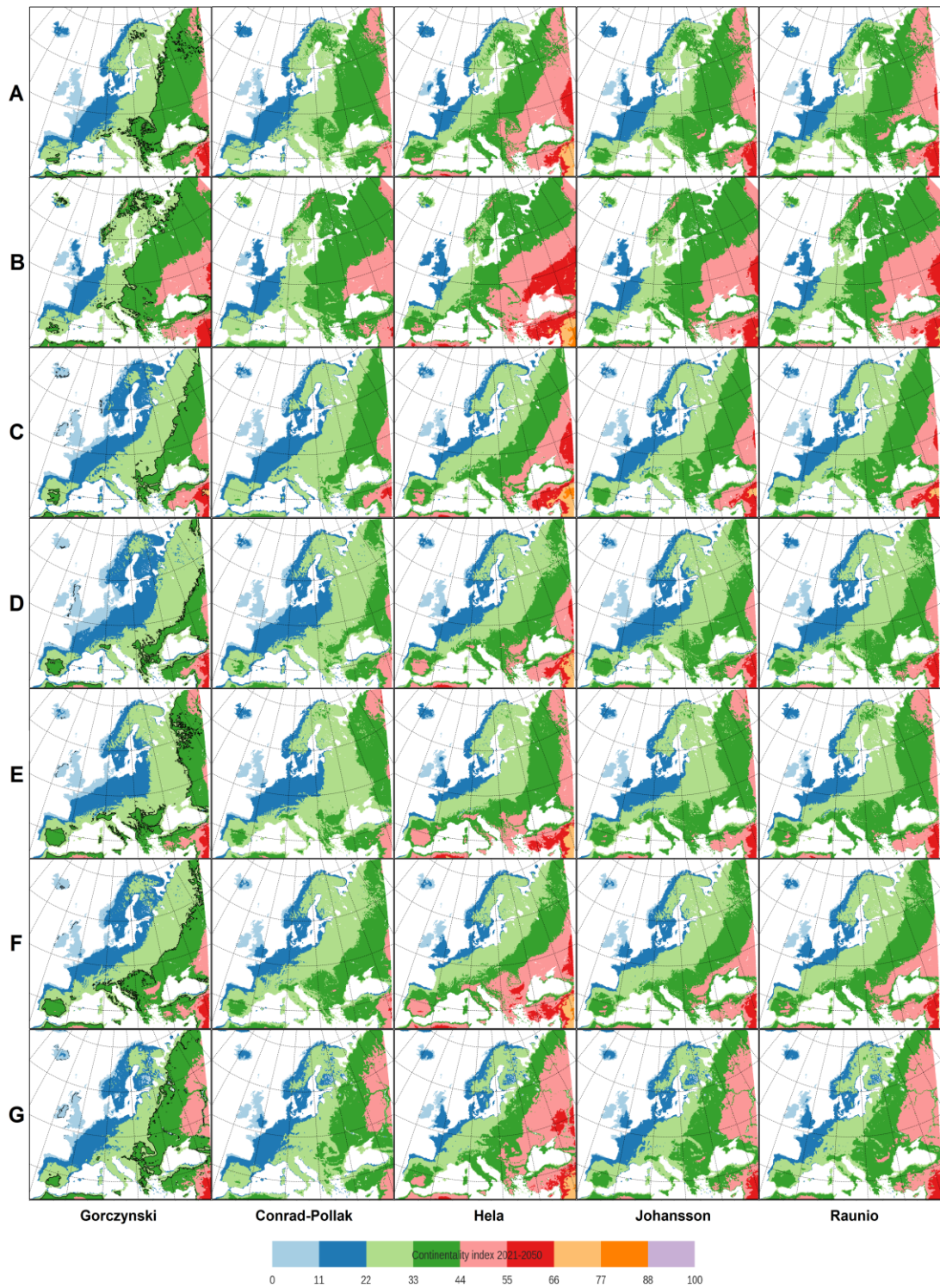
V prílohe sú uvedené aj tabuľky posunov pre budúce simulácie s rozlíšením  $0,44^\circ$  (prílohy 10 a 11). Ak chýbajú hodnoty v tabuľke v rámci simulácie u všetkých indexov aj širok, znamená to že daná simulácia nie je pre dané obdobie a scenár k dispozícii (na základe tab. 2.1 a 2.2). Ako už bolo spomenuté, pri menšom rozlíšení je možno lepšie vidieť smer posunu, teda posun je menej komplexnejší. Pri tomto rozlíšení je takisto k dispozícii viac simulácii. V období 2021 – 2050 pre scenár

RCP4.5 pozorujeme najväčší posun vo všetkých zemepisných šírkach v simulácii HadGEM2-ES\_WEGC CCLM-COSMO, kde možno hlavne v strednej a južnej časti Európy pozorovať posun až do 1000 km. U scenára RCP8.5 je to IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F s posunom v severnej Európe až nad 1000 km. V období 2071 – 2100 u scenára RCP4.5 je to rovnako ako v predošlom období MOHC HadGEM2-ES\_WEGC CCLM-COSMO rovnako s posunom až do 1000 km a u scenára RCP8.5 sú to MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4 a CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53 až do 1000 km prakticky vo všetkých oblastiach zemepisných šírok.

Naopak najmenšie posuny možno pozorovať v období 2021 – 2050 so scenárom RCP4.5 u ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2 s posunmi väčšinou len do 500 km (len zriedka nad). U scenára RCP8.5 je to ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D takisto s posunmi len do 500 km. V období 2071 – 2100 so scenárom RCP4.5 sú to NOAA-GFDL ESM2M\_SMHI RCA4, MIROC MIROC5\_SMHI RCA4 a ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2 rovnako väčšinou s posunom len do 500 km a u scenára RCP8.5 ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D, kde u Gorczyńskiego indexu nedochádza k takmer žiadnemu posunu. U pokročilejšieho obdobia 2071 – 2100 sú už hodnoty posunu pre jednotlivé indexy aj uvedené pásma v Európe pre konkrétny modelový výstup už dosť rozkolísané hlavne pri scenári RCP8.5 a platí to pre obe rozlíšenia 0,11° aj 0,44°. Napríklad v určitej oblasti nedochádza k takmer žiadnemu posunu a v inej sa naopak hranica posúva aj o viac ako 1000 km. Ako príklad možno uviesť simuláciu MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4.

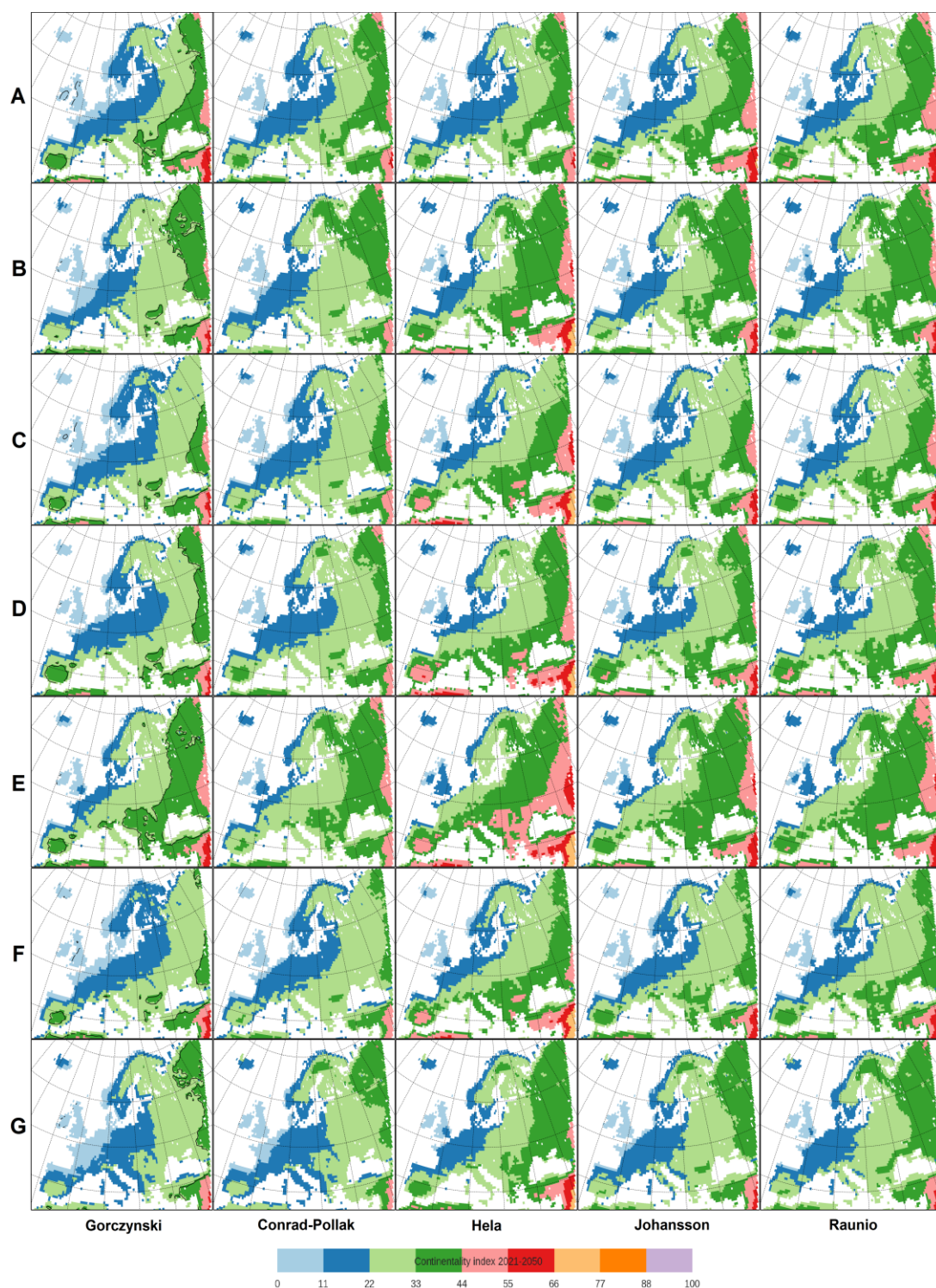


**Obr. 3.6:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením  $0,11^\circ$  a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, g) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO

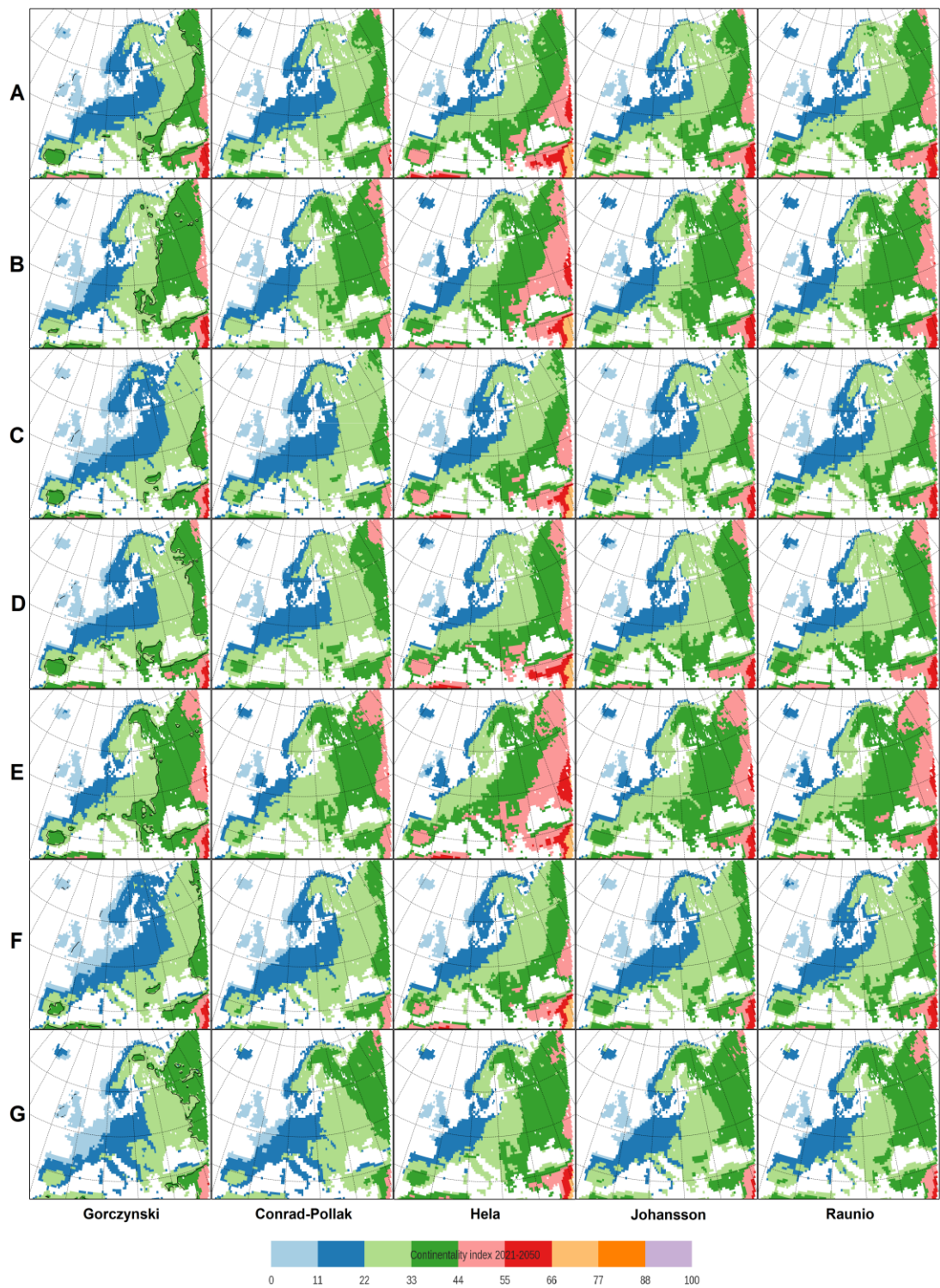


**Obr. 3.7:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením  $0,11^\circ$  a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, g) MPI-M-ESM-LR\_CSC REMO

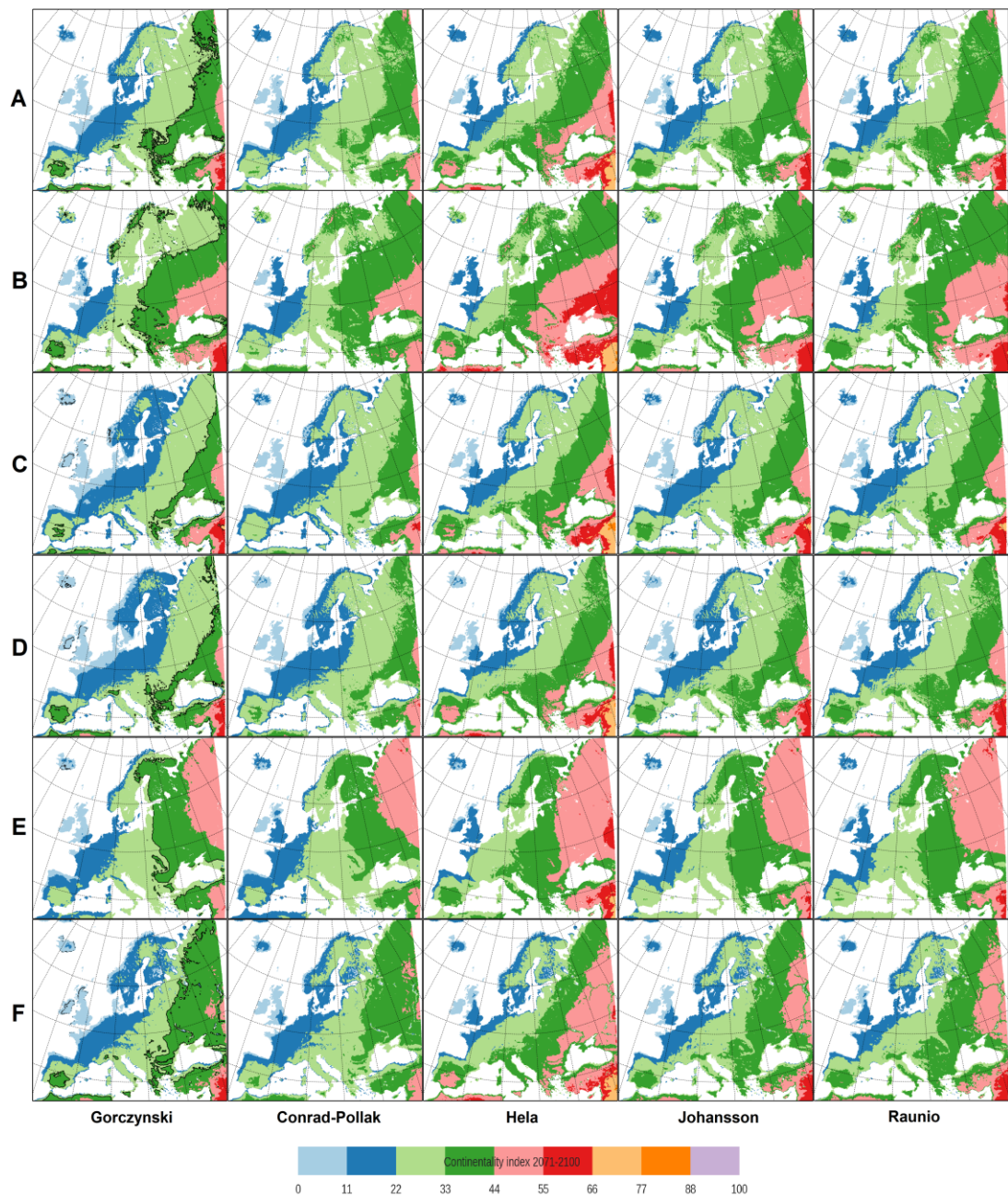




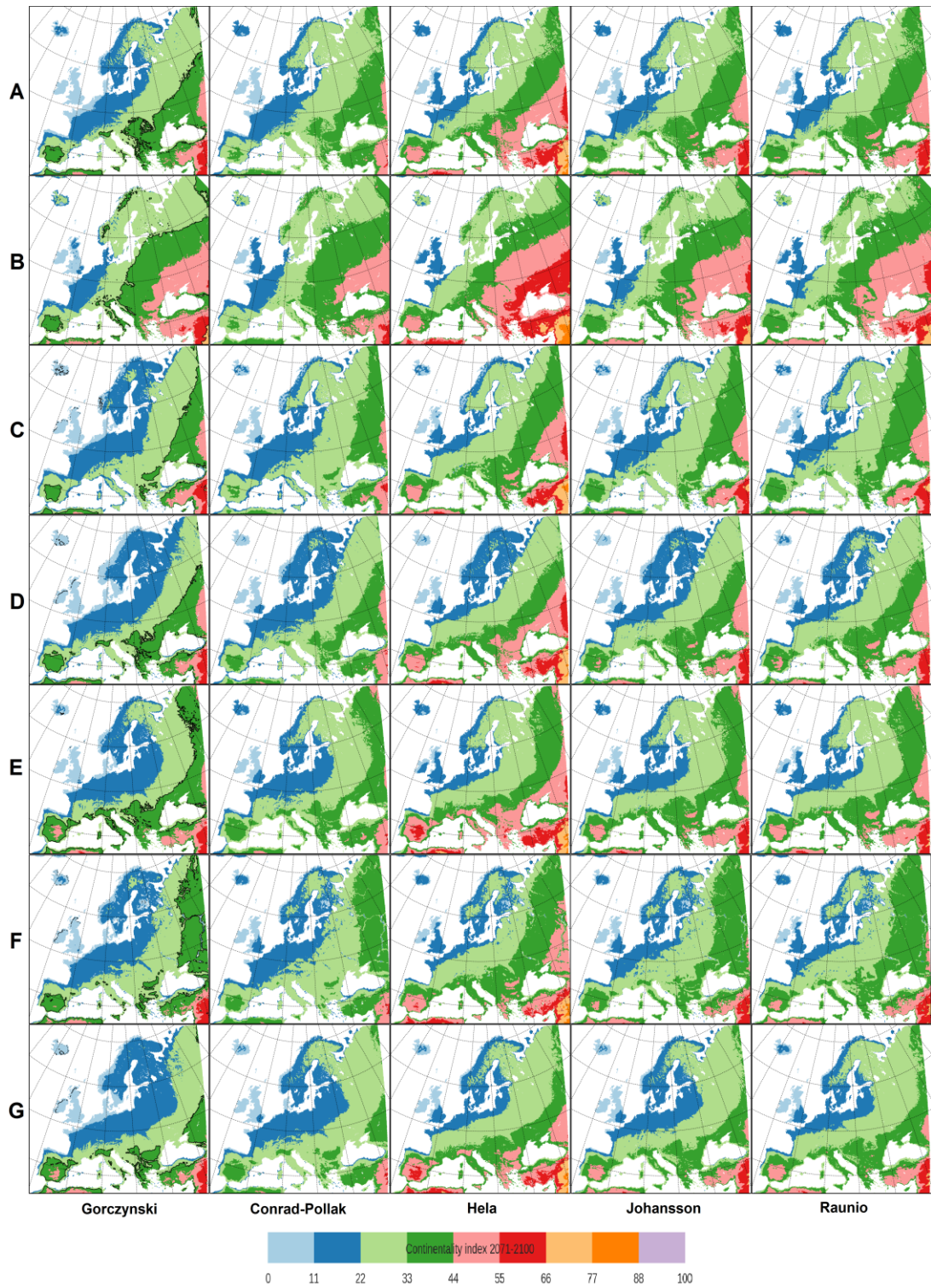
**Obr. 3.8:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúceho regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením 0,44° a) CCCma CanESM2, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5, c) ICHEC EC-EARTH, d) IPSL CM5A-MR, e) MIROC MIROC5, f) NCC NorESM1-M, g) NOAA-GDFL ESM2M



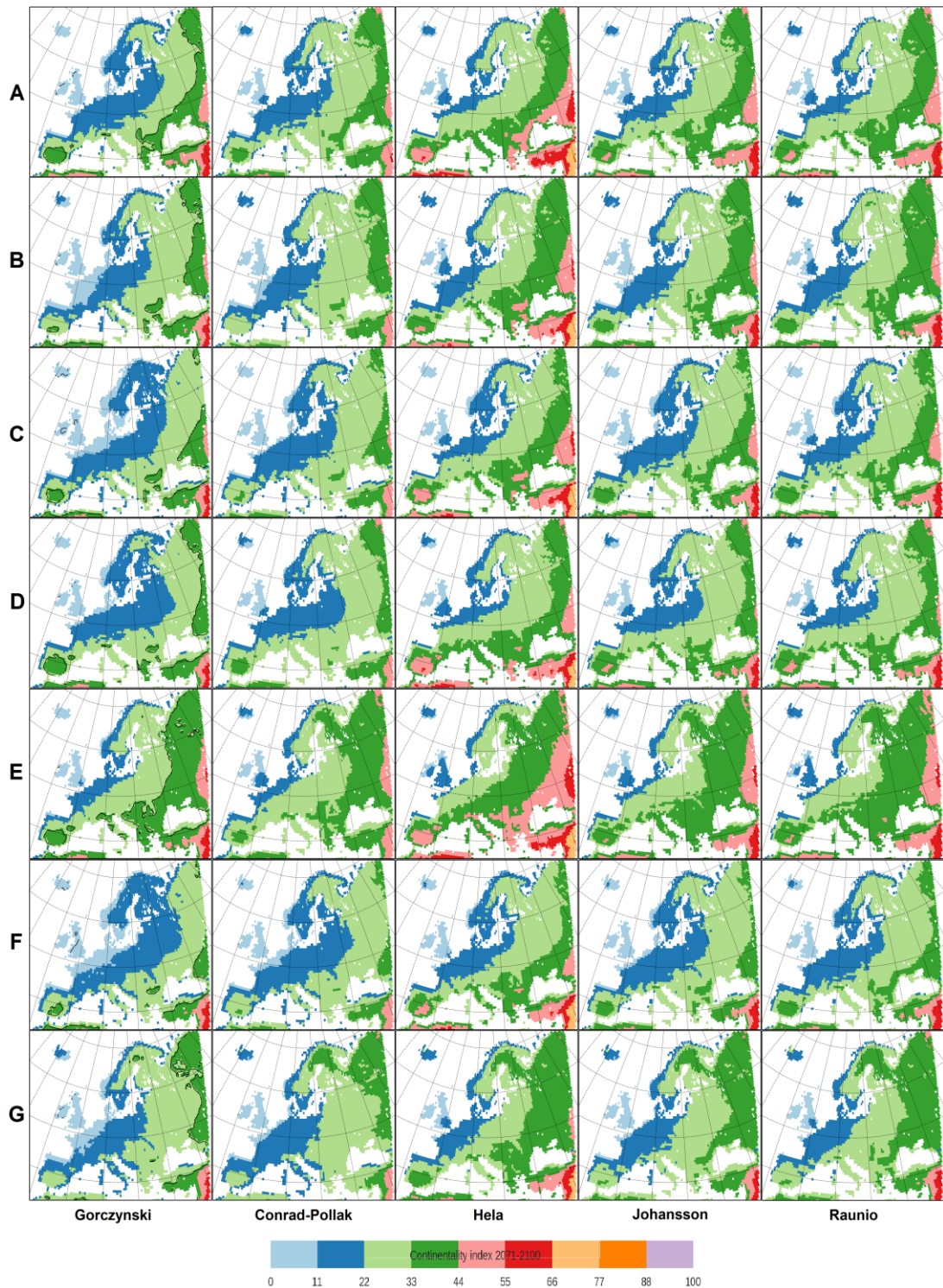
**Obr. 3.9:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúceho regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením  $0,44^\circ$  a) CCCma CanESM2, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5, c) ICHEC EC-EARTH, d) IPSL CM5A-MR, e) MIROC MIROC5, f) NCC NorESM1-M, g) NOAA-GDFL ESM2M



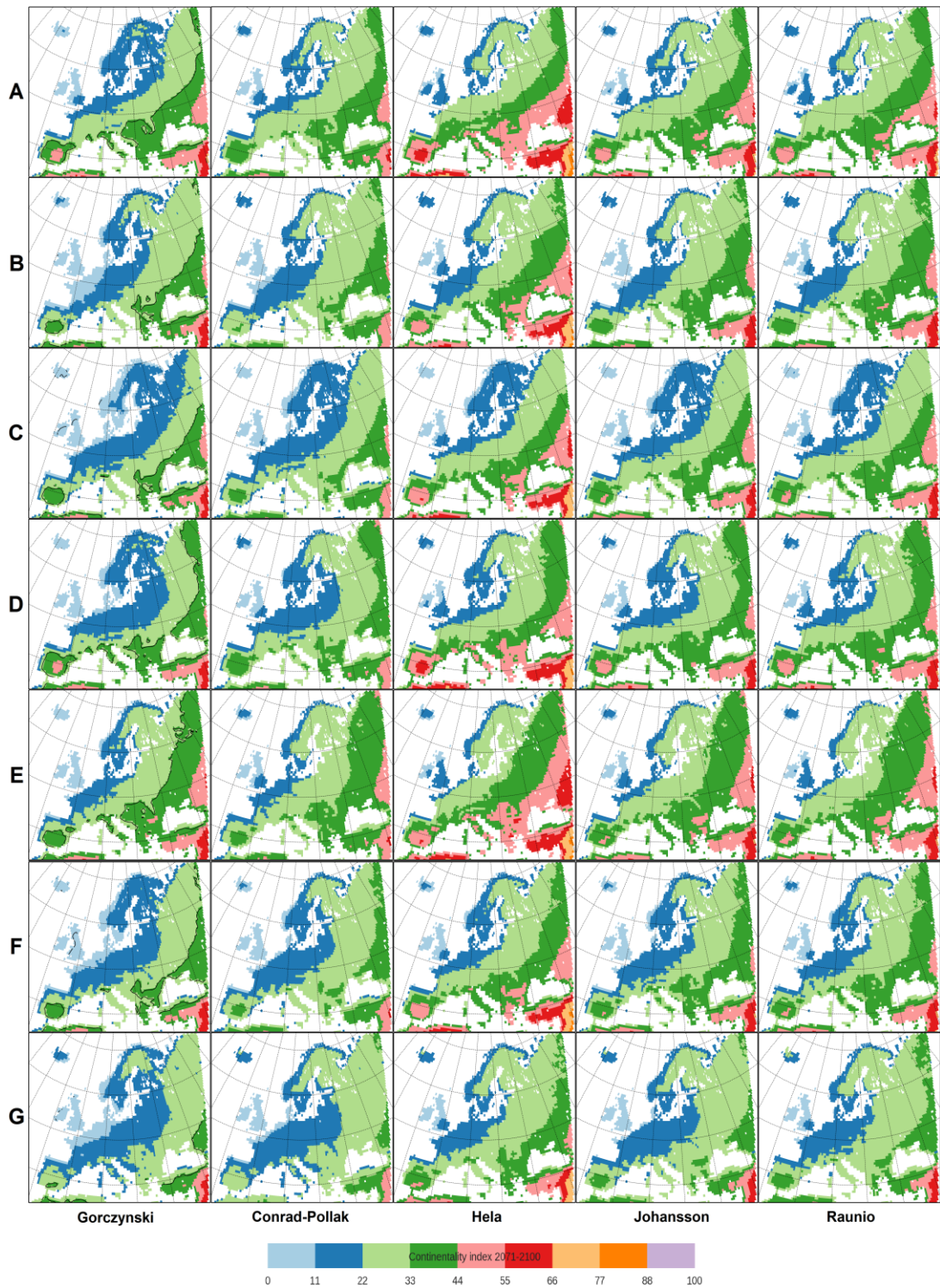
**Obr. 3.10:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením  $0,11^\circ$  a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO



**Obr. 3.11:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením  $0,11^\circ$  a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_SMHI RCA4, f) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, g) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4



**Obr. 3.12:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením 0,44° a) CCCma CanESM2, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5, c) ICHEC EC-EARTH, d) IPSL CM5A-MR, e) MIROC MIROC5, f) NCC NorESM1-M, g) NOAA-GDFL ESM2M



**Obr. 3.13:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením  $0,44^\circ$  a) CCCma CanESM2, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5, c) ICHEC EC-EARTH, d) IPSL CM5A-MR, e) MIROC MIROC5, f) NCC NorESM1-M, g) NOAA-GFDL ESM2M

		Gorczyński		Conrad-Pollak		Hela		Johansson		Raunio	
<b>A</b>	60-70°N	V	<300			SZ	<300	SZ	<300		
	50-60°N	SZ	<300	SZ	<300	SZ	<500	SZ	<300	Z	<300
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<300
<b>B</b>	60-70°N	SZ	<500	JZ	>500	Z	>500	JZ	<500	JZ	<500
	50-60°N	SZ	<500	Z	>500	Z	>500	Z	<1000	Z	>500
	40-50°N	SZ	<500	Z	>500	SZ	>500	Z	<500	Z	>500
<b>C</b>	60-70°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	>500
	50-60°N	JV	<300	JV	>500			JV	<300	JV	<300
	40-50°N										
<b>D</b>	60-70°N	V	>500	JV	>500	JV	>500	JV	>500	JV	>500
	50-60°N	JV	<300	JV	<300	JV	<300			JV	<300
	40-50°N	SZ	<300			SZ	<300	SZ	<500	SZ	<300
<b>E</b>	60-70°N	Z	<1000	JZ	>500	JZ	>500	JZ	<500	JZ	>500
	50-60°N	SZ	>500	Z	>500	Z	>500	Z	>500	Z	>500
	40-50°N	Z	>500	SZ	<500						
<b>F</b>	60-70°N	V	<500	V	<500	JV	>500	JV	>500	V	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500
<b>G</b>	60-70°N					JV	<500	SZ	<500	JV	<500
	50-60°N	Z	<500	Z	<300	SZ	<300	Z	<500	Z	<300
	40-50°N										

**Tab. 3.6:** Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2021 – 2050 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP4.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) pre a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, vľavo smer (S-sever, V-východ, J-juh, Z-západ) a vpravo miera posunu (< menej, > viac ako uvedená miera posunu v km)

		Gorzynski		Conrad-Pollak		Hela		Johansson		Raunio	
<b>A</b>	60-70°N			Z	<500					JZ	<500
	50-60°N	SZ	<300	Z	<500	SZ	<500	Z	<500	Z	<500
	40-50°N	SZ	<300	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500
<b>B</b>	60-70°N	Z	>500	Z	<1000	Z	>500	Z	>500	JZ	>500
	50-60°N	Z	>500	Z	<1000	Z	<1000	Z	<1000	Z	>500
	40-50°N	SZ	>500	Z	<1000	Z	>500	Z	>500	Z	<300
<b>C</b>	60-70°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	>500
	50-60°N	JV	<300	JV	<300			JV	<300		
	40-50°N										
<b>D</b>	60-70°N	V	>500	V	>500	JV	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N										
<b>E</b>	60-70°N	V	<300	V	>500	V	<500	V	>500	V	>500
	50-60°N	V	<300	V	<500	V	<500	V	<500	V	<500
	40-50°N	SV	<500	SV	<500	S	<300	SZ	>500	S	<500
<b>F</b>	60-70°N	V	<500	V	>500	JV	<500	V	>500	JV	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<300
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	>500	SZ	<500
<b>G</b>	60-70°N					JV	<500	JV	<500	JV	<500
	50-60°N	SZ	<500	Z	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500
<b>H</b>	60-70°N	V	<500	V	<500	JV	<500	V	>500	V	<500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	V	<300
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500		

**Tab. 3.7:** Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2021 – 2050 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP8.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) pre a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_SMHI RCA4, f) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, g) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, h) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4, , vľavo smer (S-sever, V-východ, J-juh, Z-západ) a vpravo miera posunu (< menej, > viac ako uvedená miera posunu v km)



		Gorzynski		Conrad-Pollak		Hela		Johansson		Raunio	
<b>A</b>	60-70°N	V	<500	V	<500	JV	<500	V	>500	JV	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500			V	<300	V	<300
	40-50°N	SZ	<500			SZ	<300	SZ	<300	SZ	<300
<b>B</b>	60-70°N	V	>500	V	<500	SZ	>500	JV	<500	JZ	>500
	50-60°N	Z	<1000	Z	>500	Z	>500	Z	>500	Z	>500
	40-50°N	Z	>500	Z	>500			SZ	>500	Z	>500
<b>C</b>	60-70°N	JV	>500	JV	>500	JV	>500	JV	>500	JV	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<300	JV	<300	JV	<500
	40-50°N										
<b>D</b>	60-70°N	V	>500	V	>500	JV	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N										
<b>E</b>	60-70°N	Z	>500	Z	>500	JZ	>500	JZ	>500	JZ	>500
	50-60°N	Z	>500	Z	>500	Z	>500	Z	>500	Z	>500
	40-50°N										
<b>F</b>	60-70°N	V	<300	JV	<300	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	50-60°N	SZ	<300	Z	<500	SZ	<300	Z	<500	Z	<300
	40-50°N										

**Tab. 3.8:** Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2071 – 2100 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP4.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) pre a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, vľavo smer (S-sever, V-východ, J-juh, Z-západ) a vpravo miera posunu (< menej, > viac ako uvedená miera posunu v km)

		Gorczyński		Conrad-Pollak		Hela		Johansson		Raunio	
<b>A</b>	60-70°N	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<300	JV	<500	JV	<500
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500			SZ	<500		
<b>B</b>	60-70°N	V	>500	V	>500	J	<500	J	<500	J	<500
	50-60°N	Z	<1000	Z	>500	Z	>500	V	>500	Z	>500
	40-50°N	Z	<1000	Z	>500	Z	>500	V	>500	Z	>500
<b>C</b>	60-70°N	JV	>500	JV	<500	JV	>500	JV	>500	JV	>500
	50-60°N	JV	<300	JV	<500	JV	<300	JV	<500	JV	<500
	40-50°N			V	<500			JV	<500	JV	<500
<b>D</b>	60-70°N	V	>500	V	>500	JV	>500	JV	>500	JV	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N	SZ	<500			S	<500	SZ	<500		
<b>E</b>	60-70°N	V	<500	V	<500	V	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	JV	<500	V	<500	V	>500	V	>500	V	>500
	40-50°N	SZ	>500	SZ	<500	S	<500	SZ	>500	S	<500
<b>F</b>	60-70°N	JV	<500	V	<500	JV	>500	JV	>500	V	>500
	50-60°N	V	<500	V	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N	V	<500	SV	>500						
<b>G</b>	60-70°N	V	>500	V	>500	V	>500	V	<1000	V	<1000
	50-60°N	JV	>500	V	>500	JV	>500	JV	<1000	JV	>500
	40-50°N			V	>500	S	>500	SZ	<500	S	<500

**Tab. 3.9:** Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2071 – 2100 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP8.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) pre a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, e) IPSL CM5A-MR\_SMHI RCA4, f) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, g) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4, vľavo smer (S-sever, V-východ, J-juh, Z-západ) a vpravo miera posunu (< menej, > viac ako uvedená miera posunu v km)

## 4. Zhrnutie výsledkov

V tejto kapitole sú jednotlivé výsledky popísané v kapitole 3 a sčasti aj v kapitole 1 zhrnuté na základne získaných výsledkov a poznatkov. Na konci kapitoly 1 boli pomocou dát z E-OBS vypočítané jednotlivé indexy kontinentality. Jednalo sa o indexy Gorczynského, Conrada-Polaka, Helu, Johanssona a Raunia. Indexy boli spočítané pre dve obdobia 1971 - 2000 a 1990 - 2008 a dve rozlíšenia  $0,11^\circ$  (obr. 1.1) a  $0,44^\circ$  (príloha 9). V kapitole 3 boli postupne popísané jednotlivé simulácie kontinentality vo forme spomínaných indexov pomocou regionálnych klimatických modelov jednak ERA-Interim reanalýzou riadených ako aj globálne riadených v oboch rozlíšeniach a za rovnaké obdobia ako v prípade pozorovaní E-OBS (okrem budúcich simulácií).

Najprv boli rozobraté a analyzované reanalýzou riadené simulácie ERA-Interim za obdobie 1990 – 2008. V tomto prípade sa jednalo o regionálne modely s rozličným počtom pre každé rozlíšenie. Výstupy boli analyzované jednak graficky a s porovnaním s pozorovaniami na základe dát z E-OBS za rovnaké obdobie pomocou priestorových korelácií, teda akousi mierou podobnosti so skutočnosťou. Pri grafickej analýze bol kladený dôraz hlavne na rozdiely medzi jednotlivými simuláciami ako aj indexmi.

Ďalej boli analyzované regionálne simulácie riadené pomocou globálnych, teda dvojice GCM\_RCM. Jednalo sa jednak o historické simulácie za obdobie 1971 - 2000 a simulácie budúce za obdobia 2021 - 2050 a 2071 - 2100, resp. projekcie (scenáre) budúcej zmeny klímy. Uvedené projekcie boli určené na základe dvoch scenárov budúceho vývoja klímy do roku 2100 a to RCP4.5 a RCP8.5, pre nárast radiačného forcingu na  $4,5$  resp.  $8,5 \text{ W.m}^{-2}$  do roku 2100. Výsledky historických simulácií boli analyzované rovnako ako pri simuláciách ERA-Interim. Pri budúcich projekciách bol kladený dôraz hlavne na posun hranice kontinentality 33 % v porovnaní so simuláciami historickými a to samozrejme pre oba scenáre.

Väčšina obrázkov so simuláciami bola uvedená v kapitole 3 a to tie modely, resp. dvojice GCM\_RCM, ktoré boli k dispozícii pre všetky obdobia. U rozlíšenia  $0,44^\circ$  takisto ale len simulácie regionálneho modelu SMHI RCA4 (ostatné simulácie v prílohe).

### 4.1 Historické simulácie a ERA-Interim

Historické modelové simulácie GCM\_RCM za obdobie 1971 – 2000 a validačné reanalýzou riadené simulácie ERA-Interim za obdobie 1990 – 2008 simulovali rozloženie kontinentality pre dve uvedené referenčné obdobia. Výsledky sú znázornené na obrázkoch 3.1, 3.2 a 3.3 a v tab. 3.2 a 3.3 pre simulácie ERA-Interim a na obr. 3.4, 3.5 a tab. 3.4 a 3.5 pre dvojice GCM\_RCM. Reanalýza ERA-Interim spadá pod európsku inštitúciu ECMWF, ktorá riadila regionálne modely pomocou skutočných nameraných hodnôt ako okrajových podmienok. Regionálny downscaling

vykonali inštitúcie z iniciatívy EURO-CORDEX. Globálne modely príslušných dvojíc GCM\_RCM sú rôzne a väčšinou sa jednalo o americké modely.

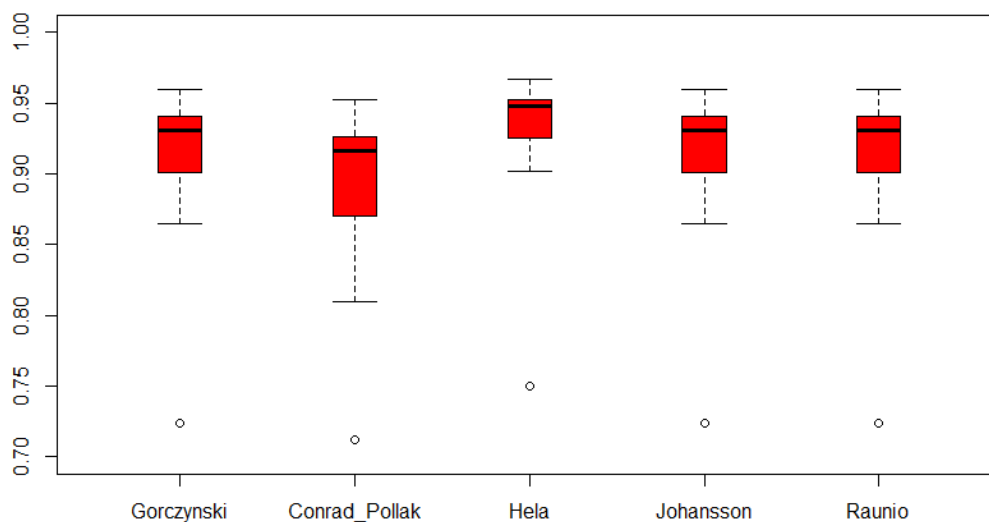
Výsledky sa líšili v závislosti od jednotlivých modelov aj indexov. Niektoré modely so skutočnosťou, teda pozorovaniami na základe E-OBS korelovali lepšie (s hodnotami nad 0,9) iné zasa horšie (s hodnotami 0,7 až 0,8). Najvyššie korelácie boli pozorované u indexu Helu, kde väčšinou neklesali pod 0,9 a najnižšie u indexu Conrada-Pollaka. Najlepšie simuloval skutočnosť model HadGEM-3RA (0,11°) s hodnotami okolo 0,95 a najhoršie model CSC REMO (0,11°) s hodnotami len 0,7 až 0,75. Pri simuláciách v rozlíšení 0,44° nebola táto maximálna ani minimálna hodnota prekročená. Čo sa týka rozlíšení, tak u modelu CSC REMO bola výrazne lepšia podobnosť s pozorovaniami u rozlíšenia 0,44°. Pri tomto nižšom rozlíšení samozrejme absentujú lokálne charakteristiky a zložitejší priebeh rozloženia indexov v určitých napr. horských oblastiach. Na obr. 4.1 sú znázornené rozpätia jednotlivých priestorových korelácií simulácii ERA-Interim s pozorovaniami pomocou boxplotov pre jednotlivé indexy. Na uvedenom obrázku možno pozorovať priemernú hodnotu, ktorá sa pohybuje v rozmedzí 0,92 až 0,95 (pre index Helu 0,95 pre index Conrada-Pollaka 0,92)

Pri simuláciách GCM\_RCM bol charakter výsledkov podobný, jednalo sa akurát o podstatne dlhšie pozorované 30-ročné obdobie. Hodnoty korelácií boli len nepatrne nižšie ako u simulácii ERA-Interim. Najvyššie hodnoty u modelu ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D (0,44°) s hodnotami okolo 0,93. Naopak najhoršie u IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F (0,44°), kde hodnoty klesli pod 0,7. Najvyššie hodnoty u indexu Helu a rovnako ako u ERA-Interim totožné hodnoty pre závislé indexy Gorczynski, Johansson a Raunio. Na obr. 4.2 sú rovnako ako na obr. 4.1 znázornené rozpätia jednotlivých priestorových korelácií simulácii GCM\_RCM s pozorovaniami pomocou boxplotov pre jednotlivé indexy. Priemerné hodnoty sa pohybujú v rozmedzí 0,85 (Conrad-Pollak) až 0,91 (Hela). Pri týchto simuláciách boli všetky dvojice GCM\_RCM v rozlíšení 0,11° aj v rozlíšení 0,44° a rozpätie hodnôt týchto simulácií bolo celkovo vyššie pri 0,11°, ale nie všetky modely mali vyššie hodnoty v tomto rozlíšení.

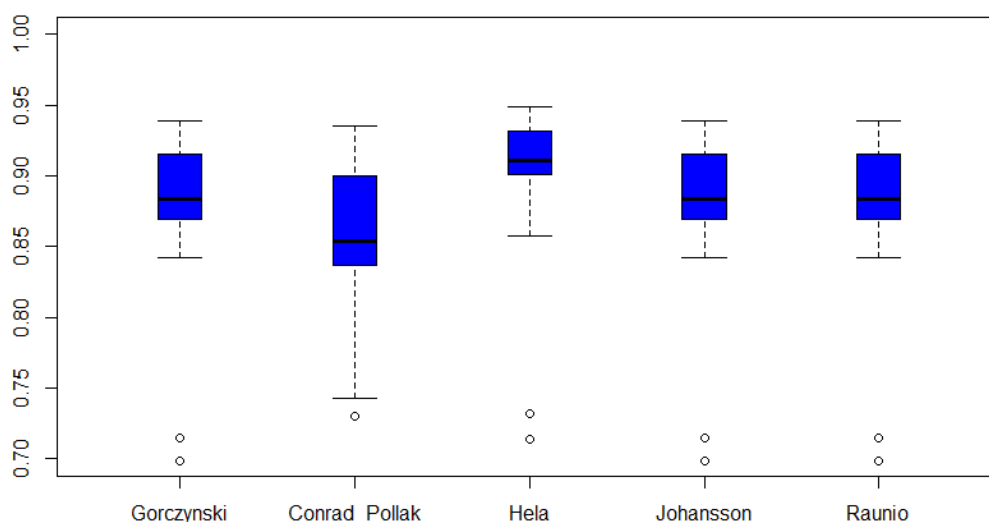
Keďže sa ale jednalo o simulácie dvojíc GCM\_RCM, kde RCM bol riadený pomocou GCM, bolo analyzované akou mierou prispieva daný GCM resp. RCM k celkovej korelácií. Bolo analyzovaných niekoľko regionálnych modelov riadených jedným globálnym a naopak. Najrozšírenejší RCM model pri rozlíšení 0,44° aj 0,11° bol SMHI RCA4, ktorý bol riadený pomocou 9 globálnych modelov, z ktorých najviac prispieval model MIROC MIROC5 pri rozlíšení 0,44° a CNRM-CERFACS CNRM-CM5 pri 0,11°. Oba tieto modely riadili daný RCM lepšie ako reanalýza ERA-Interim. Rovnako to bolo aj u MPI-M ESM-LR\_CSC REMO (0,11°). Najrozšírenejšie GCM modely boli CNRM-CM5, EC-EARTH a HadGEM2-ES pri rozlíšení 0,44°, ktoré všetky riadili 3 regionálne. Model CNRM-CM5, najlepšie riadil SMHI RCA4, EC-EARTH najlepšie IDL WRFV35D a HadGEM2-ES najlepšie DHMZ REGCM42.

Pri rozlíšení 0,11° to boli CNRM-CM5, EC-EARTH a CM5A-MR, kde všetky riadili dva regionálne. Modely CNRM-CM5 a CM5A-MR najlepšie riadili model SMHI RCA4 a EC-EARTH najlepšie KNMI RACMO2. Vyššie korelácie pri simuláciách ERA-Interim (až na uvedené výnimky) ako pri simuláciách GCM\_RCM boli zapríčinené samotnou reanalýzou ERA-Interim. Simulácie riadené ERA-Interim sú riadené „perfektnými“ okrajovými podmienkami, globálnym predpovedným

modelom s asimiláciou dát, kde sú asimilované skutočné merania (Berrisford et al., 2011). U historických simulácii GCM\_RCM je model inicializovaný ďaleko v histórii a časová osa (okrajové podmienky) je určená iba koncentraciami skleníkových plynov a inými podmienkami (napr. land-use, atď.) (McGuffie, Henderson-Sellers, 2001). U ERA-Interim bolo skúmané obdobie podstatne kratšie ako u GCM\_RCM.



**Obr. 4.1:** Boxploty znázorňujúce rozpätie korelácií reanalýzou riadených simulácii ERA-Interim s pozorovaniami E-OBS (1990 – 2008) pre jednotlivé indexy



**Obr. 4.2:** Boxploty znázorňujúce rozpätie korelácií simulácii GCM\_RCM s pozorovaniami E-OBS (1971 – 2000) pre jednotlivé indexy

## 4.2 Budúce simulácie

V prípade budúcich simulácií GCM\_RCM, teda projekcií do budúca bola skúmaná zmena v priestorovom rozložení indexov kontinentality. K dispozícii boli, ako už bolo spomenuté, dve budúce obdobia a dva RCP scenáre možnej klimatickej zmeny, ktoré súviseli s nárastom radiačného forcingu do roku 2100. Zmeny boli skúmané oproti historickým simuláciám ako aj oproti pozorovaniam E-OBS. Tu sú zhrnuté zmeny oproti pozorovaniam, keďže historické simulácie mali každá inú koreláciu s pozorovaniami. Dôraz bol kladený hlavne na posun dôležitej hranice 33 % oddeľujúcej oceánske a kontinentálne podnebie v Európe. U jednotlivých modelov bol posun mierne odlišný, ale v celku modely naznačovali určitú podobnú aj keď mierne odlišnú zmenu. Posun sa mierne líšil aj medzi jednotlivými indexmi. Jednotlivé simulácie sú znázornené na obr. 3.6 až 3.13 a v prílohách 1, 2 a 5 až 8 pre obe rozlíšenia  $0,11^\circ$  a  $0,44^\circ$ .

Zmena bola samozrejme výraznejšia v období 2071 - 2100 (aj keď nie u všetkých simulácií) pri porovnávaní s historickými simuláciami 1971 - 2000. Taktiež bola podstatne výraznejšia pre scenár RCP8.5 s vyšším radiačným forcingom. Na základe simulácií na obr. 3.6 až 3.13 bolo usúdené, že v severných oblastiach Európy došlo k poklesu, teda zmierneniu kontinentality a v určitých oblastiach južnej a juhovýchodnej Európy, hlavne na polostrovoch došlo naopak k miernemu nárastu teda prehĺbeniu kontinentality. Zmeny bolo možné pozorovať hlavne na Balkáne a Pyrenejskom polostrove, hlavne vo vnútrozemí. V oblastiach strednej Európy ( $50 - 60^\circ\text{N}$ ) došlo k takisto výraznej zmene u určitých simulácií, no na hranici medzi strednou a južnou približne v oblasti  $50^\circ\text{N}$  (geografická oblasť strednej Európy) došlo len k minimálnej, zanedbateľnej zmene, o čom pojednáva aj štúdia Vilčeka (Vilček et al., 2016).

Čo sa týka posunov hranice 33 %, tak tá sa posúva prevažne východným až juhovýchodným smerom v severnej polovici Európy a západným až severozápadným smerom v južnej polovici s miernymi odlišnosťami pre každý index. Najväčší posun bol pozorovaný v oblastiach medzi  $60^\circ$  a  $70^\circ\text{N}$ . Najvýraznejšie zmeny v posune boli pozorované u indexu Helu. U indexov Gorczyńského, Conrada-Pollaka boli zmeny veľmi podobné a to platilo aj pre indexy Johanssona a Raunia akurát s mierne odlišnou mierou posunu. U Conrada-Pollaka mierne odlišnosti na Balkáne, kde u niektorých modelov došlo k poklesu.

Posuny tejto hranice boli pre simulácie s rozlíšením  $0,11^\circ$  podrobne popísané v tab. 3.6 až 3.9, kde boli popísané smer aj miera posunu v troch šírkových oblastiach a to  $40 - 50^\circ\text{N}$ ,  $50 - 60^\circ\text{N}$  a  $60 - 70^\circ\text{N}$ . Obdobne aj pre simulácie s rozlíšením  $0,44^\circ$  (tabuľky uvedené v prílohe). Hranica sa posúvala miestami aj o viac ako 1000 km (pozorovateľné pri niektorých simuláciách s rozlíšením  $0,44^\circ$ . Pri posune do 100 km bol posun relatívne zanedbateľný (tabuľky uvádzajú posuny 200 km a viac). U niektorých modelov hlavne v strednej Európe sa takýto zanedbateľný posun vyskytoval. Najčastejší bol posun okolo 500 km. Hranica sa u väčšiny modelových výstupov posúvala pomerne výrazne, no nie vždy vo všetkých šírkových oblastiach. Posuny sa líšili v rámci jednotlivých indexov. Najvýraznejší posun sa vyskytol v období 2021 – 2050 u modelu IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F ( $0,44^\circ$ ) so scenárom RCP8.5, kde bolo možné pozorovať posun až nad 1000 km. Okrem tejto

simulácie sa takýto výrazný posun vyskytol ešte aj u simulácie MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4 (2071 – 2100, RCP8.5). U simulácie ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D (2071 – 2100, RCP8.5) boli u indexu Gorczynského posuny zanedbateľné, takmer nepozorovateľné.

Celkovo možno zmeny do budúca ako v rozložení jednotlivých indexov tak aj v posune uvedenej hranice jednoduchšie vyjadriť pri simuláciách s rozlíšením  $0,44^\circ$ . Pri rozlíšení  $0,11^\circ$  sú zmeny komplexnejšie hlavne v určitých špecifických lokálnych oblastiach, hlavne v oblastiach s horskými pásmami hlavne v strednej Európe a na Balkáne. Celkovo však prevažovali simulácie s posunmi hranice smerom na východ až juhovýchod nad simuláciami s posunmi na západ až severozápad. Zriedkavejšie sa v určitých šírkových oblastiach vyskytovali aj posuny na sever resp. juh. Pomocou vzorca 6 bol určený priemerný ročný posun hranice ako aj smer posunu uvedený v tab. 4.1. Priemerný posun a smer bol určený pre index Gorczynského zvlášť pre scenáre RCP4.5 a RCP8.5. Chyba bola odhadnutá na 0,5 km keďže posuny boli z máp určené s presnosťou na 100 km.

		40 – 50 °N	50 – 60 °N	60 – 70 °N
<b>RCP4.5</b>	<b>Posun (km)</b>	$1,5 \pm 0,5$	$2,6 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,5$
	<b>Smer</b>	ZSZ	VJV-JV	V-VJV
<b>RCP8.5</b>	<b>Posun (km)</b>	$2,7 \pm 0,5$	$2,8 \pm 0,5$	$4,7 \pm 0,5$
	<b>Smer</b>	ZSZ-SZ	JV	VJV

**Tab. 4.1:** Priemerný ročný posun a smer posunu hranice 33 % Gorczynského indexu podľa scenárov RCP4.5 a RCP8.5 (S-sever, V-východ, J-juh, Z-západ)

## 5. Záver

V tejto poslednej kapitole je na základe výsledkov uvedených v kapitole 3 a zhrnutých v kapitole 4 učený záver a teda celkový prínos uvedenej práce. Táto práca bola zameraná na simuláciu kontinentality pomocou klimatických modelov a ich schopnosť reprezentovať súčasnú klímu a určiť scenáre možného budúceho vývoja. V práci sú uvedené základné charakteristiky skúmanej termickej kontinentality, jej rozloženie na základe dát z E-OBS. Popísané sú globálne aj regionálne klimatické modely, ich princíp a taktiež iniciatíva EURO-CORDEX. Následne pomocou nich jednotlivé indexy simulované.

Na základe týchto výsledkov možno dospieť k záveru, že regionálne modelové simulácie v celku dobre reprezentujú kontinentalitu v Európe. V rámci podobností historických simulácií a simulácii ERA-Interim s pozorovaniami na základe priestorových korelácií došlo k dobrej zhode. Takmer všetky simulácie korelovali s pozorovaniami z E-OBS s koeficientom väčším ako 0,8 (okrem simulácie IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F). Schopnosť uvedených simulácií reprezentovať indexy kontinentality v Európe je v celku relatívne úspešná. Miera schopnosti však závisí na voľbe modelu ako aj indexu. Modely CNRM-CM5 a EC-EARTH sa ukázali ako najlepšie riadiace globálne modely. Najlepší riadený regionálny model nebolo možné určiť jednoznačne.

Na základe simulácií scenárov budúceho vývoja možno takisto usúdiť, že kontinentalita v Európe sa s časom mení a do budúca je značne podmienená klimatickou zmenou. Obecný nárast teploty vzduchu v jednotlivých ročných obdobiach, ktorý je odlišný v rozličných oblastiach, má odlišný dopad na kontinentalitu. Do roku 2100 dôjde teda podľa určitých scenárov klimatickej zmeny k určitej zmene rozloženia indexov kontinentality, mierne odlišnej pre jednotlivé scenáre. Najvýraznejšia zmena by mala nastať v severnej, južnej a juhovýchodnej Európe, pričom takmer zanedbateľná zmena je v oblastiach okolo 50 °N.

Táto zmena je dobre reprezentovateľná posunom hranice 33 % medzi oceánskym a kontinentálnym podnebí, ktorá sa v určitých oblastiach môže do roku 2100 posunúť aj o viac ako 1000 km smerom na východ až juhovýchod, čo platí hlavne pre severné a stredné oblasti Európy. Na základe jednotlivých posunov u budúcich simulácií bolo vypočítané, že priemerný posun sa bude pohybovať na úrovni okolo 1 až 5 km/rok smerom na východ až juhovýchod, v južnej Európe na západ až severozápad. V okolí 50° N len asi 0 až 1 km/rok.



# Použitá literatúra

Belda, Michal & Holtanová, Eva & Halenka, Tomas & Kalvova, Jaroslava. (2014). Climate classification revisited: From Köppen to Trewartha. *Climate Research*. 59. 1–13. 10.3354/cr01204.

Berrisford, Paul & Dee, D. & Poli, P. & Brugge, R. & Fielding, K. & Kobayashi, S. & Fuentes, M. & Kallberg, P. & Uppala, S. & Simmons, A. (2011). The ERA-interim archive version 2.0

Christensen, J. H., Machehauer, B., Jones, R. G., Schär, C., Ruti, P. M., Castro, M., & Visconti, G. (1997). Validation of present day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. *Climate Dynamics*, 13(7-8), 489–506. <https://doi.org/10.1007/s003820050178>

Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. M., & Jones, P. D. (2018). An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>

Český meteorologický slovník. Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS), ČMeS, 1993.

Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 553–597. DOI:10.1002/qj.828

Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F. et al. A regional climate model for the western United States. *Climatic Change* 15, 383–422 (1989). <https://doi.org/10.1007/BF00240465>

Giorgi, F., & Gutowski, W. L. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 467–490.

Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5696–5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>

Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, and M. New (2008), A European daily high resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006, *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201

Hudek, J. Ročná amplitúda teploty vzduchu v Európe. Študentský projekt. MFF UK, Praha, 2016

Hudek, J. Kontinentalita klímy v Európe. Bakalárska práca. MFF UK, Praha, 2018

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14, 563–578 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S. et al. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Reg Environ Change* 20, 51 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>

McGregor, J.L. Regional climate modelling. *Meteorol. Atmos. Phys.* 63, 105–117 (1997). <https://doi.org/10.1007/BF01025367>

Mikolášková, Kateřina. (2009). A regression evaluation of thermal continentality. *Geografie*. 114. 350-362. 10.37040/geografie2009114040350.

McGuffie, K. and Henderson-Sellers, A. (2001), Forty years of numerical climate modelling. *Int. J. Climatol.*, 21: 1067-1109. <https://doi.org/10.1002/joc.632>

Schulzweida, Uwe. (2019, October 31). CDO User Guide (Version 1.9.8). <http://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* **109**, 5 (2011) <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D. et al. The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim Dyn* 41, 2555–2575 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>

Vilček, J., Škvarenina, J., Vido, J., Nalevanková, P., Kandřík, R., and Škvareninová, J.: Minimal change of thermal continentality in Slovakia within the period 1961–2013, *Earth Syst. Dynam.*, 7, 735–744, <https://doi.org/10.5194/esd-7-735-2016>, 2016.

# Zoznam obrázkov

1.1	Rozloženie jednotlivých indexov kontinentality v Európe na základe dát z E-OBS s rozlíšením $0,11^\circ$ za obdobie 1971 – 2000 a 1990 – 2008 .....	7
2.1	Znázornenie jednosmernej hniezdovej techniky regionálneho klimatického modelovania .....	10
2.2	Predpovedné chyby teploty v 200 a 850 hPa spriemerované cez všetky predpovede získavané denne v čase 12:00 SEČ v roku 1989 pre ERA-Interim ERA-40 a ECMWF predpovedný systém .....	12
2.3	Oblasť skúmania simulácii EURO-CORDEX v rozlíšení $0,11^\circ$ .....	13
3.1	Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením $0,11^\circ$ za obdobie 1990 – 2008 .....	19
3.2	Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením $0,44^\circ$ za obdobie 1990 – 2008 .....	21
3.3	Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením $0,44^\circ$ za obdobie 1990 – 2008 .....	22
3.4	Modelové simulácie GCM_RCM historické s rozlíšením $0,11^\circ$ za obdobie 1971 – 2000 .....	25
3.5	Modelové simulácie GCM_RCM regionálneho modelu SMHI-RCA4 historické s rozlíšením $0,44^\circ$ za obdobie 1971 – 2000 .....	28
3.6	Modelové simulácie GCM_RCM budúce za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením $0,11^\circ$ .....	35
3.7	Modelové simulácie GCM_RCM budúce za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením $0,11^\circ$ .....	36
3.8	Modelové simulácie GCM_RCM budúce regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením $0,44^\circ$ .....	37
3.9	Modelové simulácie GCM_RCM budúce regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením $0,44^\circ$ .....	38
3.10	Modelové simulácie GCM_RCM budúce za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením $0,11^\circ$ .....	39
3.11	Modelové simulácie GCM_RCM budúce za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením $0,11^\circ$ .....	40
3.12	Modelové simulácie GCM_RCM budúce regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP4.5 s rozlíšením $0,44^\circ$ .....	41
3.13	Modelové simulácie GCM_RCM budúce regionálneho modelu SMHI RCA4 za obdobie 2071 - 2100 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením $0,44^\circ$ .....	42
4.1	Boxploty znázorňujúce rozpätie korelácií reanalýzou riadených simulácii ERA-Interim s pozorovaniami E-OBS pre jednotlivé indexy .....	49
4.2	Boxploty znázorňujúce rozpätie korelácií simulácii GCM_RCM s pozorovaniami E-OBS pre jednotlivé indexy .....	49

# Zoznam tabuliek

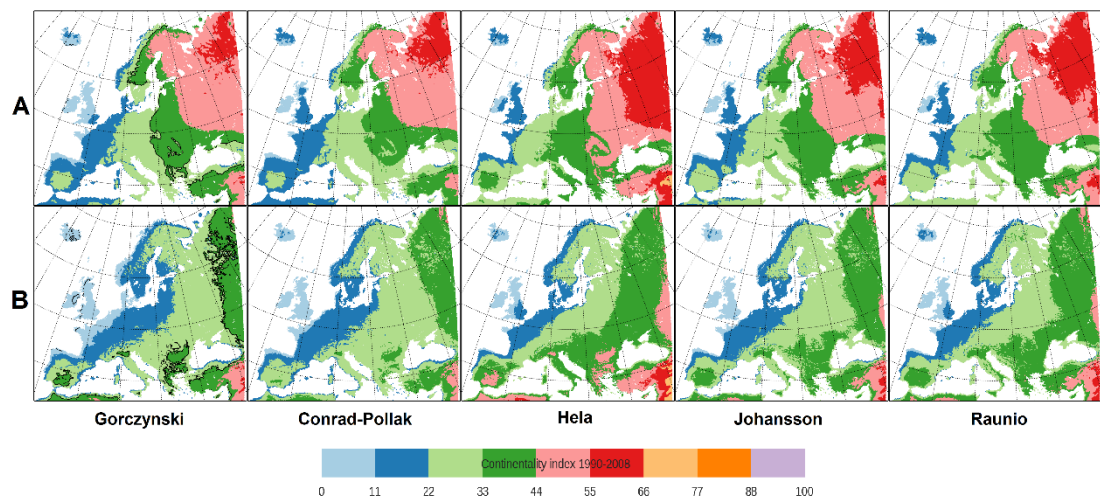
1.1	Základné indexy termickej kontinentality a ich definícia .....	4
2.1	Modelové simulácie GCM_RCM k dispozícii pre jednotlivé simulované obdobia a scenáre v rozlíšení 0,11° .....	14
2.2	Modelové simulácie GCM_RCM k dispozícii pre jednotlivé simulované obdobia a scenáre v rozlíšení 0,44° .....	15
3.1	Modelové simulácie riadené reanalýzou ERA-Interim v ich príslušnom rozlíšení .....	18
3.2	Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov riadených reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením 0,11° s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1990 – 2008 .....	20
3.3	Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov riadených reanalýzou ERA-Interim s rozlíšením 0,44° s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1990 – 2008 .....	22
3.4	Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov GCM_RCM s rozlíšením 0,11° s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1971 – 2000 .....	26
3.5	Hodnoty priestorových korelácií jednotlivých modelových výstupov GCM_RCM s rozlíšením 0,44° s pozorovaniami E-OBS za obdobie 1971 – 2000 .....	29
3.6	Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2021 – 2050 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP4.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) .....	43
3.7	Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2021 – 2050 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP8.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) .....	44
3.8	Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2071 – 2100 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP4.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) .....	45
3.9	Posuny hranice kontinentality 33% v budúcich simuláciách v období 2071 – 2100 s rozlíšením 0,11°, scenár RCP8.5 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) .....	46
4.1	Priemerný ročný posun a smer posunu hranice 33 % Gorczyńskiego indexu podľa scenárov RCP4.5 a RCP8.5 .....	51

# Zoznam použitých skratiek

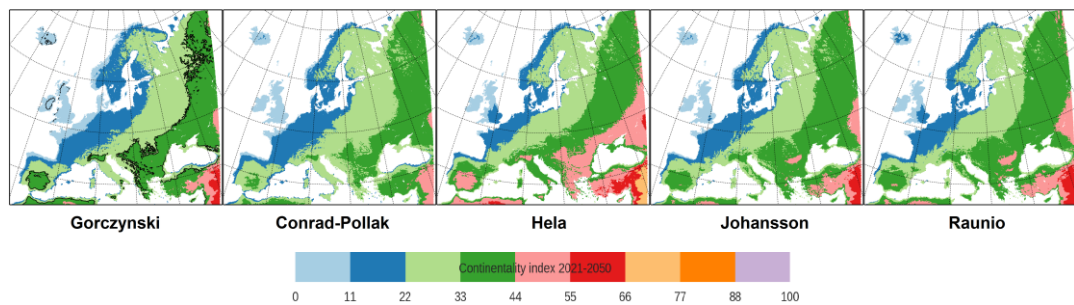
AOGCM	Atmosphere and Ocean Coupled Global Climate Model (General Circulation model)
CDO	Climate Data Operators
E-OBS	European High-Resolution Grided Data Set
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
ESGF	Earth System Grid Federation
EURO-CORDEX	European Coordinated Regional Downscaling Experiment
ERA	ECMWF Re-Analysis
GCM	Global Climate Model (General Circulation Model)
NetCDF	Network Common Data Form
RCM	Regional Climate Model
IFS	Intergrated Forecast system
RCP	Representative Concentration Pathway
WCRP	World Climate Research Programme

*Pozn.: Všetky skratky okrem použitých modelov a inštitúcií*

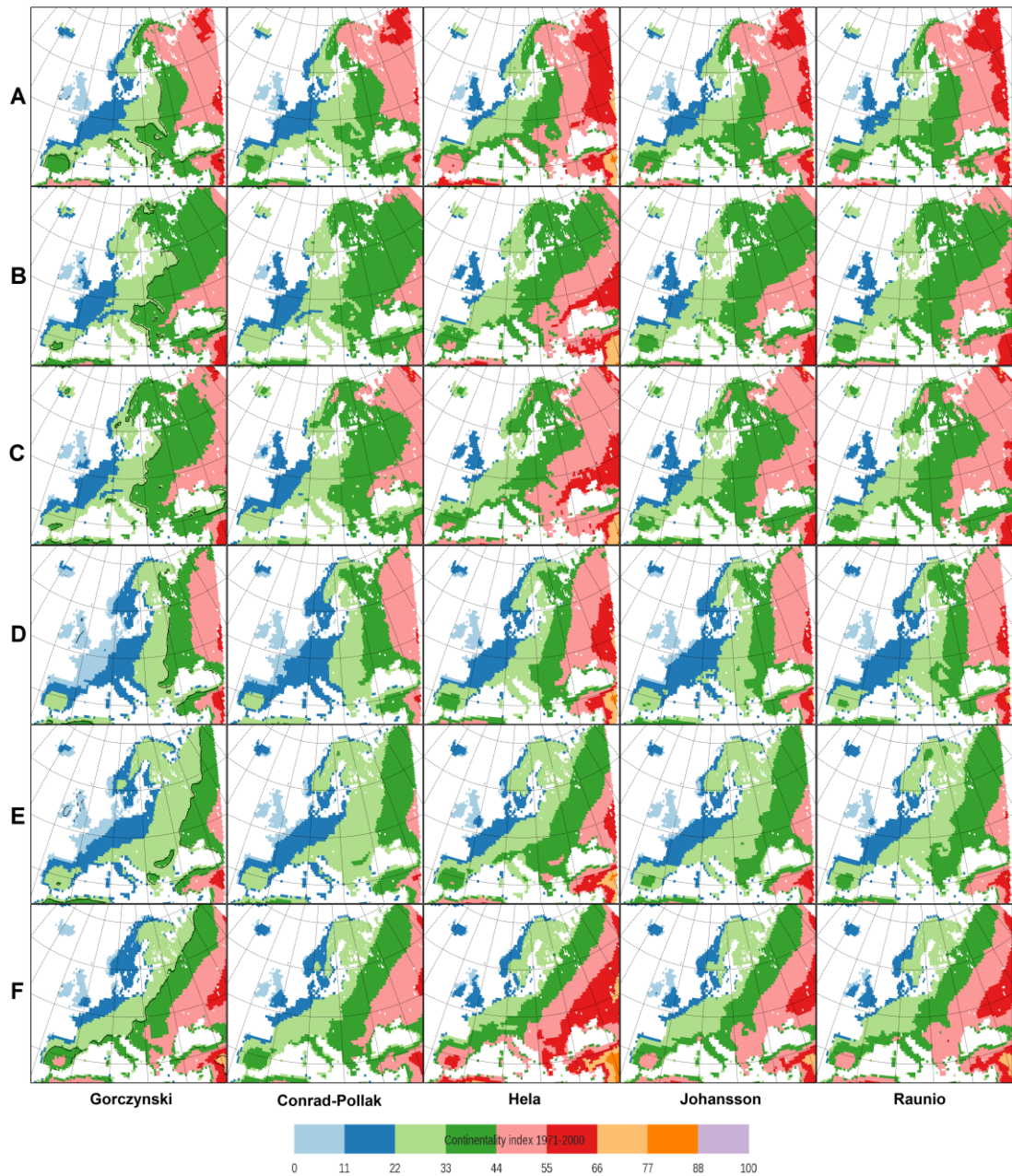
# Prílohy



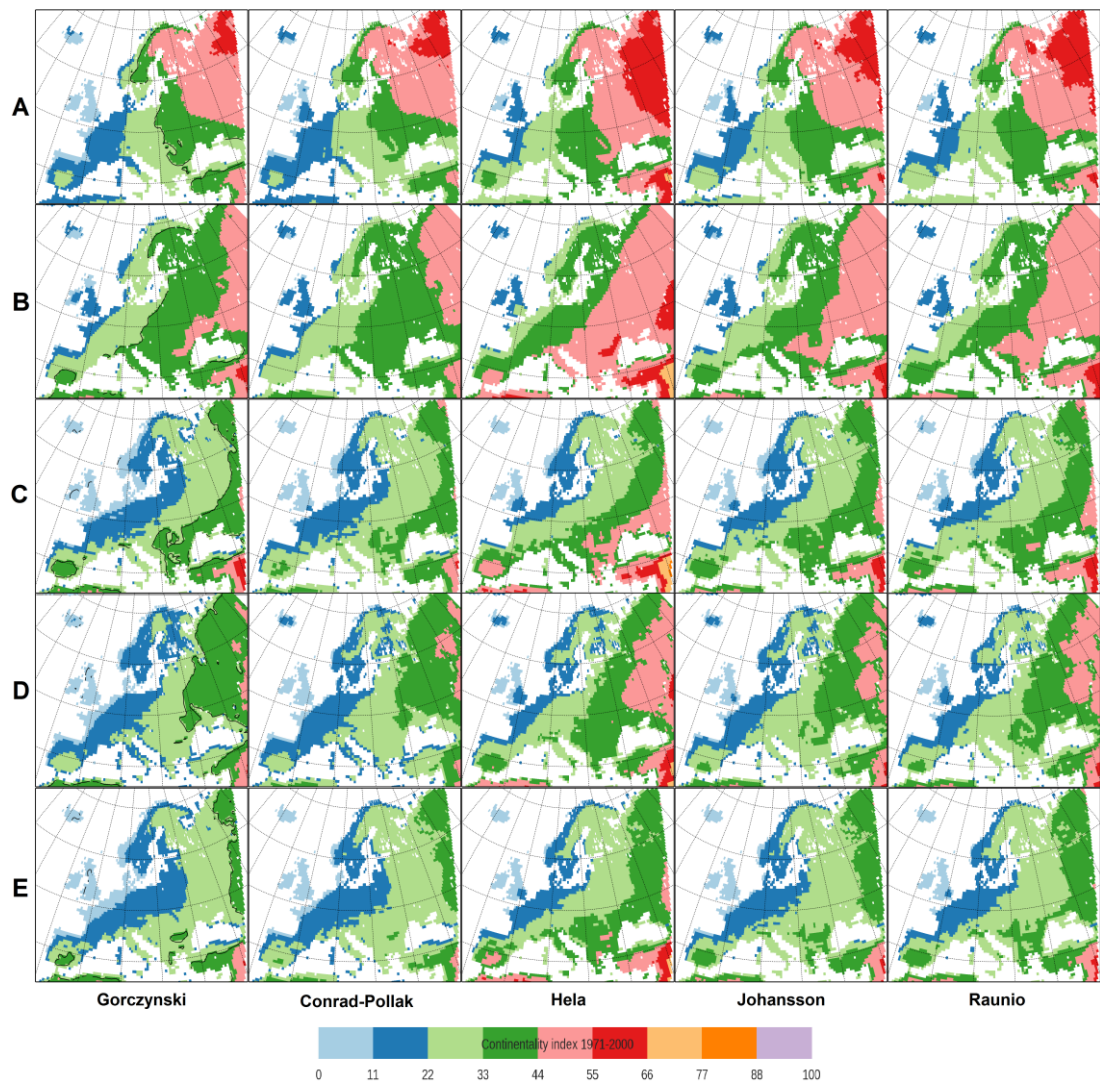
**Príloha 1:** Modelové simulácie GCM\_RCM historické za obdobie 1971 - 2000 s rozlíšením  $0,11^\circ$  pre a) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, b) MPI-M M-ESM-LR\_SMHI RCA4



**Príloha 2:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2021 - 2050 podľa scenára RCP8.5 s rozlíšením  $0,11^\circ$  pre MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4

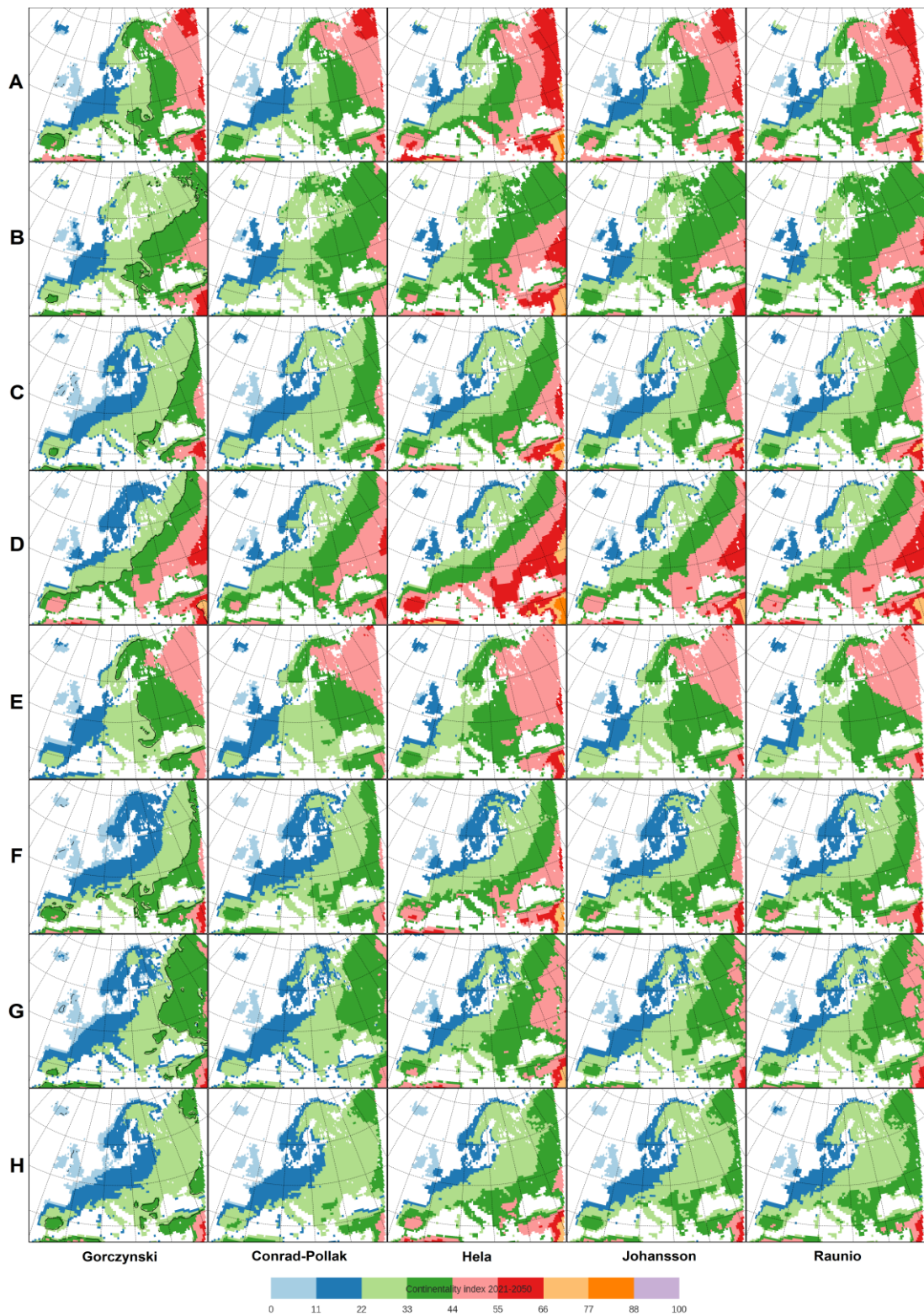


**Príloha 3:** Modelové simulácie GCM\_RCM historické za obdobie 1971 - 2000 s rozlíšením  $0,44^\circ$  pre a) CCCma CanESM2\_UCAN WRF341I, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_HMS ALADIN52, d) ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D, e) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, f) MOHC HadGEM2-ES\_WEGC CCLM-COSMO

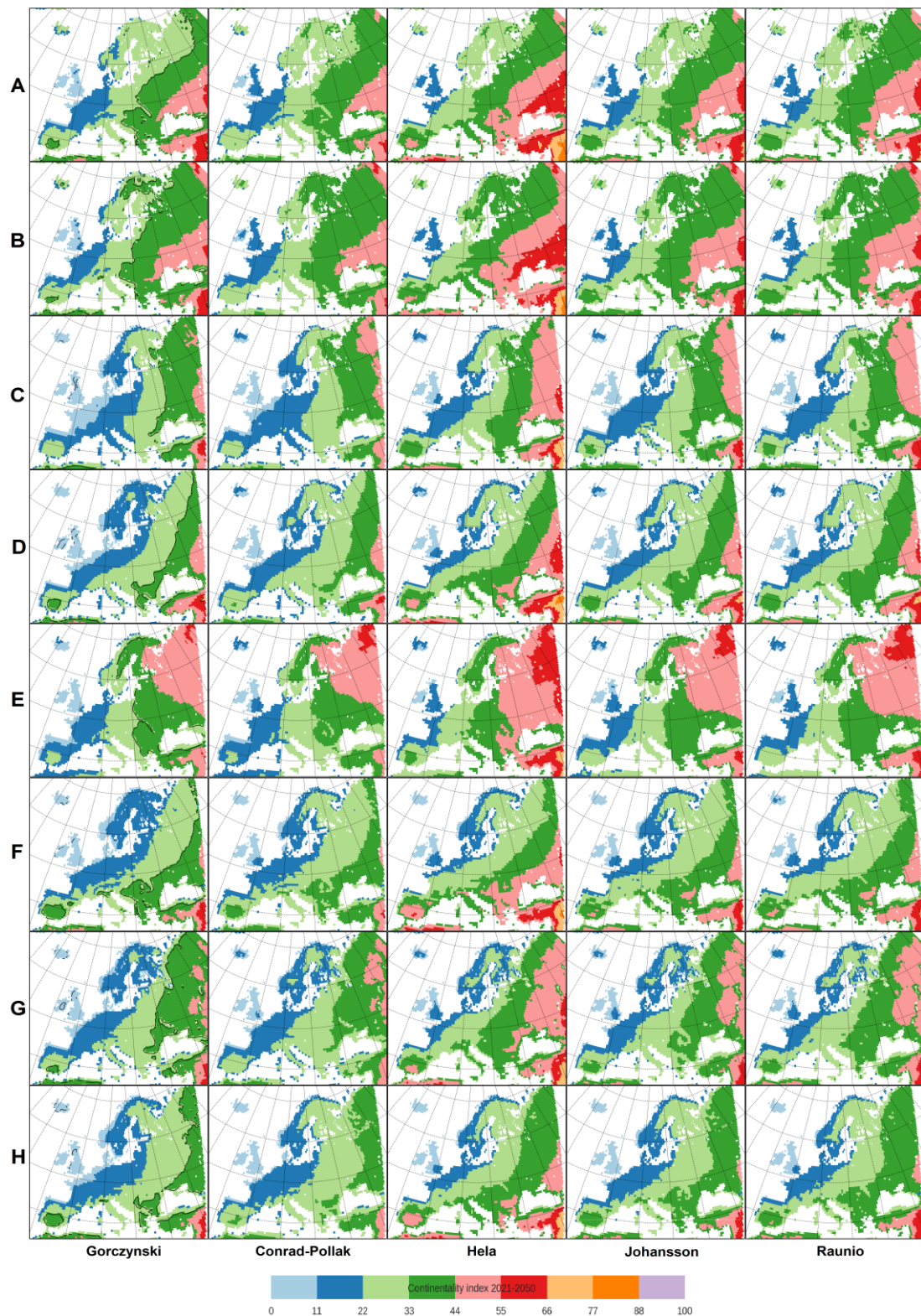


**Príloha 4:** Modelové simulácie GCM\_RCM historické za obdobie 1971 - 2000 s rozlíšením  $0,44^\circ$  pre a) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, b) MOHC HadGEM2-ES\_DHMZ REGCM42, c) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, d) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, e) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4

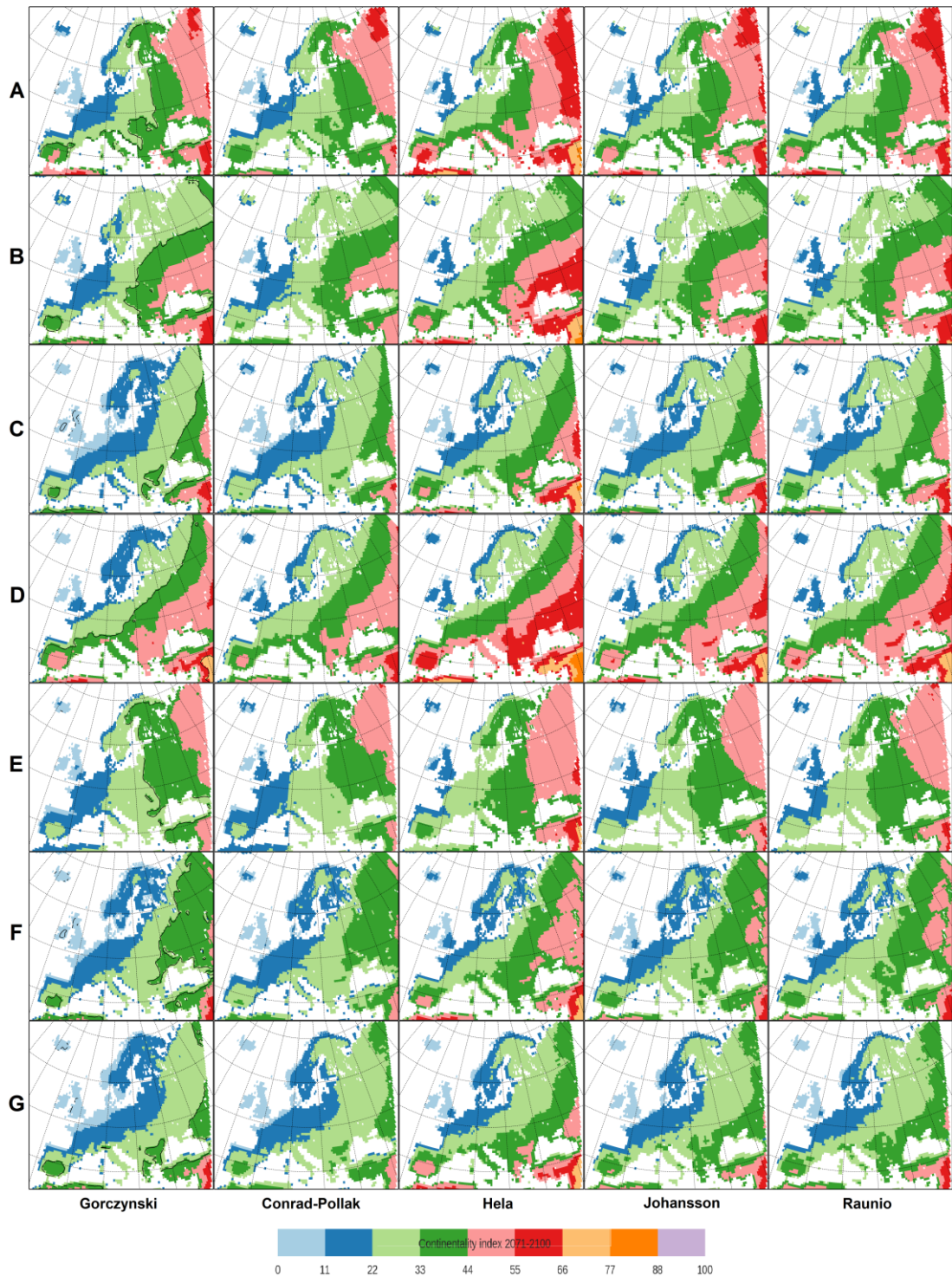




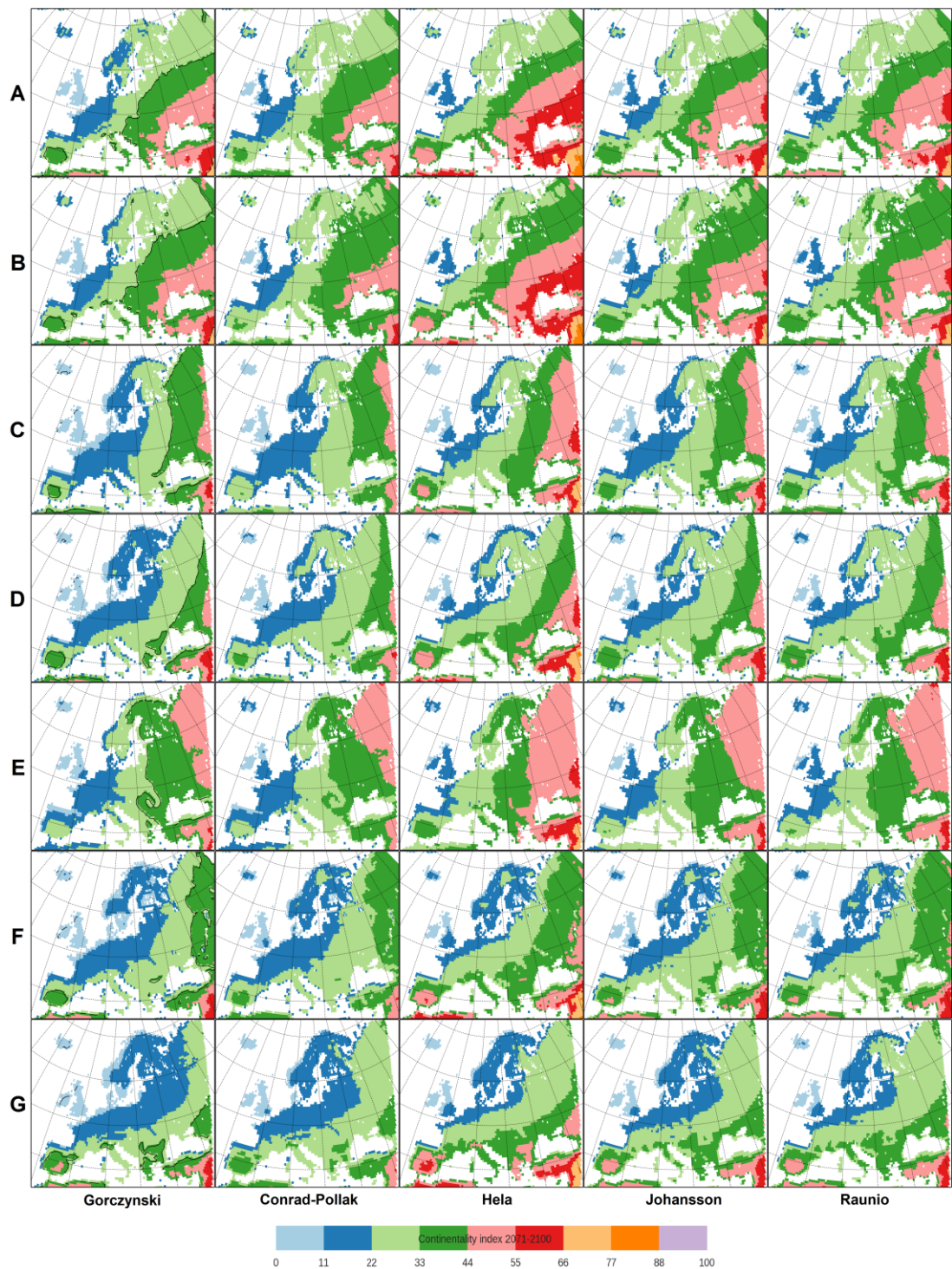
**Príloha 5:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2021 - 2050 s rozlíšením  $0,44^\circ$  podľa scenára RCP4.5 pre a) CCCma CanESM2\_UCAN WRF331F b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) HadGEM2-ES\_WEGC CCLM-COSMO, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, g) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, h) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4



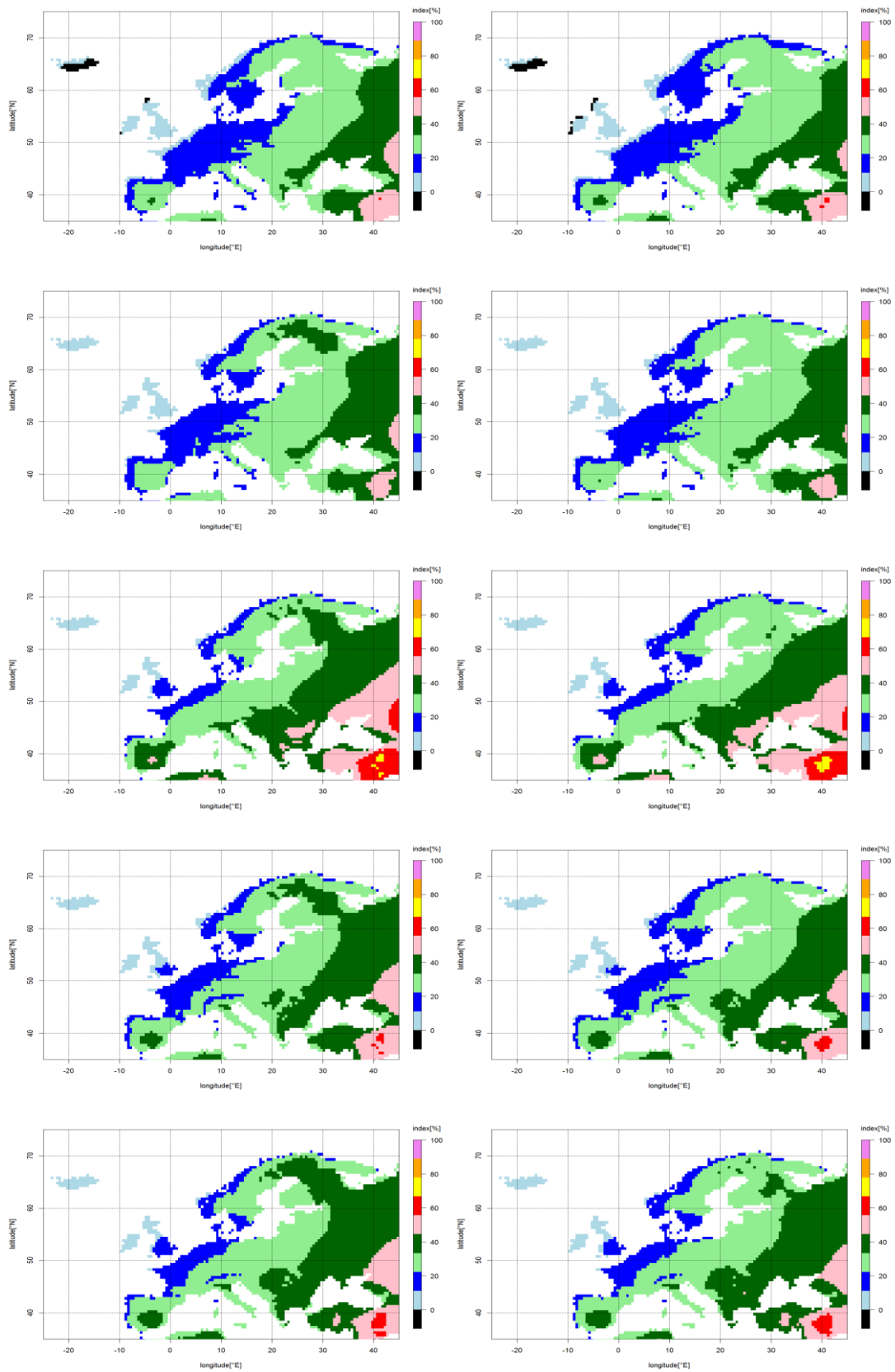
**Príloha 6:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2021 - 2050 s rozlíšením  $0,44^\circ$  podľa scenára RCP8.5 pre a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_HMS ALADIN52, c) ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D, d) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, g) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, h) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4



**Príloha 7:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2071 - 2100 s rozlíšením  $0,44^\circ$  podľa scenára RCP4.5 pre a) CCCma CanESM2\_UCAN WRF341I, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, c) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, d) HadGEM2-ES\_WEGC CCLM-COSMO, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, g) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4



**Príloha 8:** Modelové simulácie GCM\_RCM budúce za obdobie 2071 - 2100 s rozlíšením  $0,44^\circ$  podľa scenára RCP8.5 pre a) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, b) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_HMS ALADIN52, c) ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D, d) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, e) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, f) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, g) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4



**Príloha 9:** Rozloženie jednotlivých indexov kontinentality v Európe na základe dát z E-OBS s rozlíšením  $0,44^\circ$  za obdobie 1971 – 2000 (vľavo) a 1990 – 2008 (vpravo) (od hora postupne Gorczynski, Conrad-Pollak, Hela, Johansson, Raunio)

		2021-50, RCP4.5, 0.44						2021-50, RCP8.5, 0.44															
		Gorczyński	Conrad-Po	Hela	Johansson	Raunio	Gorczyński	Conrad-Po	Hela	Johansson	Raunio												
<b>A</b>	60-70°N	V	<1000	JZ	<300	JZ	<500	SV	<500	JZ	<500												
	50-60°N	JV	<500	Z	<500	Z	<500	V	<500	Z	>500												
	40-50°N	JV	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	>500												
<b>B</b>	60-70°N	V	<500	V	<500	V	<500	JV	>500		V	<500	V	<500	V	<500	V	>500	V	<200			
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	V	>500	JV	<500	JV	<500	JV	<500			JV	<500		
	40-50°N	SZ	<500					SZ	<500	JV	<500							JV	<500				
<b>C</b>	60-70°N			JZ	<200	V	<500	Z	<500	JZ	<500	Z	<500	Z	>500	SZ	<500	V	<300	JZ	<500		
	50-60°N	V	>500	V	<500	V	<500	V	<300	V	<500	Z	<500	Z	<500	SZ	<500	SZ	<300	Z	<500		
	40-50°N	SV	>500	SV	<500													SZ	>500	Z	<500		
<b>D</b>	60-70°N	V	>500	V	<500			Z	>500	JZ	<500	V	<500	V	<500	V	<500	V	>500	JV	>500		
	50-60°N	SZ	<500	Z	<500	SZ	<1000	Z	>500	Z	>500	Z	<500	Z	>500	SZ	>500	Z	>500	Z	>500		
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500					Z	>500	SZ	<500	SZ	>500			Z	>500				
<b>E</b>	60-70°N											Z	>500	Z	>500	Z	<1000	Z	>500	JZ	>500		
	50-60°N											SZ	>500	SZ	>500	Z	<1000	Z	>500	Z	>500		
	40-50°N													SZ	>500			Z	>500				
<b>F</b>	60-70°N											Z	<300	Z	<500					JV	<300		
	50-60°N											Z	<300	Z	<500	Z	<200	Z	<500	JV	<500		
	40-50°N													SV	<500	V	<500	V	<500	JV	<500		
<b>G</b>	60-70°N	V	<500	V	<500	V	>500	JV	<500	V	>500			V	<500	V	<500	V	>500	JV	>500		
	50-60°N	JV	<200	V	<300	JV	<300	V	<500	V	<500	V	>500	JV	<500	JV	<300	JV	<300	JV	<500		
	40-50°N					JV	<300					JV	<300										
<b>H</b>	60-70°N	JV	<500	JV	<500	V	>500	JV	<300	Z	>500												
	50-60°N	SZ	<1000	Z	<500	SZ	<500	Z	<1000	SZ	>500												
	40-50°N	SZ	<1000	Z	<1000	SZ	>500	SZ	<1000	SZ	<1000												
<b>I</b>	60-70°N	V	<1000	V	>500	V	>500	V	>500						V	<1000	V	<1000	V	>500	JV	>500	
	50-60°N	V	<500	V	>500	JV	<500	V	>500	V	<1000	V	>500	V	<1000	JV	<500	JV	>500	JV	<500		
	40-50°N			V	>500					JV	>500	SV	>500	V	>500					JV	<500		
<b>J</b>	60-70°N	Z	<1000	JZ	<500	Z	>500	JZ	>500	JZ	>500	Z	>1000	Z	<1000	JZ	>500	JZ	>500	JZ	<500		
	50-60°N	Z	<500	Z	<500	Z	>500	Z	>500	Z	>500	Z	>500	Z	<1000	Z	>500	Z	<1000	Z	>500		
	40-50°N			SV	<500								SZ	>500	SZ	<1000							
<b>K</b>	60-70°N	V	<500	V	<500	V	<500	V	>500	V	>500	V	<500	V	<500	V	>500	V	>500	V	>500		
	50-60°N	V	<500	V	>500	JV	<500	JV	>500	JV	<500	V	>500	V	<500	JV	>500	V	<300	V	>500		
	40-50°N	SV	<500	SV	>500									SV	>500			SZ	<300	SZ	>500		
<b>L</b>	60-70°N			V	<500	Z	<200	V	<500	Z	<500	Z	<1000	Z	>500	Z	>500	JZ	<500	JZ	<300		
	50-60°N			V	<500	SZ	<500	JV	>500	Z	<500	SZ	>500	Z	<500	SZ	>500	Z	>500	Z	<300		
	40-50°N	JV	<500	SZ	<500	SZ	<500	JV	>500	SZ	<1000	SZ	>500			SZ	>500	SZ	<500	SZ	<500		
<b>M</b>	60-70°N																						
	50-60°N																						
	40-50°N																						
<b>N</b>	60-70°N	V	<500	V	>500	V	<500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500		
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<300	JV	<500	JV	<500		
	40-50°N	SZ	<500			S	<500	SZ	<500	SZ	>500	SZ	>500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500		
<b>O</b>	60-70°N	V	<300	V	<300	JV	<500	V	<300						V	<300	JV	<500	V	<500	JV	<500	
	50-60°N	SZ	<300	Z	<300			Z	<300	Z	>500	SZ	<500	Z	<300	SZ	<500	JV	<500	JV	<500		
	40-50°N			SV	>500	SZ	<300	SV	>500	V	<300								SV	<500	SZ	<500	
<b>P</b>	60-70°N	V	>500	V	<1000	V	>500	V	>500	V	>500	V	<500	V	<500	JV	<500	V	>500	V	<500		
	50-60°N	V	>500	V	>500	JV	<500	V	>500	JV	>500	JV	<500	V	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500		
	40-50°N	V	>500	V	<1000																		
<b>Q</b>	60-70°N	V	<1000	V	<1000	V	<1000	V	>500	V	<1000	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500		
	50-60°N	JV	<1000	V	>500	JV	<500	JV	>500	V	>500	JV	>500	V	>500	JV	>500	JV	<500	JV	<500		
	40-50°N			V	<1000										SV	>500				JV	<500	JV	>500
<b>R</b>	60-70°N	V	<300	V	<500	V	<500					Z	<500	Z	<500	Z	<500	Z	<500	Z	<500		
	50-60°N	V	<300	V	<500	V	<500	V	<1000	V	<500	V	>500	V	<500	V	<500	V	<500	V	<500		
	40-50°N	SV	>500	SV	<1000	V	<500	SV	<1000	SV	<500			SV	>500	V	>500	SV	>500	JV	<500		

**Príloha 10:** Posuny hranice kontinentality 33 % v budúcich simuláciách s rozlíšením 0,44° v období 2021 – 2050 oproti pozorovaniu E-OBS (1971 – 2000) pre a) CCCma CanESM2\_UCAN WRF34I, b) CCCma CanESM2\_SMHI RCA4, c) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, d) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM ALADIN53, e) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_HMS ALADIN52, f) ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D, g) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, h) MOHC HadGEM2-ES\_WEGC CCLM-COSMO, i) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, j) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, k) IPSL CM5A-MR\_SMHI RCA4, l) MIROC MIROC5\_SMHI RCA4, m) MOHC HadGEM2-ES\_DHMZ REGCM42, n) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, o) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, p) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4, q) NCC NorESM1-M\_SMHI RCA4, r) NOAA-GFDL ESM2M\_SMHI RCA4, vľavo smer (S-sever, V-východ, J-juh, Z-západ) a vpravo miera posunu (< menej, > viac ako uvedená miera posunu v km)

		2071-00, RCP4.5, 0.44								2071-00, RCP8.5, 0.44											
		Gorczyński		Conrad-Po		Hela		Johansson		Raunio		Gorczyński		Conrad-Po		Hela		Johansson		Raunio	
A	60-70°N	Z	<1000	JZ	<300	JZ	<500	JZ	<300	JZ	<500										
	50-60°N	Z	>500	Z	<500	Z	<500	Z	<300	Z	<500										
	40-50°N	SZ	>500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	>500	SZ	<500										
B	60-70°N	V	<500	V	<500	V	<500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	JV	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	SZ	<300	JV	<300	JV	<500
	40-50°N	SZ	<500			SZ	<500					SZ	<500	SZ		SZ	<300	SZ	>500	SZ	>500
C	60-70°N	V	<500	V	<500	V	<500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	V	<500	V	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N	SV	>500	SV	<500		<500											JV	<500		
D	60-70°N	V	>500	V	<1000	V	>500	V	<1000	V	>500	V	<1000	V	<1000	V	>500	J	<500	J	<500
	50-60°N	SZ	>500	Z	>500	SZ	<500	SZ	>500	Z	>500	SZ	>500	Z	>500	SZ	<500	Z	>500	Z	>500
	40-50°N	SZ	>500	SZ	>500			SZ	>500			SZ	>500	SZ	>500			Z	>500	SZ	>500
E	60-70°N											V	>500	JV	>500	J	<300	J	<300	JV	<300
	50-60°N											SZ	>500	Z	>500	SZ	>500	Z	>500	Z	>500
	40-50°N											SZ	>500	Z	>500	SZ	>500	Z	>500	Z	>500
F	60-70°N															JV	<500				V
	50-60°N														Z	<300					V
	40-50°N													SV	<300	JV	<500	V	<300	V	<500
G	60-70°N	V	>500	V	>500	JV	>500	JV	>500	V	>500	V	>500	JV	<500	JV	>500	JV	>500	JV	>500
	50-60°N	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<300	JV	<500	JV	<500	JV	<500	V	<300
	40-50°N			JV	<500																
H	60-70°N	V	<500	JV	<300	JV	<500	JV	>500	JV	>500										
	50-60°N	SZ	<1000	SZ	>500	SZ	>500	SZ	<1000	SZ	<1000										
	40-50°N	SZ	<1000	SZ	<1000	SZ	>500	SZ	<1000	SZ	<1000										
I	60-70°N	V	>500	V	>500	JV	>500	V	>500	V	<1000	V	<1000	JV	<1000	JV	<1000	JV	>500	JV	<1000
	50-60°N	JV	<500	JV	>500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N									JV	<500										
J	60-70°N	Z	>500	JZ	<500	JZ	<500	JZ	>500	JZ	>500	V	>500	Z	>500	JZ	<500	JZ	<500	JZ	<500
	50-60°N	Z	>500	Z	<500	Z	>500	Z	>500	Z	>500	JV	>500	Z	>500	Z	<500	Z	>500	Z	<500
	40-50°N	SV	<300	SV	<500													Z	<300		
K	60-70°N	V	<500	V	<500	V	>500	V	>500	V	>500	V	<500	Z	<500	V	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	V	<500	V	>500	JV	>500	V	>500	JV	>500	JV	<500	SZ	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N	SV	>500	SV	>500			SV	>500												SZ
L	60-70°N	Z	<300					Z	<500	Z	<300	JV	<500	JV	<300	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	50-60°N	SZ	<300	Z	<500	SZ	<500	Z	>500	Z	<500					SZ	<500				SZ
	40-50°N	SZ	<500	SZ	<500	SZ	<500	SZ	>500	SZ	<500	JV	<500	SZ	<500			SZ	>500	SZ	<300
M	60-70°N																				
	50-60°N																				
	40-50°N																				
N	60-70°N																				
	50-60°N																				
	40-50°N																				
O	60-70°N	JV	<300	V	<500	JV	<500	JV	>500	V	<500	JV	<500	V	<500	JV	>500	V	<500	JV	>500
	50-60°N	SZ	<500	Z	<500			Z	<500	Z	<300	V	>500	V	>500	JV	<500	V	<500	V	<500
	40-50°N			SV	<500			V	<500			SV	>500	V	>500	JV	<500	SV	>500	JV	<500
P	60-70°N	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>1000	V	<1000	V	<1000	V	<1000	V	<1000
	50-60°N	JV	>500	JV	>500	JV	<500	JV	>500	JV	<500	JV	<1000	JV	>500	JV	<500	JV	<1000	JV	<1000
	40-50°N													V	>500						
Q	60-70°N	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	<1000	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500	V	>500
	50-60°N	JV	>500	V	>500	JV	<500	JV	>500	JV	>500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500	JV	<500
	40-50°N	SV	>500					JV	>500												
R	60-70°N	V	<500			V	<300			JZ	<300	JV	<1000	V	<1000	V	>500	V	>500	V	<1000
	50-60°N	V	<500	V	<500	JV	<300	V	<500	V	<500	JV	<1000	V	>500	JV	<500	JV	>500	JV	>500
	40-50°N	SV	>500	SV	>500			JV	<500	V	<500										

**Príloha 11:** Posuny hranice kontinentality 33 % v budúcich simuláciách s rozlíšením 0,44° v období 2071 – 2100 oproti pozorovaniam E-OBS (1971 – 2000) pre a) CCCma CanESM2\_UCAN WRF341I, b) CCCma CanESM2\_SMHI RCA4, c) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_SMHI RCA4, d) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_CNRM\_ALADIN53, e) CNRM-CERFACS CNRM-CM5\_HMS ALADIN52, f) ICHEC EC-EARTH\_IDL WRFV35D, g) ICHEC EC-EARTH\_KNMI RACMO2, h) MOHC HadGEM2-ES\_WEGC CCLM-COSMO, i) ICHEC EC-EARTH\_SMHI RCA4, j) IPSL CM5A-MR\_IPSLINERIS WRF331F, k) IPSL CM5A-MR\_SMHI RCA4, l) MIROC MIROC5\_SMHI RCA4, m) MOHC HadGEM2-ES\_DHMZ REGCM42, n) MOHC HadGEM2-ES\_SMHI RCA4, o) MPI-M ESM-LR\_CSC REMO, p) MPI-M ESM-LR\_SMHI RCA4, q) NCC NorESM1-M\_SMHI RCA4, r) NOAA-GFDL ESM2M\_SMHI RCA4, vľavo smer (S-sever, V-východ, J-juh, Z-západ) a vpravo miera posunu (< menej, > viac ako uvedená miera posunu v km)