

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Bc. Adam Dragula

**Atmosférické blokování a jeho klimatologie v závislosti na  
použitých kritériích detekce**

Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D.

Studijní program: Fyzika atmosféry, meteorologie a klimatologie

Studijní obor: Meteorologie a klimatologie

Praha 2021

Na tomto mieste by som rád srdečne poďakoval Mgr. Michalovi Žákovi, Ph.D. za poskytnutie príležitosti podieľať sa na tejto práci, za jej vedenie a predovšetkým za odborné rady, ktoré významne obohatili moje vedomosti. Tiež by som chcel poďakovať mojej rodine, ktorá ma počas štúdia podporovala.

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

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

V ..... dne.....

podpis

Název práce: Atmosférické blokování a jeho klimatologie v závislosti na použitých kritériích detekce

Autor: Bc. Adam Dragula

Katedra / Ústav: Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D., Katedra fyziky atmosféry

Abstrakt: Atmosférické blokování je fenomén synoptického měřítká, který může mít značné ekonomické a sociální dopady – kvůli korelaci s nebezpečnými projevy počasí, jako jsou vlny horka, dlouhé epizody sucha, nebo naopak záplavy. V rámci zkoumání blokování byly vyvinuty objektivní metody detekce. Jejich kvalitativní porovnání představuje hlavní náplň rešeršní části práce. Vybrané metody detekce byly následně použity pro analýzu základních charakteristik blokování v prostoru Evropy. Důraz byl kladen především na časový vývoj frekvence výskytu blokování a délky blokování s cílem určit možnou korelaci těchto charakteristik s nárůstem globální teploty vzduchu v souvislosti s probíhající změnou klimatu.

Klíčová slova: atmosféra, blokování, klimatická změna

Title: Atmospheric blocking and its climatology with respect to used detection criteria

Author: Bc. Adam Dragula

Department: Department of Atmospheric Physics

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

Abstract: Atmospheric blocking is a synoptic-scale weather phenomenon, which might have significant economic and social impacts on account of a correlation with severe weather features, such as heat waves, persistent drought periods or floods. Several objective detection methods were developed in order to study blocking events. These methods are described and qualitatively discussed in the review part of the thesis. Chosen detection methods were subsequently used for an analysis of basic blocking characteristics over European region. Time evolution of blocking frequency and blocking duration is the key part of results, focusing on possible correlation of these characteristics with the global temperature rise within climate change.

Keywords: atmosphere, blocking, climate change

Názov práce: Atmosférické blokovanie a jeho klimatológia v závislosti na použitých kritériách detekcie

Autor: Bc. Adam Dragula

Katedra / Ústav: Katedra fyziky atmosféry

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

Abstrakt: Atmosférické blokovanie je fenomén synoptického merítka, ktorý môže mať značné ekonomické a sociálne následky – kvôli korelácii s nebezpečnými prejavmi počasia, ako sú vlny horúčav, dlhé epizódy sucha, či naopak záplavy. V rámci skúmania blokovania boli vyvinuté objektívne metódy detekcie. Ich kvalitatívne porovnanie predstavuje hlavnú náplň rešeršnej časti práce. Vybrané metódy detekcie boli následne použité na analýzu základných charakteristík blokovania v priestore Európy. Dôraz bol kladený predovšetkým na časový vývoj frekvencie výskytu blokovania a dĺžky blokovania s cieľom určiť možnú koreláciu týchto charakteristík s nárastom globálnej teploty vzduchu v súvislosti s prebiehajúcou zmenou klímy.

Kľúčové slová: atmosféra, blokovanie, klimatická zmena

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1. Kritériá a klasifikácia blokujúcej cirkulácie</b>	<b>3</b>
1.1 Kritériá blokovania	3
1.2 Klasifikácia blokovaných cirkulačných štruktúr	4
1.3 Významné blokované situácie v priestore Európy	6
<b>2. Objektívne metódy detekcie blokovania</b>	<b>11</b>
2.1 Gradient geopotenciálnej výšky (AGP)	11
2.2 Anomália geopotenciálnej výšky ( $Z^*$ )	13
2.3 Anomália potenciálnej vorticity ( $PV^*$ )	14
2.4 Modifikácia prahových hodnôt, normalizované anomálie	14
<b>3. Porovnanie objektívnych metód detekcie blokovania</b>	<b>17</b>
3.1 Všeobecné priemerné lokalizovanie blokov	17
3.2 Trvanie bloku	20
3.3 Zonálna vzdialenosť (prejdená)	23
3.4 Zonálna rýchlosť	24
3.5 Veľkosť bloku	26
<b>4. Dáta a metodika</b>	<b>28</b>
4.1 Meteorologické reanalýzy ECMWF	28
4.2 Vybrané metódy, popis spracovania	29
4.2.1 Použité metódy, dlhodobý priemer	29
4.2.2 Prahové hodnoty	30
4.2.3 Vplyv klimatickej zmeny na blokovanie	32
4.2.4 Dĺžka blokovania, rozdelenie domény	34
4.2.5 Použitý software	34

<b>5. Výsledky</b>	<b>36</b>
5.1 Metóda Z*	36
5.1.1 Frekvencia blokovania	36
5.1.2 Dĺžka blokovania	45
5.2 Metóda PV*	50
5.2.1 Frekvencia blokovania	50
5.2.2 Dĺžka blokovania	54
5.3 Blokovanie v lete 2010	55
<b>6. Diskusia</b>	<b>59</b>
<b>7. Záver</b>	<b>61</b>
<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>63</b>
<b>Zoznam použitých skratiek</b>	<b>66</b>

# Úvod

Atmosférická cirkulácia pásov miernych širok oboch hemisfér je charakteristická prevládajúcimi západnými vetrami a vlnovými pohybmi planetárnych či synoptických merítok, ktoré sa pohybujú zväčša od západu na východ. Konkrétny charakter prúdenia predovšetkých vo vyšších hladinách závisí na tvare Rossbyho vln, ktoré predstavujú disturbanciu zonálneho prenosu vzduchu v stredných zemepisných šírkach (*Sobišek et al.*, 1993). Veľmi dôležitou, a z hľadiska prejavov počasia významnou výnimkou tejto prevládajúcej cirkulácie, je atmosférické blokovanie.

Pojem blokovanie predstavuje stav atmosféry v určitej oblasti miernych zemepisných širok, kedy je prevládajúce západné prúdenie narušené meridionálnou cirkulačnou štruktúrou, ktorú vo väčšine prípadov predstavuje mohutná, kvázistacionárna anticyklóna. Takáto blokujúca tlaková výš vyvádza ovplyvnenú oblasť zo štandardných klimatických podmienok a bráni v postupe jednotlivým atmosférickým, ktoré sú nerozlúčiteľnou súčasťou prevládajúcej zonálnej cirkulácie.

Prítomnosť atmosférického blokovania môže mať veľmi výrazný vplyv na počasia v značnej časti miernych zemepisných širok, čo často vedie k plošne rozsiahlym anomálnym meteorologickým podmienkam. Tie môžu vďaka meridionálnemu charakteru cirkulácie znamenať výrazné vpády studeného vzduchu, či naopak vlny horúceho počasia. Mohutná anticyklonalita často vedie k prechodným epizodám suchého počasia, ale v rámci blokujúcej cirkulácie nie sú v niektorých regiónoch vzácne ani významné zrážkové epizódy. Vplyv blokovania je skutočne výrazný a komplexný, nakoľko dlhotrvajúca anticyklonalita môže mať značný vplyv na kvalitu ovzdušia, či už v podobe zvýšenej koncentrácie ozónu v nižších hladinách v lete, alebo v podobe nahromadenia znečisťujúcich pevných častíc hlavne v urbanizovaných priestoroch (*Tibaldi a Molteni*, 1990). Najaktuálnejším príkladom značného vplyvu blokovania na stav atmosféry môže byť extrémna vlna horúčav z konca júna 2021 v Kanade, Britskej Kolumbii. V rámci anticyklóny tzv. omega bloku vystúpili teploty nad +45°C a národný rekord z roku 1937 bol prekonaný o vyše 4°C, keď 29.6.2021 vystúpila teplota v Lyttone až na +49,6°C (*Reuters*, online). Extrémne horúce počasia si v Kanade vyžiadalo

desiatky až stovky obetí na ľudských životoch.

Blokovanie môže pretrvávajúť niekoľko dní, ale v extrémnych prípadoch môže vydržať aj niekoľko týždňov. Čo sa týka sezónneho výskytu, podstatne častejšie je blokovanie v zimnom polroku, pretože anticyklogenetické procesy sú významnejšie práve v zime, hlavne čo sa týka termálnych tlakových výší. Blokovanie má tiež geografické preferencie, nakoľko častejšie sa vyskytuje v severnej hemisfére, a to najčastejšie v určitých dĺžkových kvadrantoch, ako napríklad v oblasti Atlantiku, či v Pacifickej oblasti. V južnej hemisfére sú epizódy blokovania menej časté a dĺžková lokalizácia je tiež menej významná (*Tibaldi a Molteni, 1990*). Jedným z hlavných dôvodov je prítomnosť podstatne menej rozsiahlych kontinentov v miernych a vyšších zemepisných šírkach, čo hrá významnú rolu v anticyklogenetických procesoch.

Prvé riadne zdokumentované poznatky o atmosférickom blokovaní pochádzajú z konca 40-tych rokov minulého storočia. Príkladom je prípadová štúdia *Berggren a kol.* (1949), v ktorej sú dokumentované vplyvy blokovania na regionálnu klímu. Vďaka pokroku v sondážnych meraniach v povojnových rokoch popísal *Berggren a kol.* schématicky nestabilné vlny vo vyšších hladinách, ktoré boli spojené s vývojom blokovania. Väčšina štúdií o blokovaní pred tohto obdobia používala priemerné polia tlaku vzduchu pre 5 až 7 dňové periódy, ktoré zdôrazňovali hlavne variabilitu prúdenia vo veľkých merítkach, avšak neobsahovali dôležité detaily v menších ako priestorových, tak časových merítkach (*J. L. Pelly, 2003*). V roku 1950 bola prvýkrát zavedená oficiálna definícia bloku, ktorá bola odborne uznávaná (*Rex, 1950*). Rex definoval blokovanie ako rozdelenie základného západného prúdenia do dvoch samostatných vetiev lokalizovaných v dĺžkovom rozpätí aspoň 45°, ktoré trvá minimálne 10 dní. Na základe jeho výskumov medzi rokmi 1932 až 1950 tiež zvýraznil geografickú preferenciu blokov (v severnej hemisfére) – blokovanie sa najčastejšie vyskytuje vo východných zátokách oceánov (*J. L. Pelly, 2003*).

Cieľom práce je analyzovať základné charakteristiky blokovania v priestore Európy na základe vybraných objektívnych metód detekcie blokovania. Dôraz je kladený predovšetkým na časový vývoj týchto charakteristík v rámci obdobia zvyrazňujúcej sa klimatickej zmeny započanej ľudskou aktivitou.

# 1. Kritériá a klasifikácia blokujúcej cirkulácie

## 1.1 Kritériá blokovania

Atmosférické blokovanie bolo študované celé dekády od počiatkov rozvoja meteorologickej školy. Na svojich začiatkoch v polovici 20. storočia však bolo určovanie blokovanej cirkulácie značne obmedzené vtedajšími možnosťami. Pracovníci meteorologických či klimatických služieb boli z technických dôvodov nútení vkladať do svojich hodnotení poveternostných situácií väčších merítok svoj subjekt, čo prirodzene viedlo k podstatným rozdielom medzi jednotlivými individuálnymi závermi.

Postupom času a rozvojom techniky bolo možné definovať kritériá pre určenie, či je vlastne daná situácia blokovaná. Tri základné kritériá boli zverejnené v roku 2000 v druhom vydaní slovníka meteorológie vydanom Americkou meteorologickou spoločnosťou (AMS) (Pinheiro a kol., 2019):

- pretrvávajúca prekážka v západnom prúdení,
- výrazné meridionálne prúdenie vo vyšších hladinách, a
- anticyklonálna cirkulácia vo vyšších zemepisných šírkach sprevádzaná cyklonálnou cirkuláciou v nižších zemepisných šírkach.

Na európskom kontinente oficiálne kritériá zverejnené neboli, ale v praxi sa používajú objektívne metódy detekcie blokov, ktoré sú založené práve na týchto kritériách, teda implicitne platia celosvetovo. Napríklad v meteorologickom slovníku Českej meteorologickej spoločnosti (elektronický slovník ČMeS, online) je blokovanie definované ako: *Zabránenie postupu postupujúcich cyklón a anitcyklón v západovýchodnom smere v miernych zemepisných šírkach. Blokovanie je spojené s výrazne meridionálnym charakterom prúdenia, hlavne vo vyšších hladinách, a spravidla*

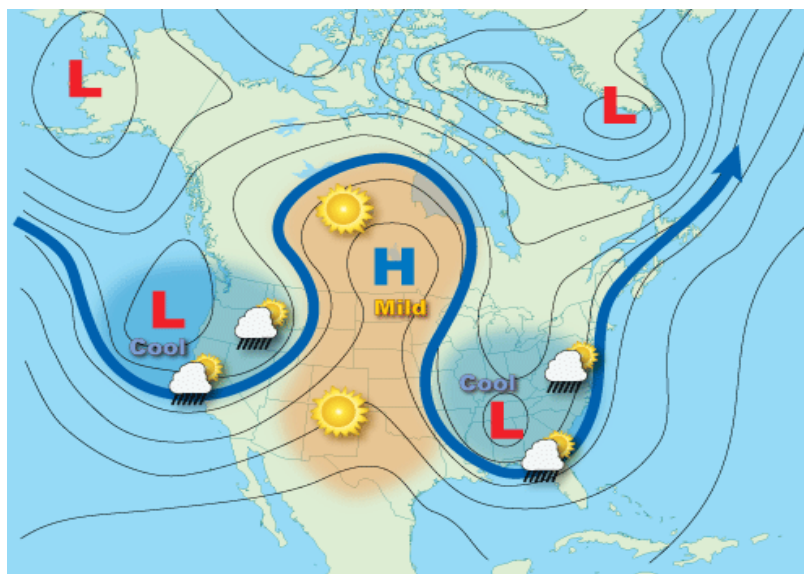
je charakterizované prítomnosťou vysokej a teplej anticyklóny vo vyšších zemep. šírkach a prítomnosťou jednej či viacerých uzavretých cyklonálnych cirkulácii v nižších zem. šírkach.

Z tejto definície je vidno, že v plnom rozsahu korešpondujú s oficiálnymi americkými kritériami.

## 1.2 Klasifikácia blokovaných cirkulačných štruktúr

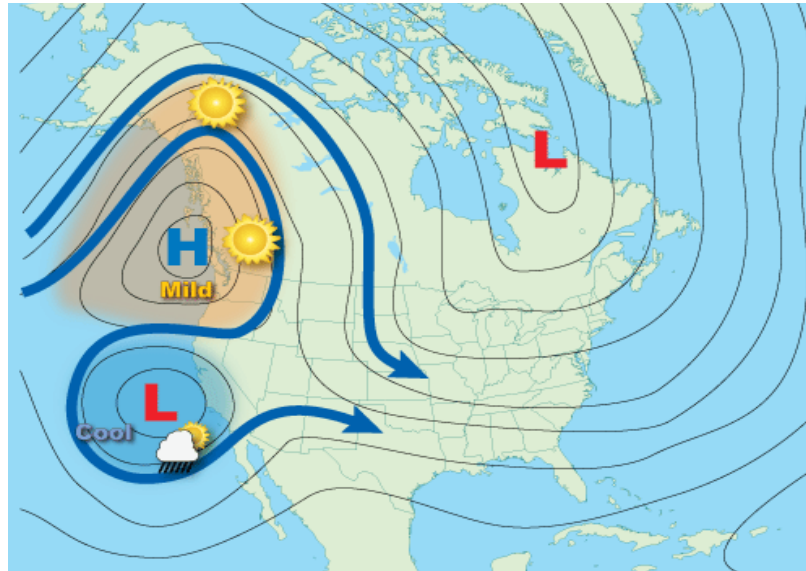
Blokovaná poveternostná situácia môže nadobúdať rozličné podoby, ktoré spĺňajú vyššie uvedené ustanovené kritériá. Je dôležité dodať, že jedna blokujúca cirkulácia nutne nemusí mať po celú dobu svojho pôsobenia jeden typový charakter, ale časom sa môže transformovať, a tým pádom nadobúdať viac z nasledujúcich typov blokovaných cirkulácii (*NOAA – National Weather Service*, online):

- *Omega blok*: je kombinácia dvoch izolovaných níží a jednej blokujúcej výše, ktorá je vložená medzi nimi. Vďaka svojej plošnej rozsiahlosti disponuje tento typ bloku časovou vytrvalosťou, čo môže do postihnutých oblastí priniesť výrazné epizódy suchého a teplého počasia, či naopak obdobia vytrvalých zrážok a nízkych teplôt, v závislosti na polohe danej lokality v rámci cirkulácie.



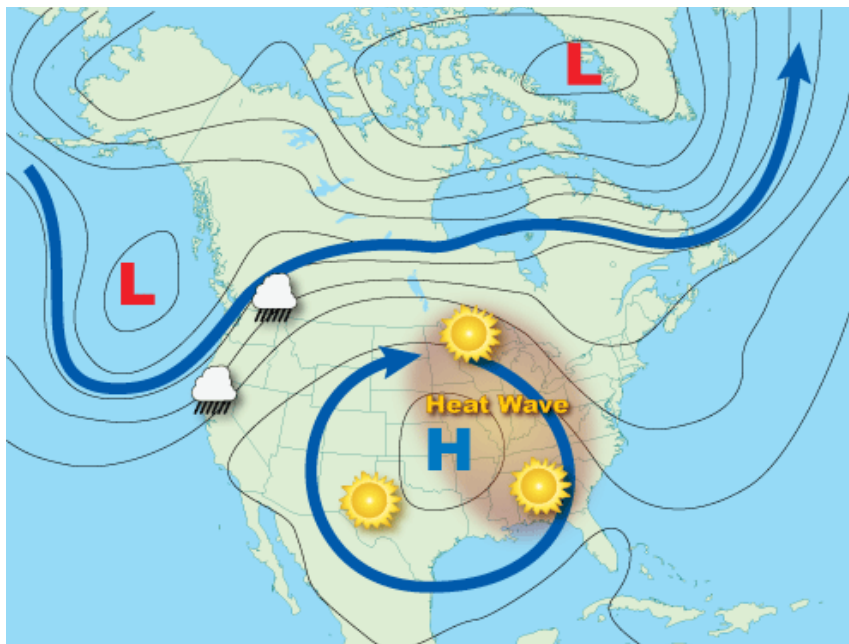
**Obr. 1:** Rozloženie tlakových útvarov - omega blok. (*National Weather Service*)

- *Rex blok*: je charakterizovaný systémom vysokého tlaku vzduchu, ktorý je lokalizovaný smerom k pólu od oblasti nízkeho tlaku vzduchu. Rex blok zotrúva takmer stacionárny, až pokiaľ jeden zo stredov výše nezmení svoju intenzitu, čím naruší rovnováhu medzi hlavnými riadiacimi tlakovými útvarmi.



**Obr. 2:** Rozloženie tlakových útvarov - rex blok. (National Weather Service)

- *Blokujúca výš/hrebeň vysokej amplitúdy*: typ blokovania najčastejší v lete. Prináša vlny horúceho a suchého počasia. Vďaka zostupným pohybom je obloha prevažne jasná, akékoľvek zrážky sú odsunuté na periférie blokujúcej výše. Slabnutie výše zvyčajne prináša vlna menšej amplitúdy presúvajúca sa v tesnej blízkosti severného okraja výše.



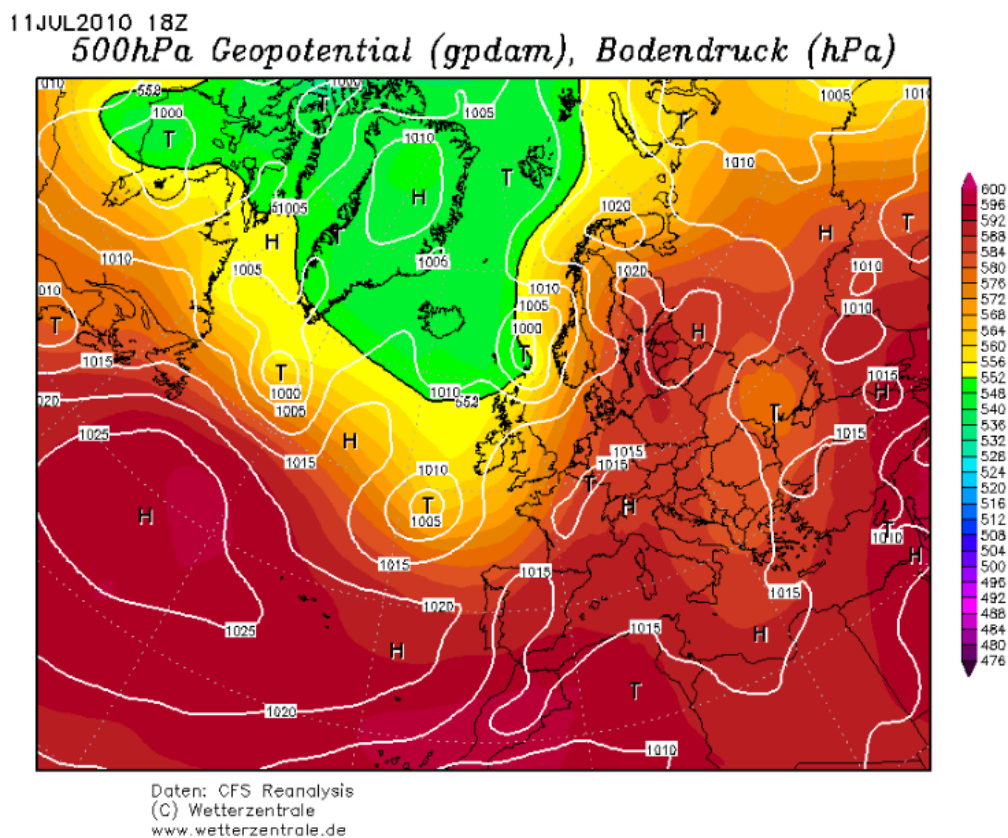
*Obr. 3: Rozloženie tlakových útvarov v rámci bloku tlakovou výšou. (National Weather Service)*

V priestore Európy sa popisujú zväčša len omega blok a rex blok, ktorý tu býva častejšie označovaný ako tzv. dipólový blok (*J. L. Pelly, 2003*).

### 1.3 Príklady významného blokovania v Európe

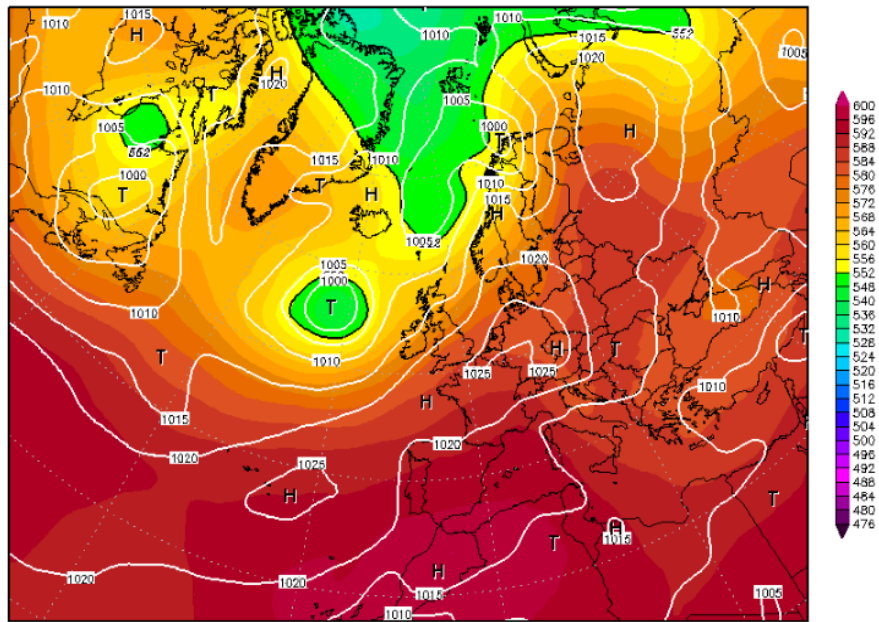
Ako bolo v úvode spomenuté, atmosférické blokovanie je často spojené s nebezpečnými prejavmi počasia rôzneho charakteru, pričom nepriaznivé podmienky spôsobené blokovaním môžu pretrvávať celé týždne. Typickým príkladom je pravdepodobne najvýraznejšia vlna horúčav na území Ruska v histórii meraní, ktorá postihla predovšetkým juhozápadnú časť krajiny v lete 2010. Nad časťou strednej a vo veľkej časti východnej Európy zmohutnela blokujúca anticyklóna, ktorá nad kontinentálnym Ruskom spôsobila postupný vzostup teplôt až nad hranicu  $+40^{\circ}\text{C}$  a na niektorých stanicích boli prekonávané rekordy maximálnej teploty vzduchu v 2 m nad povrchom. Prírodným sprievodným javom bolo výrazné sucho, ktoré podporilo vznik

rozsiahlych požiarov, kvôli ktorým prišli o život stovky ľudí. Na obrázkoch 4-7 vidno synoptickú situáciu a pole geopotenciálu izobarickej hladiny 500 hPa počas júla 2010 a ukážku teploty vzduchu v 2 m nad povrchom z 1.8.2010. Detailnejší pohľad na situáciu bude priložený v kapitole 5 – Výsledky.



**Obr. 4:** Pole geopot. výšky hladiny 500 hPa, 11.7.2010. (wetterzentrale.de, online)

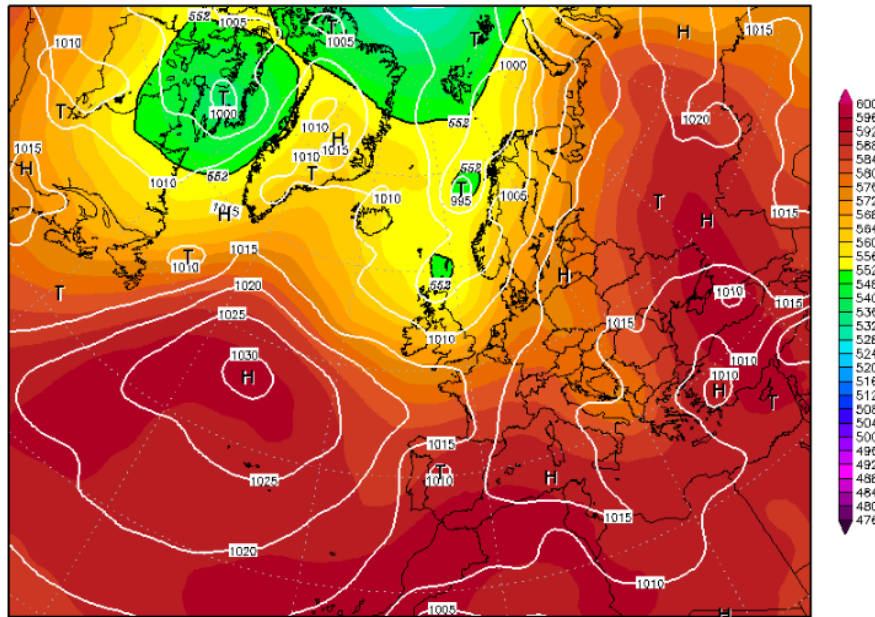
18JUL2010 18Z  
 500hPa Geopotential (gdam), Bodendruck (hPa)



Daten: CFS Reanalysis  
 (C) Wetterzentrale  
 www.wetterzentrale.de

**Obr. 5:** Pole geopot. výšky hladiny 500 hPa, 18.7.2010. (wetterzentrale.de, online)

31JUL2010 18Z  
 500hPa Geopotential (gdam), Bodendruck (hPa)

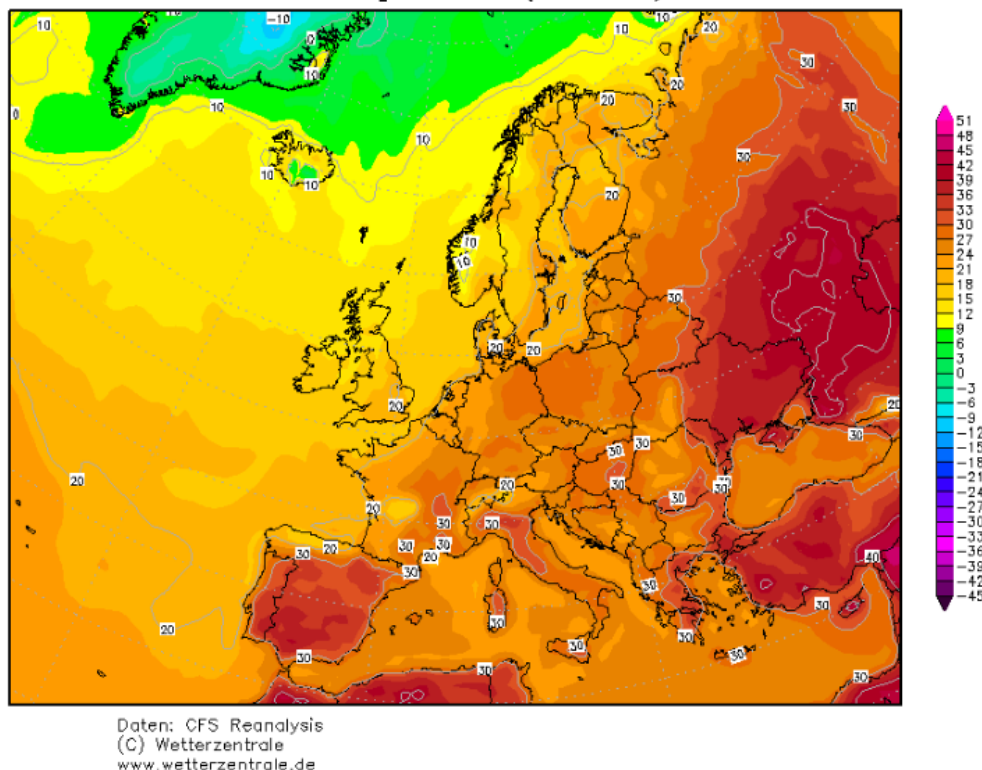


Daten: CFS Reanalysis  
 (C) Wetterzentrale  
 www.wetterzentrale.de

**Obr. 6:** Pole geopot. výšky hladiny 500 hPa, 31.7.2010. (wetterzentrale.de, online)

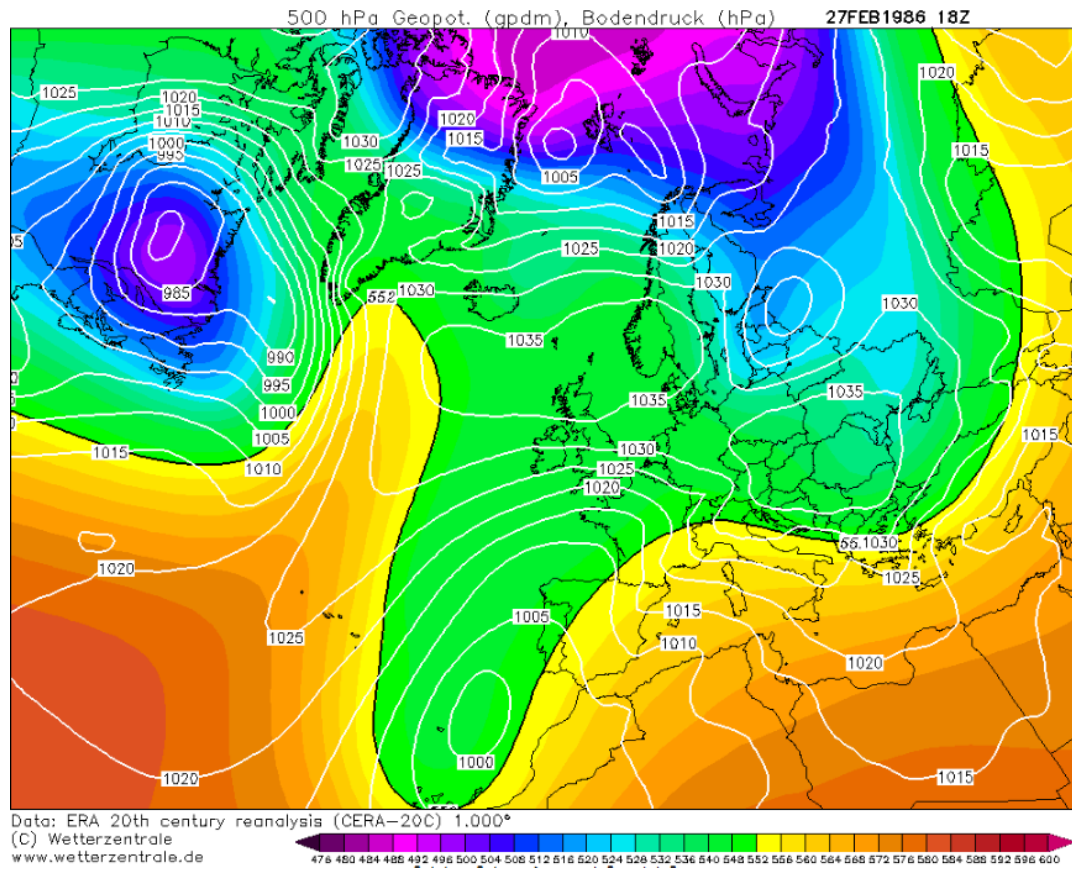
01AUG2010 13Z

### 2m Temperatur (Grad C)



**Obr. 7:** Pole teploty vzduchu v 2 m nad povrhom, 1.8.2010. ([wetterzentrale.de](http://wetterzentrale.de), online)

V zimnom období môže naopak blokovanie do veľkej časti Európy priniesť chladné počasie v podobe prílevu vzduchu od SV na prednej strane blokujúcej výše. Ilustračným príkladom môže byť rok 1986, kedy vo februári do väčšiny starého kontinentu zatekal studený vzduch z Ruska. Z obrázku 8 je zrejmé, že blokujúca anticyklóna bola v tomto prípade pozoruhodne rozsiahla a rozpriestierala sa prakticky nad celou Európou.



**Obr. 8:** Pole geopot. výšky hladiny 500 hPa, 27.2.1986. (wetterzentrale.de, online)

## 2. Objektívne metódy detekcie blokovania

Vývoj a ustanovenie objektívnych metód detekcie atmosférických blokování bolo nevyhnutné z niekoľkých dôvodov (*Pinheiro a kol.*, 2019).

Jedným z nich je konzistencia, ktorá znamená odstránenie ľudského subjektu z procedúr danej metódy detekcie blokovania, čoho výstupom sú konzistentné výsledky pre konkrétne dáta. Stále je ale nutné si uvedomiť, že ľudský subjekt nemôže byť odstránený úplne, nakoľko pri samotnom vývoji danej metódy detekcie vždy musel byť počiatočný úsudok človeka. Avšak algoritmický postup zvyšnej časti procedúr ponecháva ľudský subjekt iba na úplnom počiatku metód.

Ďalším z dôvodov je efektivita detekcie (*Pinheiro a kol.*, 2019). Automatizácia metód umožňuje výpočet a porovnanie blokujúcich štruktúr naprieč rozsiahlym územím vo vysokom rozlíšení, čo bol na počiatkoch analýzy blokování prirodzene najväčší problém.

Detailné porovnania a analýzy existujúcich objektívnych metód detekcie blokovania prinášajú pomerne zřejmé závery. *Scherrer a kol.* (2006) vo svojej práci o 2D metódach detekcie uvádza, že porovnávané metódy sa, čo sa týka detekcie a lokalizovania blokujúcej cirkulácie, líšia v priestore a čase, a tým pádom aj v klimatologickej frekvencii výskytu blokovania. Tieto časopriestorové rozdiely jednotlivých metód sú závislé na životnom cykle blokujúcej štruktúry, použitého poľa v rámci metódy (absolútne/anomálne pole), a v neposlednom rade vznikajú rozdiely v závislosti na type blokovania (viď kap. 1.2). V nasledujúcich podkapitolách sú uvedené základné a najpoužívanejšie existujúce objektívne metódy detekcie blokovania.

### 2.1 Gradient geopotenciálnej výšky (AGP)

Najčastejšia metóda detekcie blokovania, založená na geopotenciálnej výške izobarickej hladiny 500 hPa, má svoje základy položené v publikácii *Lejenäs a Økland* (1983). Základom aktuálnej podoby metódy sú dva gradienty počítané okolo centrálnej

zemepisnej šírky:

$$GHGN = \frac{Z500(\Phi_n) - Z500(\Phi_0)}{\Phi_n - \Phi_0}, \quad (1)$$

$$GHGS = \frac{Z500(\Phi_0) - Z500(\Phi_s)}{\Phi_0 - \Phi_s}, \quad (2)$$

kde  $\Phi_0$  je referenčná zemepisná šírka a  $\Phi_n$  a  $\Phi_s$  sú šírky nad a pod  $\Phi_0$  a  $GHGN$  a  $GHGS$  sú spomínané výškové gradienty. To, ako ďaleko sú šírky  $\Phi_n$  a  $\Phi_s$  nie je pevne dané a je to subjektívna záležitosť, pôvodne sa však uvažovalo o  $20^\circ$ , pričom centrálna šírka bola pevne daná ako  $50^\circ$  s.š. (*Lejenäs a Økland, 1983*).

Pre  $GHGN < -10$  m/° šírky a  $GHGS > 0$  m/° šírky, je daný bod považovaný za blokovaný. Vo všeobecnosti, záporné hodnoty  $GHGN$  a kladné hodnoty  $GHGS$  implikujú rozsiahlu výš v poli geopotenciálnej výšky izobarickej hladiny 500 hPa. Je nutné si uvedomiť, že pre južnú hemisféru je potrebné prahové hodnoty vymeniť, pretože orientácia hrebeňov anticyklón je opačná a zemepisná šírka má záporné znamienko. To znamená, že pre južnú hemisféru platí, že bod je blokovaný, ak  $GHGN < 0$  m/° šírky a  $GHGS > 10$  m/° šírky.

V pôvodnej publikácii *Tibaldi a Molteni (1990)* bola táto metóda aplikovaná na jednu diskretnú hodnotu zemepisnej šírky, a to  $60^\circ$  s.š.. *Scherrer a kol. (2006)* modifikovali tento algoritmus a rozšírili oblasť záujmu na rozsah  $35^\circ$  s.š. -  $75^\circ$  s.š., pričom navyše definovali  $\Phi_n$  a  $\Phi_s$  ako  $15^\circ$  od centrálnej šírky. Najnovšia publikácia *Pinheiro a kol. (2019)* ešte rozšírila oblasť záujmu až ku  $25^\circ$  s.š. v oboch hemisférach.

*Tibaldi a Molteni (1990)* definujú blokujúcu epizódu ako región blokovaného prúdenia, ktorý zasahuje aspoň cez  $12^\circ$  zemepisnej šírky, pričom musí trvať aspoň 4 dni. Táto definícia spĺňa druhú a tretiu podmienku kritérii blokovania z kapitoly 1.1 (meridionálne prúdenie a anticyklonálna cirkulácia), avšak prvú podmienku (prekážku v normálnom západnom prúdení) nutne spĺňať nemusí, keďže táto metóda je založená na poli absolútnej veličiny, ktorá sa neviaže k žiadnym klimatickým normálom (na rozdiel

od metód užívajúcich polia anomálie).

## 2.2 Anomália geopotenciálnej výšky ( $Z^*$ )

Základom metódy, ktorá bola prvý krát uvedená v práci *Dole a Gordon* (1983), je anomália geopotenciálnej výšky izobarickej hladiny 500 hPa ( $Z500^*$ ), ktorá je najprv počítaná ako odchýlka výšky od dlhodobého sezónneho normálu,  $h'$ , následne je normalizovaná šírkovým koeficientom (*Dole a Gordon*, 1983):

$$Z500^* = \left( \frac{\sin 45^\circ}{\sin \Phi} \right) h' \quad (3)$$

Gridový bod sa považuje za blokovaný, ak  $Z500^*$  prekročí určitú prahovú hodnotu po nejakú dobu. Tieto dva stupne voľnosti metódy sa dajú rôzne kombinovať podľa toho, akú charakteristiku blokovania hľadáme. V pôvodnej publikácii *Dole a Gordon* (1983) sa uvažovali tri kombinácie týchto parametrov – anomália +150 m aspoň po dobu 5 dní, +100 m aspoň po dobu 10 dní, a napokon +50 m aspoň po dobu 15 dní. Napríklad *Sausen a kol.* (1995) použili pre minimálne 5-dňové obdobie prahovú hodnotu +250 m, čo už ale pri výpočtoch nie je úplne praktické a názorné, nakoľko takáto kombinácia detekuje len mimoriadne výrazné anomálne situácie s veľmi nízkou časovou frekvenciou. V podkapitole 2.4 je uvedená najnovšia metodika výpočtu prahových hodnôt, ktoré sú časovo aj priestorovo premenlivé. Naše konkrétne nastavenia prahových/časových hodnôt v prípade skúmania blokov v priestore Európy v rámci klimatickej zmeny budú popísané v kapitole 4. Je zrejmé, že niektoré kombinácie týchto parametrov vzhľadom k zadaniu práce nie sú vhodné.

Táto metóda teoreticky spĺňa všetky tri kritéria blokovania (kap. 1.1), pretože anomálne veľká geopotenciálna výška izobarickej hladiny 500 hPa modifikuje cirkuláciu spôsobom, ktorý je konzistentný so všetkými tromi požiadavkami (*Pinheiro a kol.*, 2019).

## 2.3 Anomália potenciálnej vorticity (PV\*)

Relatívne mladšia a modernejšia metóda detekcie blokovania bola prvýkrát formulovaná v publikácii *Schwierz a kol.* (2004). Táto metóda uvažuje o blokovanom regióne ako o oblasti s nízkou potenciálnou vorticitou, prípadne s negatívnou anomáliou potenciálnej vorticity ( $VPI^*$ ) v severnej hemisfére (na južnej ide o pozitívnu anomáliu potenciálnej vorticity). Anomálie sú počítané z denných priemerov potenciálnej vorticity v stĺpcovom priemere v rozmedzí izobarických hladín 150 až 500 hPa. V pôvodnej publikácii sa región pri tejto metóde detekcie považuje za blokovaný, ak anomália potenciálnej vorticity dosiahne hodnotu 1,2 PVU (t.j. 1,2 *potential vorticity unit* =  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$  (*AMS – glossary of meteorology*, online)). Schwierz a kol. (2004) uprednostňuje túto metódu pred metódu  $Z^*$ , pretože horizontálne pole anomálii potenciálnej vorticity lepšie kopíruje tvar dynamickej tropopauzy. Avšak metóda má aj svoje nevýhody, napríklad pre veľmi výrazne negatívne (pozitívne) hodnoty vorticity v severnej (južnej) hemisfére môže táto metóda chybné vyhodnotiť prúdenie bez akýchkoľvek prekážok ako blokované (*Pinheiro a kol.*, 2019).

## 2.4. Modifikácia prahových hodnôt, normalizované anomálie

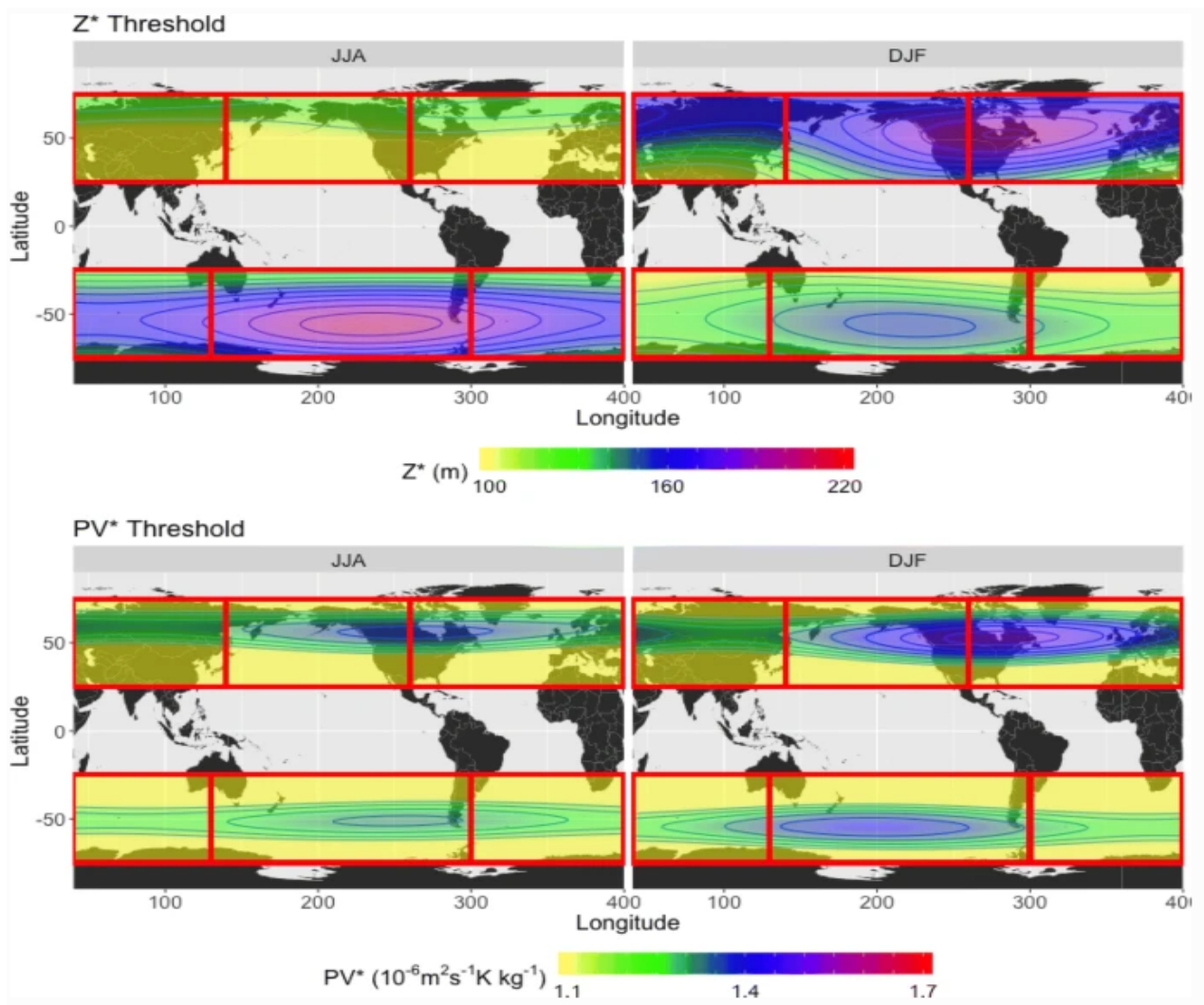
V starších, vyššie spomenutých publikáciách, ktoré sa venovali problematike porovnávania objektívnych metód detekcie blokovania, sa používali konštantné prahové hodnoty (napr. 100 m, 1,2 PVU) nezávisle na regióne. Modernejší (nie nutne vhodnejší/lepší) prístup je uvedený v publikácii *Pinheiro a kol.*, 2019, v ktorej sa v každom gridovom bode počíta štandardná odchýlka od časovej rady hodnôt v tomto bode ( $\sigma_V^*$ ) a prah je definovaný ako 1,5-násobok tejto odchýlky. Tieto hodnoty sú ďalej harmonickou analýzou zhladzované v oboch smeroch (aj v zonálnom aj v meridionálnom). Procedúra zhladzovania časovej rady metódou Fourierovej transformácie je bližšie popísaná v publikácii (*Grotjahn a Zhang*, 2017). Dôvodom pre túto procedúru sú významné medzidenné variácie sledovanej veličiny. Rovnakým

spôsobom sa počítajú aj dlhodobé normály rátané z priemerných denných hodnôt, ktoré tiež vykazujú výraznú medzidennú variáciu (napríklad dlhodobý normál pre výšku geopotenciálnej hladiny 500 hPa). Po pridaní prahového kritéria  $\alpha_{min}$ , ktoré je 100 m v prípade výšky a 1,1 PVU v prípade potenciálnej vorticity, je prah  $\alpha$  definovaný ako:

$$\alpha = 1,5 \cdot \sigma_{V^*}, \text{ ak } \alpha \geq \alpha_{min}$$
$$\text{inak } \alpha = \alpha_{min}. \quad (4)$$

Korekcia na predpísanú prahovú hodnotu je nutná vzhľadom ku konzistencii kvôli lokalitám s minimálnymi sklonmi k blokovanej cirkulácii. V gridových bodoch takýchto regiónov sú štandardné odchýlky veľmi malé, čo by znamenalo, že za použitia definície  $\alpha = 1,5 \cdot \sigma_{V^*}$ , by bola prahová hodnota tiež veľmi malá.

Takto definované prahové hodnoty sú výrazné závislé na regióne a na sezóne. Rozdiely sú výraznejšie v prípade výšky izobarickej hladiny 500 hPa (viď obr. 4), kde v oblasti Atlantiku a Pacifiku dosahujú štandardné odchýlky až 170-180 m, zatiaľčo vo východnej Ázii len do 50 m (*Pinheiro a kol.*, 2019).

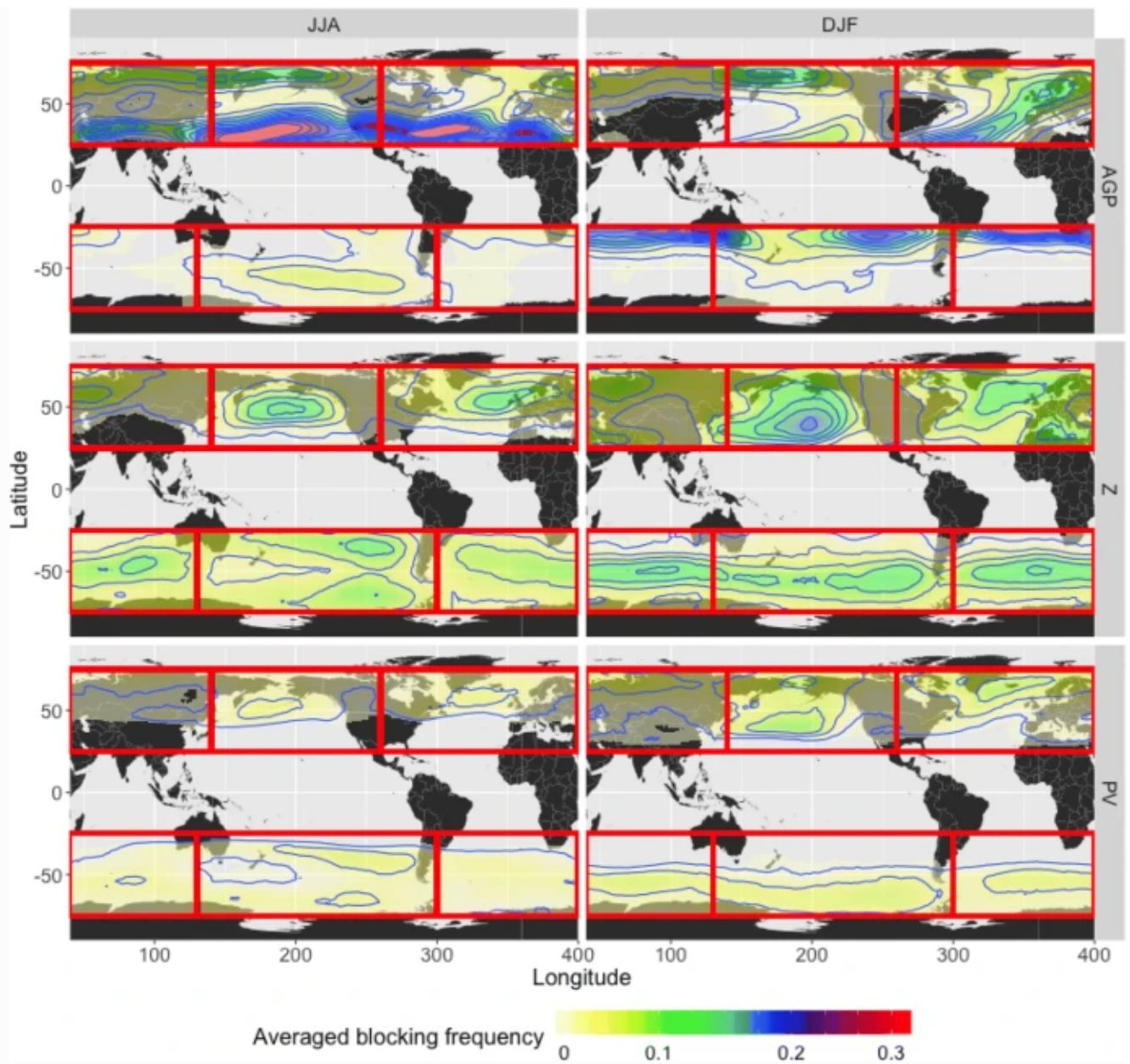


*Obr. 9: Sezónne priemery prahových hodnôt pre Z500 anomáliu (hore) a vertikálne spriemerovanú anomáliu pot. vorticity (dole). (Pinheiro a kol., 2019)*

## **3. Porovnanie objektívnych metód detekcie blokovania**

### **3.1 Všeobecné priemerné lokalizovanie blokov**

Ako základná ilustrácia zjavných rozdielov medzi metódami slúži priemerná priestorová lokalizácia blokov podľa jednotlivých metód. Pre tento účel sa používa priemerná sezónna frekvencia blokovania pre sezóny JJA (jún-august) a DJF (december-február). V publikácii *Pinheiro a kol.*, 2019 je táto frekvencia počítaná pre celú dátovú sadu ERA-Interim, ktorá pokrýva obdobie od roku 1979 do 2018, teda obdobie posledných 39 rokov. Výsledky sú zobrazené na obr. 10., na ktorom sú jasne vidno zrejme nezhody medzi jednotlivými metódami detekcie. Každý z algoritmov produkuje určité regionálne a sezónne rozdiely v priestorovom rozložení a intenzite blokovania.



**Obr. 10:** Priemerné sezónna frekvencia pre sezónu JJA (vľavo) a DJF (vpravo), pre metódy AGP (hore), Z\* (v strede), PV\* (dolu). (Pinheiro a kol., 2019)

Hodnota frekvencie značí časť blokovaných dní za danú sezónu v priemere za 39 rokov reanalýzy. Škála frekvencii na obr. 5 má interval od 0,01 (menej ako 1 deň za sezónu) do 0,40 (zhruba 37 dní za sezónu). Škálovanie je zobrazené linkami, ktoré odpovedajú intervalu 0,03 (zhruba 3 dni za sezónu).

Z obr. 10 je vidno, že najstabilnejšou metódou sa javí metóda Z\*, ktorá detekuje bloky vo väčšine regiónov s nie príliš výraznými hodnotami priemernej frekvencie, s maximami okolo 19% (18 dní za sezónu). Metóda AGP vyzerá byť lepšie optimalizovaná pre severnú hemisféru. Maximá frekvencie dosahuje až na 40% (37 dní v sezóne), v nižších šírkach letnej hemisféry. Metóda PV\* detekuje maximá v podobných lokalitách ako Z\*, avšak s podstatne nižšími hodnotami frekvencie, s maximami len okolo 9% (8 dní v sezóne).

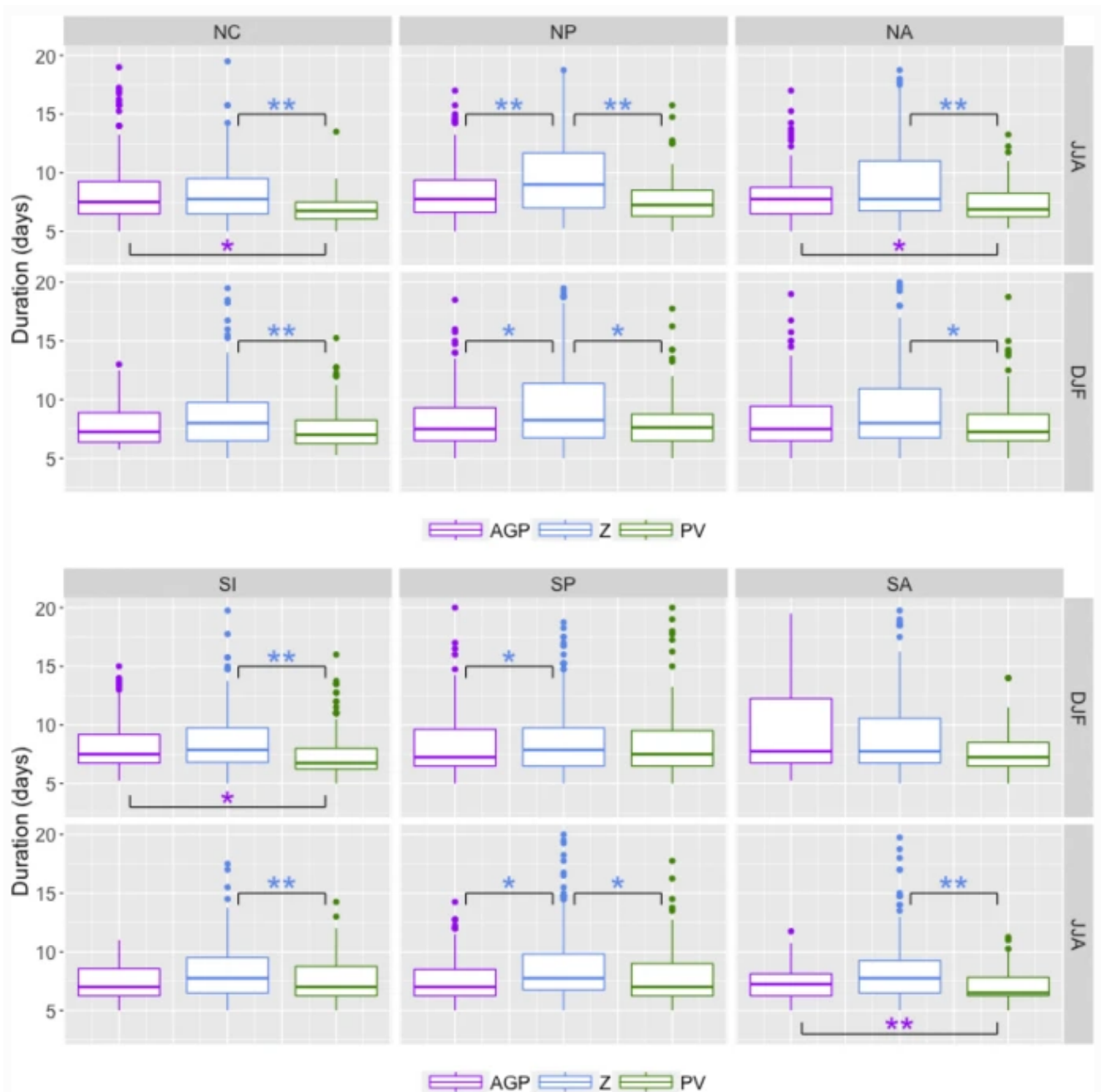
Rozdiely medzi metódami sú podobné rozdielom, ktoré sú popísané v starších publikáciách, ako napríklad *Maspoli a kol.*, 2007, či *Dunn-Sigouin a kol.*, 2012. Ide hlavne o maximá lokalizované v blízkosti Škandinávie a Aleút. Napriek štandardizácii metód v publikácii *Pinheiro a kol.*, 2019, sa nepodarilo odstrániť pomerne značné rozdiely v intenzite a lokalizácii blokujúcich štruktúr.

Výrazným progresom v prípade použitej 2D metódy AGP (interval centrálnych širok 35-75° s.š., nie len jedna centrálna šírka 60° s.š.) je ale fakt, že táto metóda je schopná detekovať významné oblasti maxím v nižších šírkach, čo 1D metódy použité v starších publikáciách nie sú schopné. Napríklad 1D indexy v práci *Tibaldi a Molteni*, 1990 identifikujú len bloky v tesnej blízkosti centrálnej zemepisnej šírky, teda v prípade centrálnej šírky 60° metóda nebola absolútne schopná zachytiť akékoľvek blokovania v šírkach 40° a menej. Teda práve v nízkych šírkach je rozdiel medzi 1D a 2D metódami najpodstatnejší.

Ako je vidno z obr. 10, metóda AGP v letnej sezóne vykazuje veľmi výrazné bloky v nízkych šírkach, pričom zvyšné metódy tam sotva vykazujú nejaké bloky. To je pochopiteľné, pretože anomálne metódy len ťažko detekujú letné bloky v nízkych šírkach, z dôvodu vysokých sezónnych priemerných hodnôt danej veličiny, ku ktorej sa anomália počíta. AGP nie je anomálna metóda, a preto tu, narozdiel od zvyšných dvoch metód, detekuje výrazné bloky. V zimnej sezóne (DJF) avšak aj anomálne metódy detekujú v nízkych šírkach bloky (v určitej, nie príliš vysokej miere), z dôvodu nižších dlhodobých normálov k anomálii sa vzťahujúcich veličín.

## 3.2 Trvanie bloku

Algoritmus použitý v publikácii *Pinheiro a kol.*, 2019 je schopný z výpočtov vytiahnuť dôležité informácie pre popis klimatológie blokov, a tými sú – *trvanie bloku*, *precestovaná zonálna vzdialenosť*, *rýchlosť* a *veľkosť*. Na obr. 11 sú znázornené výsledky trvania bloku (v dňoch) pre všetky tri metódy ako pre južnú, tak pre severnú hemisféru pre dve skúmané sezóny metódou boxplotov. Výsledky sú ďalej rozdelené do 3 regiónov – Pacifik (NP/SP), Atlantik (NA, SA), Indický oceán v južnej hemisfére (SI) a kontinent v severnej hemisfére (NC). Spodná a horná hranica každého boxplotu prezentuje 25., resp. 75. percentil. Spodná hranica všetkých hodnôt je daná určeným prahom pre detekciu bloku, t.j. 5 dní.

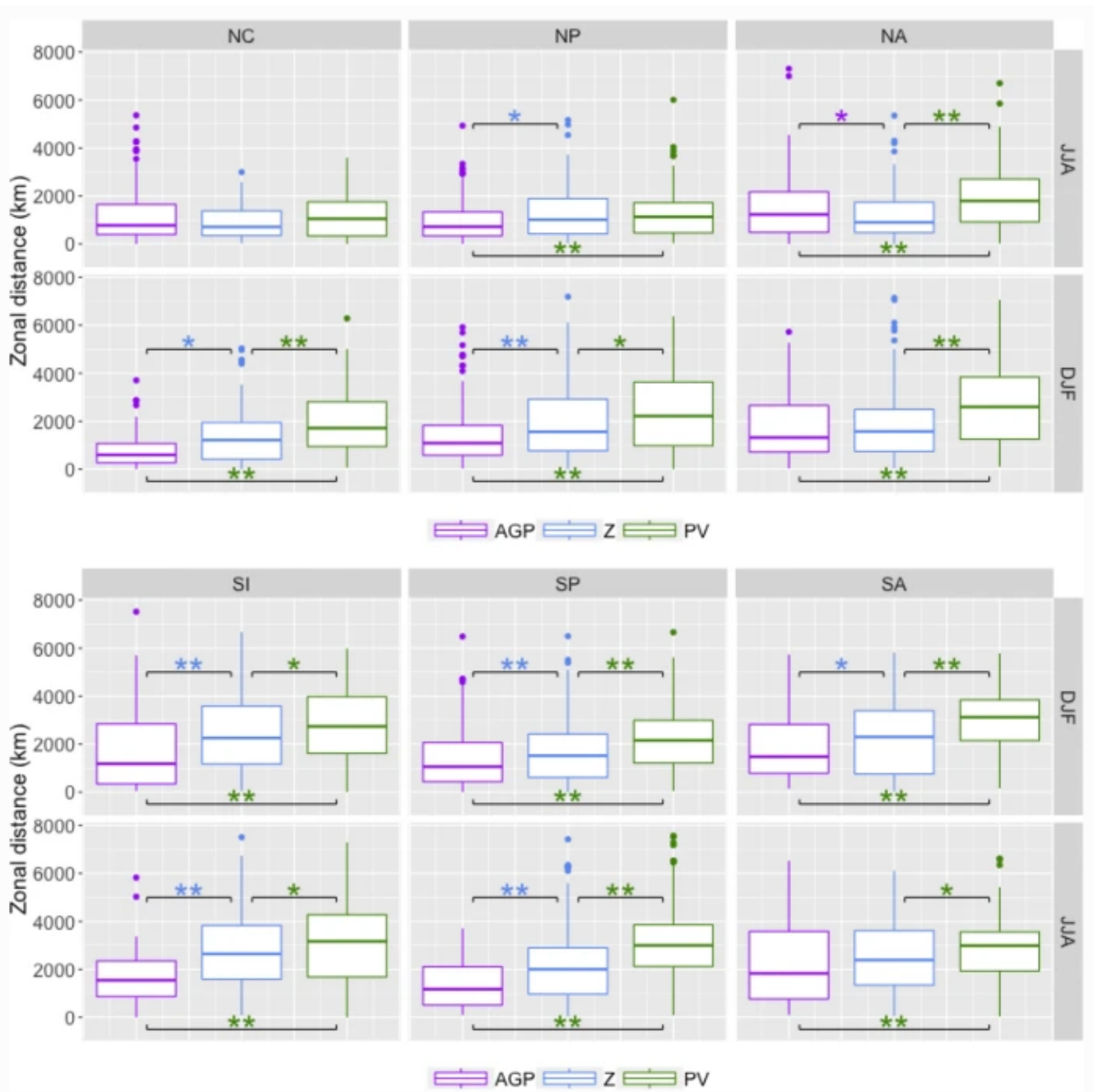


**Obr. 11:** Boxploty trvania blokov v dňoch pre severnú hemisféru (hore) a pre južnú hemisféru (dole) v dvoch sezónach – DJF a JJA.

Horná a spodná hranica boxplotu predstavujú 25. a 75. percentil, hranice predĺžených vertikálnych čiar predstavujú 1,5-násobok 25., resp. 75. percentilu. Bodky značia chybové výsledky. Zátvorky spájajú dve metódy so štatisticky významným rozdielom ich mediánov, \* značí nižšiu významnosť, \*\* značí vyššiu významnosť. Farba hviezdičky značí, ktorá metóda má vyššiu hodnotu mediánu. (Pinheiro a kol., 2019)

Z obr. 11 je vidno, že mediány sú zväčša v intervale 6-8 dní. Metóda Z\* všeobecne detekuje bloky s najdlhším trvaním, avšak v letnej hemisfére má nad Atlantikom prevahu metóda AGP, vďaka dlhotrvajúcim letným blokom v nižších zemepisných šírkach. Dôvodom, prečo metóda PV\* detekuje bloky s najkratším trvaním, je prah veľkosti bloku – PV\* detekuje hlavne bloky s menšou priestorou rozľahlosťou, a preto splňa prahovú veľkosť menej často.

### 3.3 Zonálna vzdialenosť (prejdená)

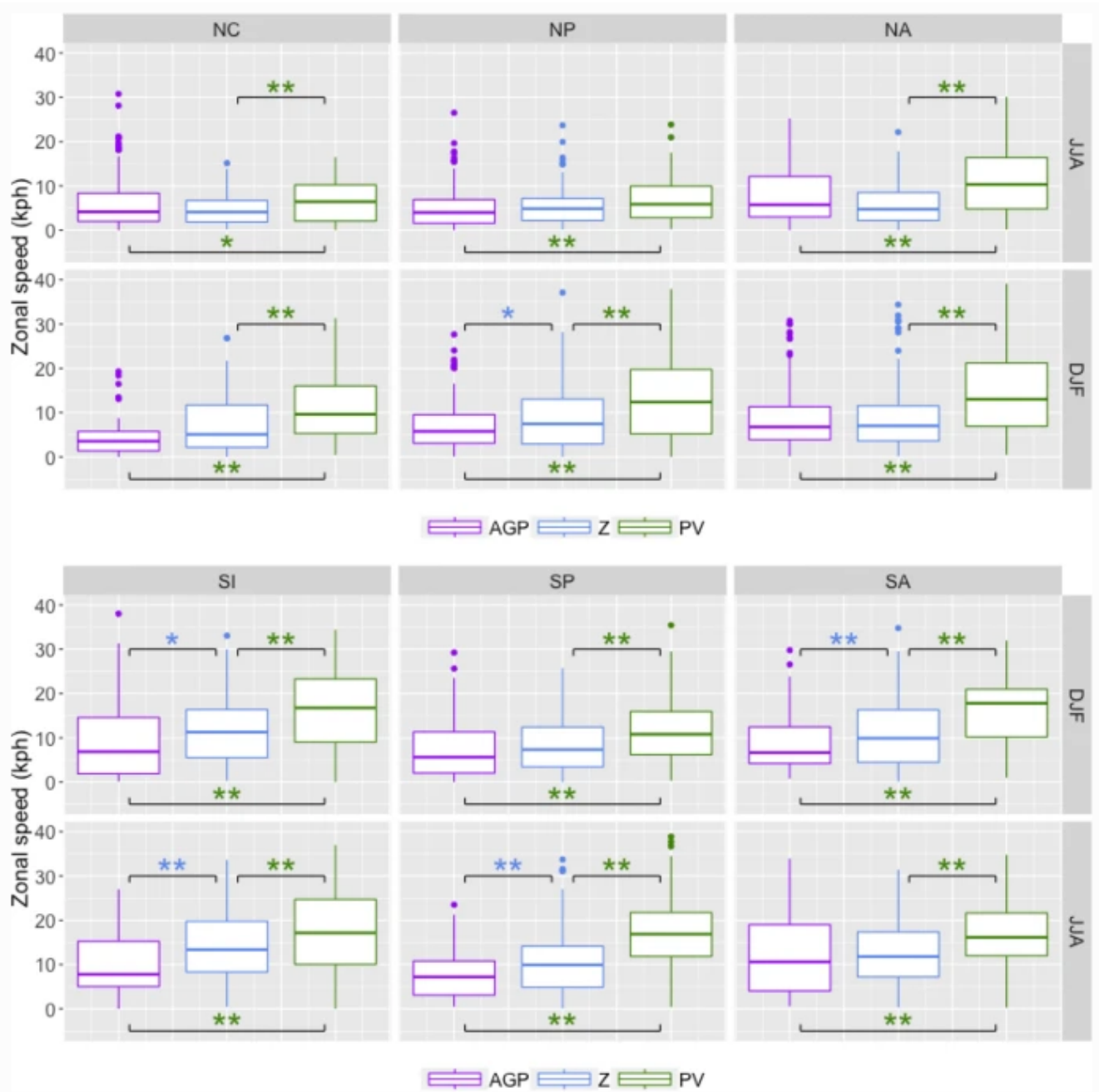


**Obr. 12:** Rovnako ako obr. 11, len pre zonálnu vzdialenosť blokov. (Pinheiro a kol., 2019)

Obr. 12 ukazuje, že bloky detekované metódou PV\* cestujú väčšinou v zonálnom smere dlhšie (hlavne v zime), než bloky detekované zvyšnými dvoma metódami (napriek tomu, že majú kratšie trvanie). Taktiež je zrejmé, že metóda AGP vykazuje väčšinou najnižšie hodnoty zonálnej vzdialenosti, avšak rozdiely voči ostatným metódam nie sú vždy významné. Významnou množinou blokov sú opäť bloky nízkych zemepisných širôk detekované metódou AGP. Pre ilustráciu, až 68% z AGP blokov, ktoré precestovali viac ako 2000 km, boli lokalizované v zemepisných šírkach menších ako 40°. Napríklad pre PV\* metódu to boli len 4% z týchto blokov a pri metóde Z\* to bolo 28% blokov tohoto charakteru (*Pinheiro a kol.*, 2019). Taktiež platí, že medzikvartilové rozpätie zonálnych vzdialeností je väčšie v južnej hemisfére, a všeobecne je toto rozpätie väčšie v zime ako v lete.

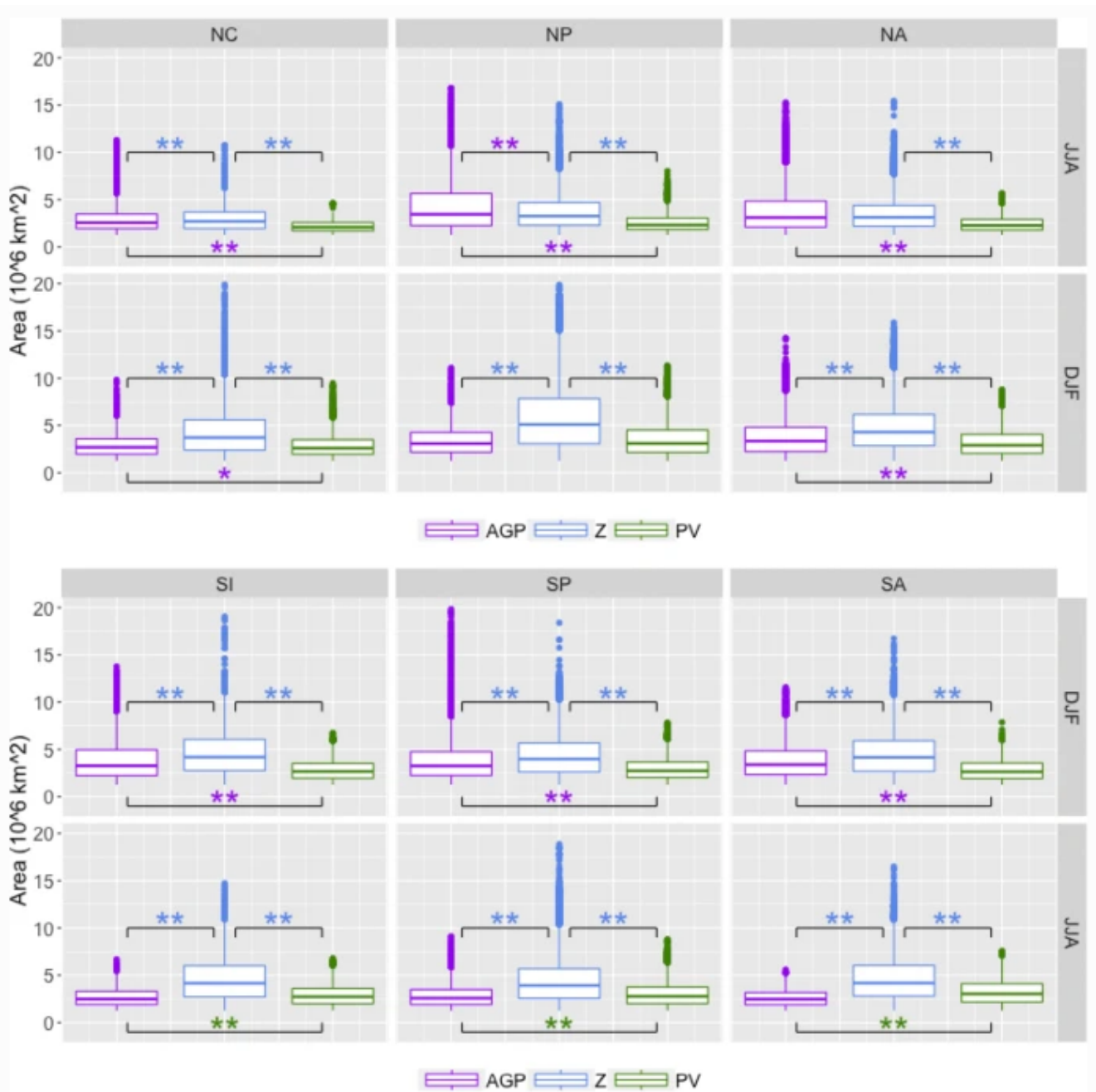
### 3.4 Zonálna rýchlosť

Obr. 13 ukazuje výsledky analogické k výsledkom z predošlej podkapitoly. Metóda PV\* vykazuje najväčšie zonálne rýchlosti, čo korešponduje s najväčšou precestovanou zonálnou vzdialenosťou bloku detekovaného touto metódou. Táto metóda taktiež vykazuje fakt, že bloky sa pohybujú o málo rýchlejšie v južnej hemisfére. V štúdiu *Sinclair*, 1996, v ktorej boli pozorované anticyklóny v južnej hemisfére, bol zavedený pomerne univerzálny a reprezentatívny prah rýchlosti anticyklóny ako 25 km/h (3000 km/5 dní). Túto hranicu v našom prípade najčastejšie prekročila metóda PV\*, pričom 75. percentil je celkom pravidelne o takmer 50% vyšší ako u zvyšných dvoch metód. Keď porovnáme metódy AGP a Z\*, zdá sa, že metóda Z\* pomerne pravidelne vykazuje vyššie hodnoty zonálnych rýchlostí v južnej hemisfére, avšak v severnej hemisfére to nie je tak úplne zrejmé. Komplikáciu v tomto zmysle opäť spôsobujú bloky v nižších šírkach severnej hemisféry v lete, kedy metóda AGP detekuje množstvo blokov s veľkou precestovanou zonálnou vzdialenosťou.



**Obr. 13:** Rovnako ako obr. 11, len pre zonálnu rýchlosť blokov. (Pinheiro a kol., 2019)

### 3.5 Veľkosť bloku



*Obr. 14: Rovnako ako obr. 11, len pre plošnú rozlohu blokov. (Pinheiro a kol., 2019)*

Charakteristika veľkosti blokov vykazuje jednoznačne najväčšie rozdiely medzi všetkými možnými kombináciami metód, sezón, či regiónov. Je zrejmé, že metódy AGP a  $Z^*$  zvyknú mať vyššie hodnoty 75. percentilu a podstatne viac chybových údajov, ktoré sa blížia až k  $20 \times 10^6 \text{ km}^2$ . To je naozaj príliš vysoké číslo, keďže napríklad *Croci-Maspoli a kol.*, 2007, prezentujú výsledky, v ktorom boli rozmery blokov v severnej hemisfére v intervale  $0,5 - 4 \times 10^6 \text{ km}^2$ . Veľkosť blokovaného regiónu je veľmi dôležitá charakteristika, pretože práve ona určuje, či je alebo nie je daný detekovaný región vylúčený na základe prahového minima. Snáď jediný zrejmý záver z obr. 14 je, že bloky detekované metódou  $PV^*$  sú väčšinou menšie, ako bloky detekované metódou  $Z^*$ , čo súhlasí so záverom podkapitoly 3.1.2 o trvaní bloku – ak je blok detekovaný aj metódou  $PV^*$  aj  $Z^*$ , väčší  $Z^*$ -blok sa často objaví skôr a trvá dlhšie ako  $PV^*$ -blok.

## 4. Dáta a metodika

### 4.1 Meteorologické reanalýzy ECMWF

K popisu charakteristík blokovania v Európe boli použité reanalýzy ERA5 (*The European Earth Observation Programme Copernicus*, online), ktoré boli vytvorené Európskym centrom pre strednodobú predpoveď počasia (ECMWF). ERA5 je piata generácia reanalýz ECMWF, ktorá nahrádza predošlú ERA-Interim reanalýzu. Dáta su dostupné od roku 1950, pričom sú rozdelené do dvoch častí – 1950-1978 (preliminárna verzia) a 1979-2020. Kvalita preliminárnej verzie ERA5 by mala byť v nami analyzovanom priestore (Európa) dostatočná a uspokojujúca, nakoľko hlavnou črtou nepresností tejto verzie sú tropické cyklóny, ktoré sú niekedy nerealisticky intenzívne (*Copernicus*, online). Tropické cyklóny sa v priestore kontinentálnej Európy nevyskytujú, a preto je bezpečné obe časti reanalýzy ERA5 zlúčiť do jednej kvázihomogénnej časovej rady vybraných meteorologických prvkov.

Reanalýza všeobecne kombinuje modelové dáta s pozorovaniami na celom svete. Ako finálny produkt predstavuje globálne kompletnú a konzistentnú dátovú sadu, ktorá rešpektuje zákony fyziky. Využíva sa systém asimilácie dát, ktorý je založený na metódach používaných numerickými predpovednými centrami (NWPC) – každých 12 hodín (v prípade ECMWF) sa predošlá predpoveď počasia kombinuje s najnovšími dostupnými pozorovaniami. Produktom je nový odhad stavu atmosféry, tzv. analýza, z ktorej sa následne vytvára nová, vylepšená predpoveď počasia (*Copernicus*, online). Reanalýza funguje rovnako, avšak pre možnosť rozšírenia dátových sád celé dekády do minulosti, pracuje na nižšom rozlíšení. Reanalýza má, na rozdiel od numerickej predpovedi počasia, dostatočný časový priestor pre zber dát, čím sa jej kvalita zvyšuje.

## 4.2 Vybrané metódy, popis spracovania

### 4.2.1 Použité metódy, dlhodobý priemer

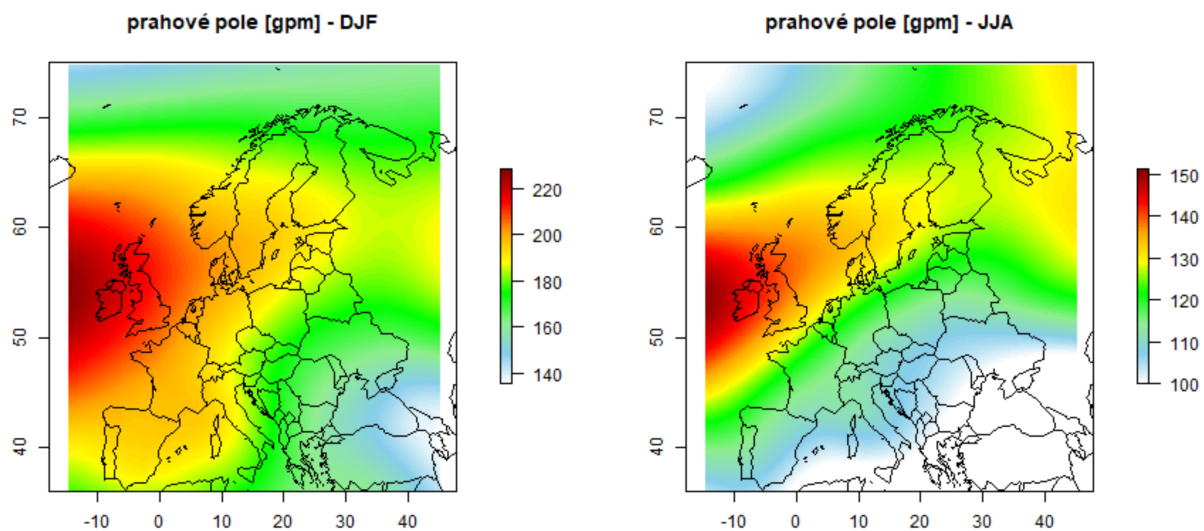
Ťažiskom spracovania dát je popis a vývoj charakteristík blokovania v rámci najvýraznejšej klimatickej zmeny započanej ľudskou činnosťou v priestore Európy za použitia vybraných objektívnych metód detekcie blokovania. Použité metódy sú  $Z^*$  a  $PV^*$ , anomálne založené metódy detekcie (viď kap. 2). Sledované sú predovšetkým dve hlavné veličiny spojené s blokovaním – frekvencia blokovania a dĺžka blokovania. Pri analýze týchto základných charakteristík sa obmedzíme na dve ročné sezóny – DJF (zima) a JJA (leto). Sezónna frekvencia blokovania predstavuje pomer počtu blokovaných dní v sezóne ku celkovému počtu dní, čo je v prípade sezóny DJF 90-91 dní (v závislosti na tom, či je daný rok priestupný) a v prípade sezóny JJA 92 dní. Napríklad frekvencia 0,1 (10%) reprezentuje zhruba 9 blokovaných dní v sezóne.

Z reanalýz ERA5 sú teda použité datasety potenciálnej vorticity na izobarických hladinách 150-500 hPa (s krokom 50 hPa) a geopotenciálu na izobarickej hladine 500 hPa. Vybrané boli 4 denné termíny – 0, 6, 12 a 18 hod. UTC, z ktorých boli následne rátané denné priemery príslušných veličín. Denné anomálie boli v prípade  $Z^*$  počítané voči dlhodobému sezónnemu priemeru (ďalej LTSM – „long-term seasonal mean“), zatiaľčo v prípade metódy  $PV^*$  boli anomálie počítané voči dlhodobému mesačnému priemeru (ďalej LTMM – „long-term monthly mean“). Pozorované obdobie predstavuje interval rokov 1950-2019 a dlhodobý priemer bol počítaný za celé toto obdobie, teda použitý bol 70-ročný dlhodobý priemer príslušných veličín. Takto robustný priemer vyhladí krátkodobé oscilácie a odpovedajúce denné anomálie tak budú dostatočne reprezentatívne. Vzhľadom na to, že dataset začína januárom 1950, prvá sezóna DJF bude zima 50/51, čo znamená, že zimných sezón bude celkovo 69 (končiac zimou 18/19). Letných sezón bude 70.

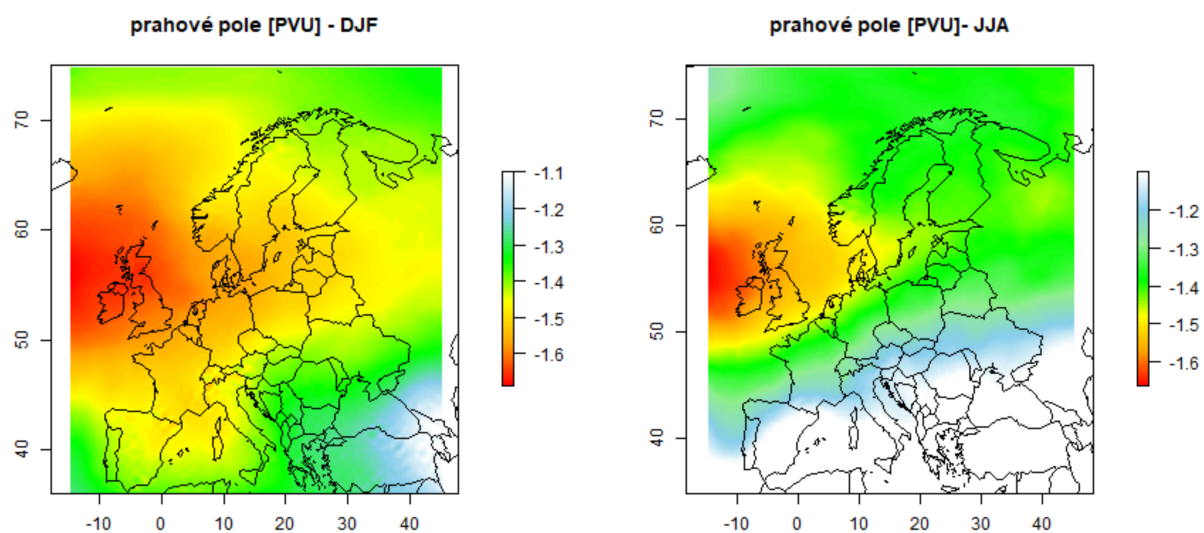
## 4.2.2 Prahové hodnoty

Hoci sú použité metódy oficiálne a objektívne, disponujú významnou voľnosťou v podobe prahových hodnôt. Základným medzivýsledkom, na ktorom metódy stavajú, je rada denných anomálii danej veličiny. To, ako veľká denná anomália danej veličiny musí byť v gridovom bode po určitú dobu (dni), výrazne modifikuje výsledky. *Dole a Gordon* (1983) vo svojej práci uviedli tri prirodzené kombinácie časových a anomálnych prahových hodnôt pre metódu  $Z^*$  - +150 m po dobu aspoň 5 dní, +100 m po dobu aspoň 10 dní a +50 m po dobu aspoň 15 dní. *Pinheiro a kol.* (2019) prichádza s iným, modernejším prístupom, ktorý je popísaný v podkapitole 2.4. Každý z týchto štyroch prístupov možno na dáta aplikovať, pričom každý z nich detekuje blokovanie mierne iného charakteru.

Práve štandardná odchýlka denných anomálii, ktorá je použitá na výpočet priestorovo premenlivého prahového poľa podľa *Pinheiro a kol.*, je účinným nástrojom k určeniu toho, ktoré z troch predošlých kombinácii prahových hodnôt podľa *Dole a Gordon* sú pre danú sezónu (zima/leto) viac či menej relevantné.



*Obr. 15: prahové polia pre metódu  $Z^*$ , DJF – vľavo, JJA – vpravo. Počítané zo vzťahu (4), podkapitola 2.4. Uvedené v jednotkách gpm.*



*Obr. 16: prahové polia pre metódu  $PV^*$ , DJF – vľavo, JJA – vpravo. Počítané zo vzťahu (4), podkapitola 2.4. Uvedené v jednotkách PVU.*

Z obr. 15 je vidno, že štandardné odchýlky denných anomálii geopotenciálnej výšky izobarickej hladiny 500 hPa (ďalej Z500) sú podstatne vyššie v zimnej sezóne. Konkrétne, v zime predstavujú interval 100-150 gpm, zatiaľčo v lete len 50-100 gpm. Na základe toho možno predpokladať, že kombinácia +150 m, 5 dní nebude v letnom období príliš relevantná, nakoľko takto vysoké anomálie sú v lete v priestore Európy zriedkavé a ich výskyt po dobu aspoň 5 dní je relatívne vzácny, čo bude názorne vidno v kapitole 5 – výsledky. Ďalej napríklad 50-metrové kritérium po dobu aspoň 15 dní je pre sezónu JJA pomerne vhodné – v tomto prípade pôjde o detekciu hoci miernych (čo sa týka intenzity), avšak veľmi perzistentných blokujúcich udalostí. Pre sezónu DJF už toto kritérium nie je ideálne, nakoľko vzhľadom k vysokým štandardným odchýlkam anomálii je 50-metrový prah (hoci po dobu 15 dní) príliš nízky.

V prípade metódy PV\* veľa možností k dispozícii nemáme, nakoľko oficiálne zavedená prahová hodnota anomálii je -1,2 PVU (*Schwierz a kol., 2004*). Z obr. 16 je zrejmé, že v prípade potenciálnej vorticity veľké medzisezónne rozdiely v štandardných odchýlkach denných anomálii možno pozorovať len lokálne. Najväčší rozdiel je v Stredomorí a v JZ Európe, kde v lete výrazne prevláda anticyklonálne počasie s menšími osciláciami, ako je tomu v zimnej sezóne.

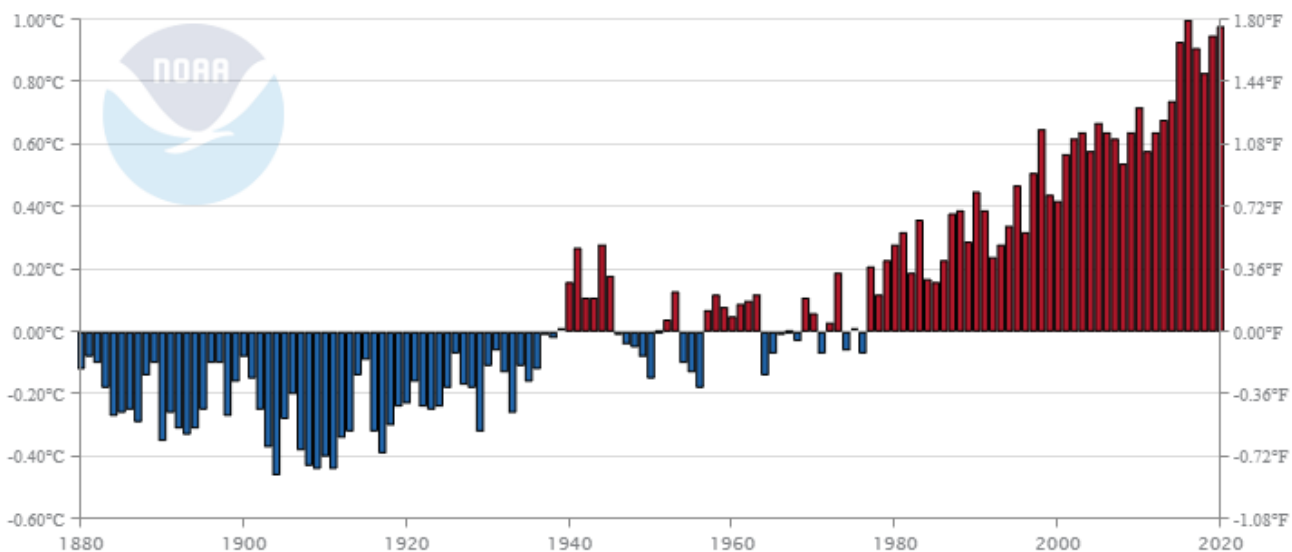
Keďže v metóde Z\* je viac možností, bude vo výsledkoch analyzovaná podstatne detailnejšie, ako metóda PV\*, ktorá bude mať skôr doplnkový charakter. Spôsob spracovania dát bude mimo iné tiež poukazovať na rozdiely medzi použitými prahovými hodnotami.

### 4.2.3 Vplyv klimatickej zmeny na blokovanie

Dominantnou časťou výsledkov práce bude porovnanie blokujúcich charakteristík obdobia pred výrazným nárastom globálnej teploty s obdobím, v ktorom sa klimatická zmena začína prejavovať naplno. Pri porovnávaní dvoch období je ideálne, aby dané štatistické súbory boli podobne rozsiahle. Časový rozsah použitej reanalýzy ERA5 je v tomto ohľade relatívne priaznivý, nakoľko v jeho strede leží rok 1984/85. Z trendu

ročných globálnych anomálií povrchovej teploty, ktorý je zobrazený na obr.17, je vidno, že rozdelenie na obdobia 1950-1984 a 1985-2019 (dve 35-ročné obdobia) je prijateľné, nakoľko najväčší nárast globálnej teploty započal práve v 80-tych rokoch. Evidentný nárast teploty sa síce začal prejavovať už v roku 1980, ale to by porovnávané obdobia boli výrazne odlišne dlhé (30 a 40 rokov). Z obr.12 je tiež vidno, že väčšina obdobia 50-84 disponovala pomerne vyrovnanými globálnymi teplotnými pomermi s ročnými anomáliami medzi  $-0,2^{\circ}\text{C}$  -  $+0,2^{\circ}\text{C}$ . Naopak obdobie 85-19 sa prirodzene vyznačuje prudkým nárastom globálnej teploty.

Global Land and Ocean  
January–December Temperature Anomalies



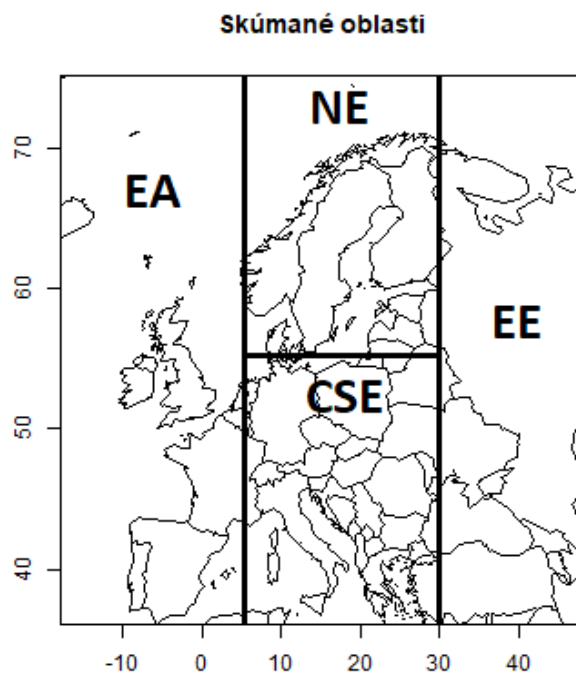
**Obr. 17:** Ročné anomálie globálnej povrchovej teploty vzduchu voči normálu 1951-1980 (NOAA, online).

#### 4.2.4 Dĺžka blokovania, rozdelenie domény

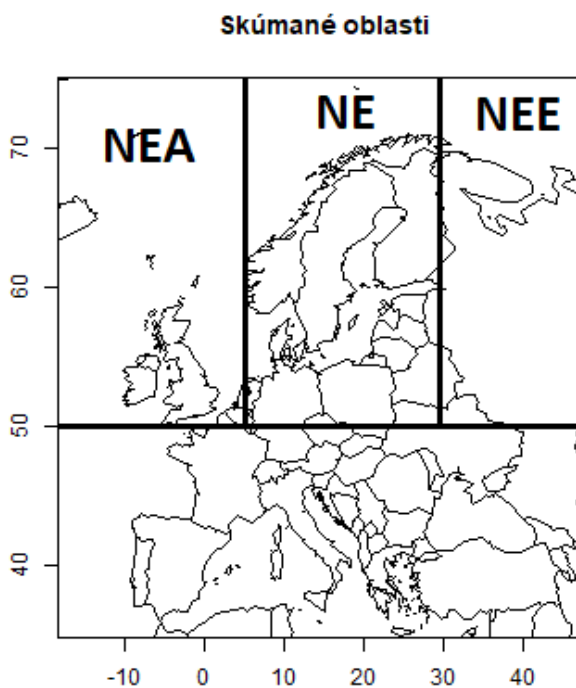
Pri skúmaní dĺžky blokovania budeme sledovať trendy v jednotlivých sektoroch. Rozloženie sektorov bude odlišné pre dve použité metódy. V prípade metódy Z\* je rozdelenie hlavnej domény zobrazené na obr. 18, pre metódu PV\* na obr. 19. Vymedzenie regiónov je pre použité metódy odlišné kvôli tomu, že metóda PV\* detekuje veľmi málo blokovaných udalostí južnejšie od 50° s.š.. Preto štatistika v tomto priestore nemá význam, nakoľko sa jedná o veľmi zriedkavé udalosti a štatistický súbor je príliš malý. Naopak metóda Z\* detekuje blokovanie prakticky v celom sledovanom priestore Európy. Názvy jednotlivých regiónov predstavujú skratky: EA – východný Atlantik (eastern Atlantic ocean), NE – severná Európa (northern Europe), EE – východná Európa (eastern Europe), CSE – stredná Európa a Stredomorie (central and southern Europe). V prípade metódy PV\* sa EA a EE modifikujú na NEA a NEE – severovýchodný Atlantik a severovýchodná Európa, pričom NE je rozšírená o 5° šírky južnejšie (po 50° s.š.). Časové prahové hodnoty pre detekciu blokovania (5, 10 či 15 dní) budú prirodzene predstavovať dolnú medzu dĺžky blokovania.

#### 4.2.5 Použitý software

Analýza dát bola kompletne prevedená v programe R, verzia 4.0.3., rovnako tak aj všetky mapové a grafické výstupy (R Project, *online*).



*Obr. 18: Rozdelenie domény v rámci analýzy dĺžky blokovania – metóda Z\*.*

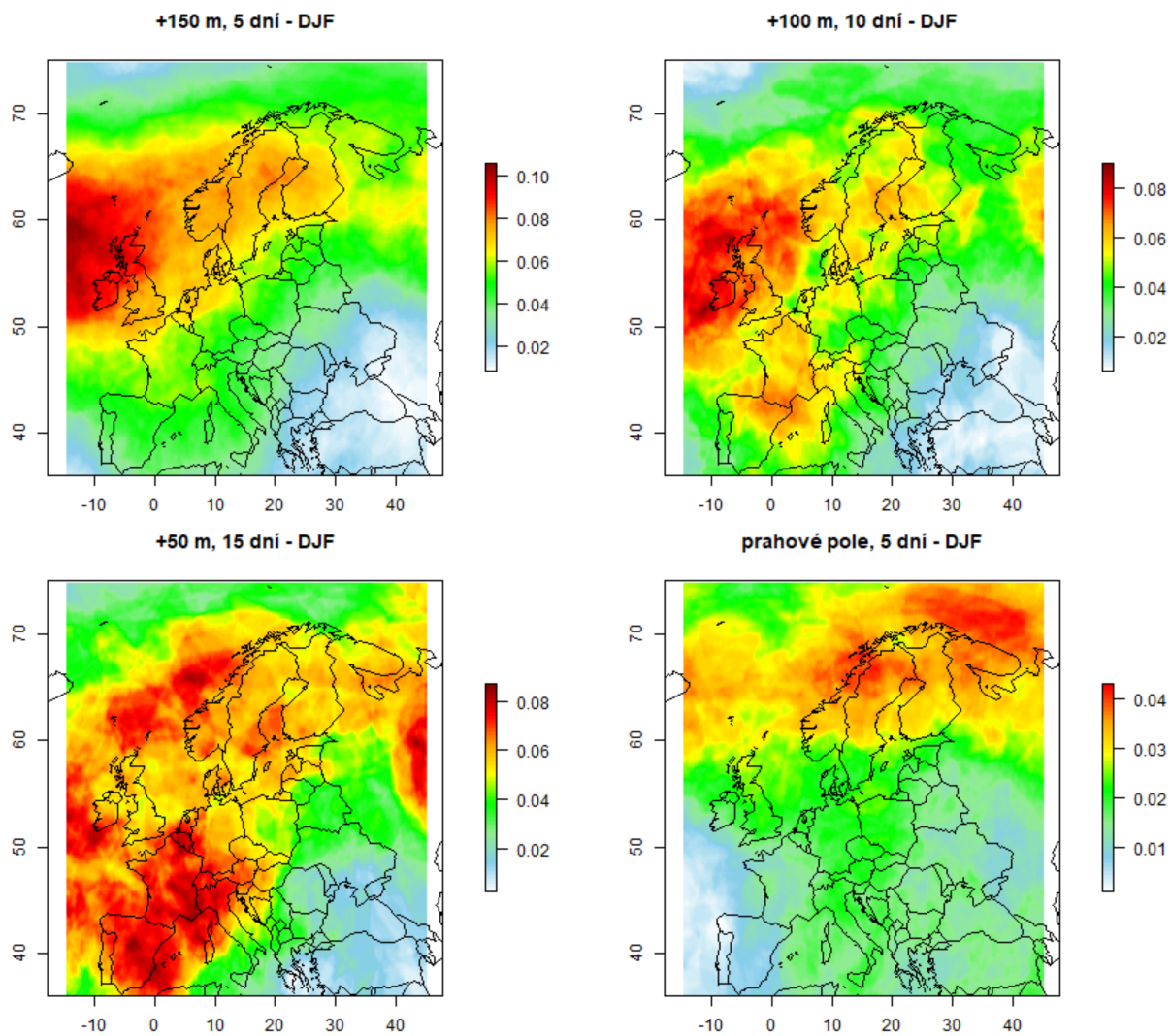


*Obr. 19: Rozdelenie domény v rámci analýzy dĺžky blokovania – metóda PV\*.*

## 5. Výsledky

### 5.1 Metóda $Z^*$

#### 5.1.1 Frekvencia blokovania

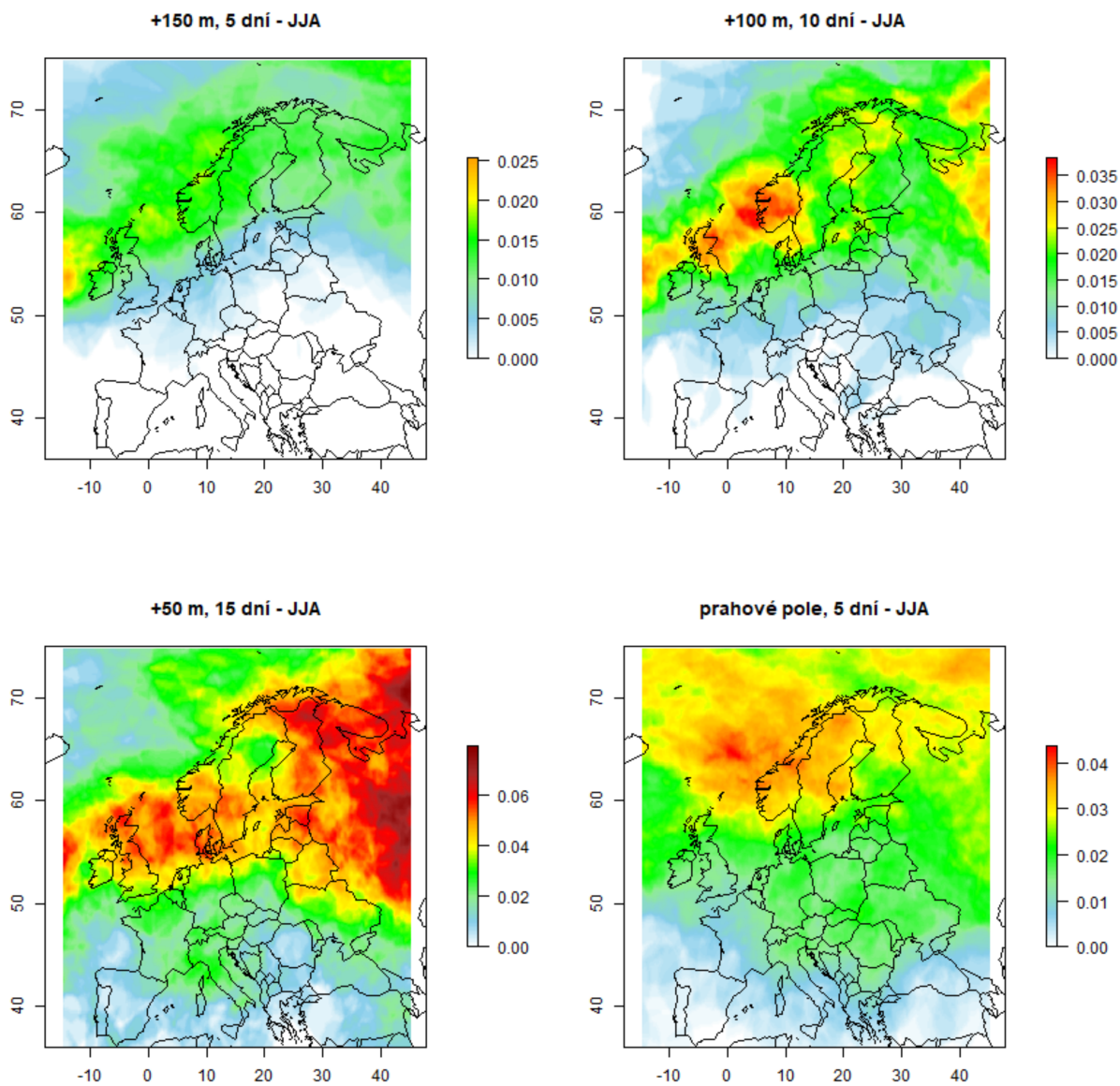


*Obr. 20: Dlhodobá priemerná sezónna frekvencia blokovania za použitia rozličných kombinácií prahových hodnôt, sezóna DJF.*

Na obr. 20 možno pozorovať geografickú distribúciu blokovania v závislosti na použití prahových hodnôt pre sezónu DJF. Je zrejmé, že výsledky sú veľmi podobné za použitia prahov +150 m (po dobu aspoň 5 dní) a +100 m (po dobu aspoň 10 dní) – oba prístupy detekujú výrazné maximum dlhodobej priemernej sezónnej frekvencie blokovania (ďalej LTSBF – „long-term seasonal blocking frequency“) v oblasti SV Atlantiku a v okolí Britských ostrovov. Jediný významnejší rozdiel možno pozorovať nad Francúzskom a Španielskom, kde je blokovanie detekované častejšie v rámci prahu +100 m. Ďalej je vidno, že použitie prahu +50 m (po dobu aspoň 15 dní) výrazne modifikuje výsledky, hlavné maximum frekvencie blokovania sa presunulo do JZ/Z Európy. Ako však bolo spomenuté v predošlej kapitole, táto prahová hodnota v rámci zimnej sezóny príliš reprezentatívna nie je. Najvýraznejším spôsobom sa ale od ostatných líši použitie priestorovo premenlivého prahového poľa. Kvôli veľmi vysokým štandardným odchýlkam denných anomálii Z500 v západnej Európe a nad východným Atlantikom tu metóda detekuje významne nižšie hodnoty frekvencie blokovania ako za použitia konštantných prahov. Maximum sa rozprestiera pomerne rovnomerne nad severnou Európou v oblasti Škandinávie. Z hodnôt LTSBF je tiež zrejmé, že metóda použitím prahového poľa detekuje v maxime výrazne nižšie frekvencie, len okolo 4-4,5% (4 dni). Zvyšné prahové kombinácie vykazujú detekované frekvencie v maximách v intervale zhruba 7-11%, čo predstavuje v priemere 6-10 dní za sezónu.

Predpoklad o prahových hodnotách z predošlej kapitoly sa potvrdzuje na obr. 21. Prah +150 m je pre letnú sezónu vplyvom nižších štandardných odchýlok príliš vysoký a metóda následne detekuje veľmi málo blokujúcich udalostí v rámci celého kontinentu. Akési maximum možno pozorovať východne od Britských ostrovov, avšak aj tam sú hodnoty LTSBF len okolo 0,02, čo predstavuje len 2 dni. Pri znižovaní prahu postupne rastie LTSBF predovšetkým v oblasti SZ/S Európy a pri najnižšom prahu +50 m vykazuje maximálne hodnoty oblasť kontinentálneho Ruska. To znamená, že oblasť východnej Európy je v letnom období náchylná na síce mierne, ale perzistentné epizódy blokovania, čo sa potvrdilo napríklad v lete 2010. Použitie premenlivého prahového poľa opäť odsúva maximá LTSBF nad Škandináviu, podobne ako tomu bolo v prípade

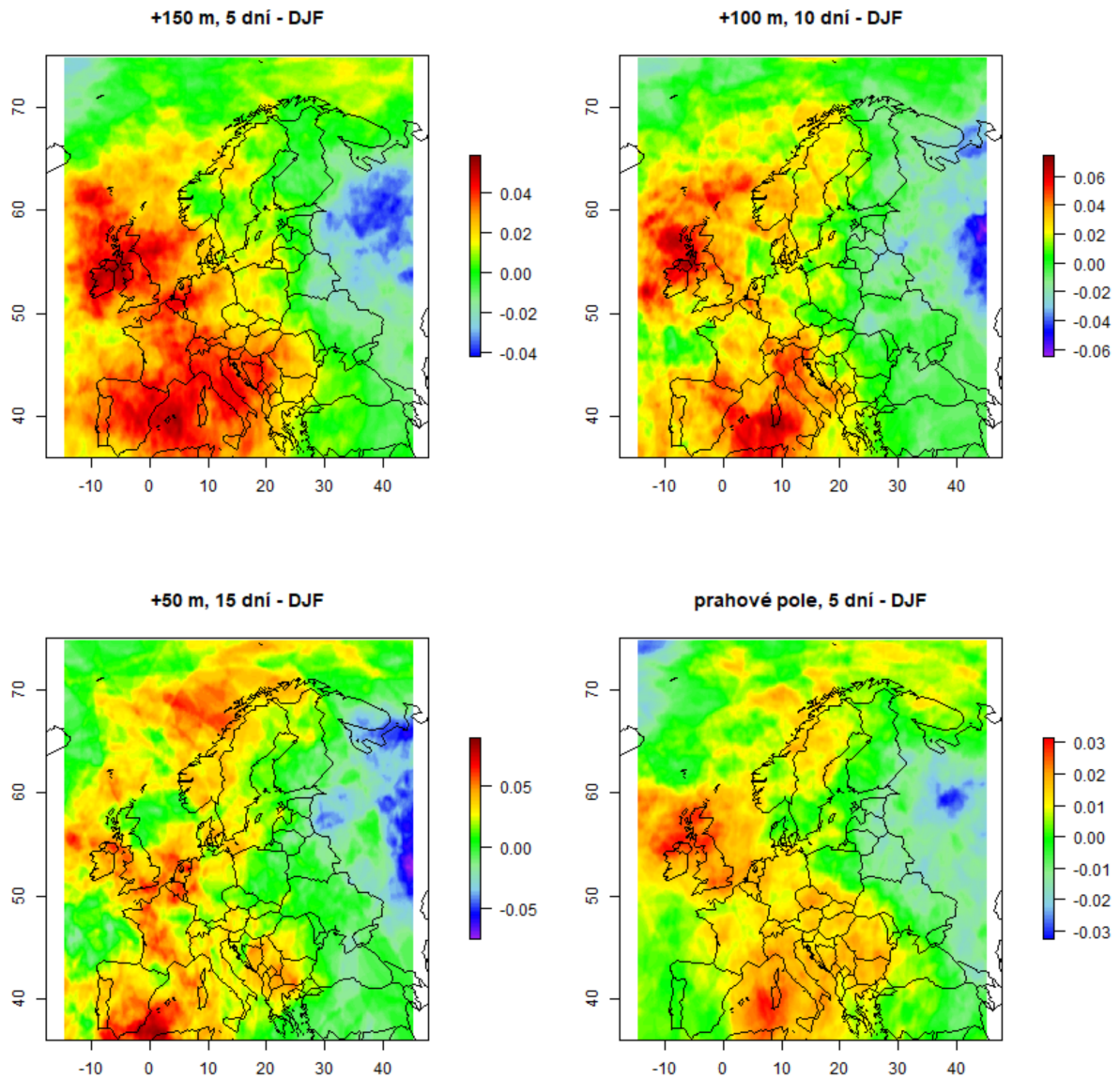
zimnej sezóny. V tomto prípade sú ale hodnoty LTSBF porovnateľné s prahom +100 m a len o málo nižšie v porovnaní s prahom +50 m.



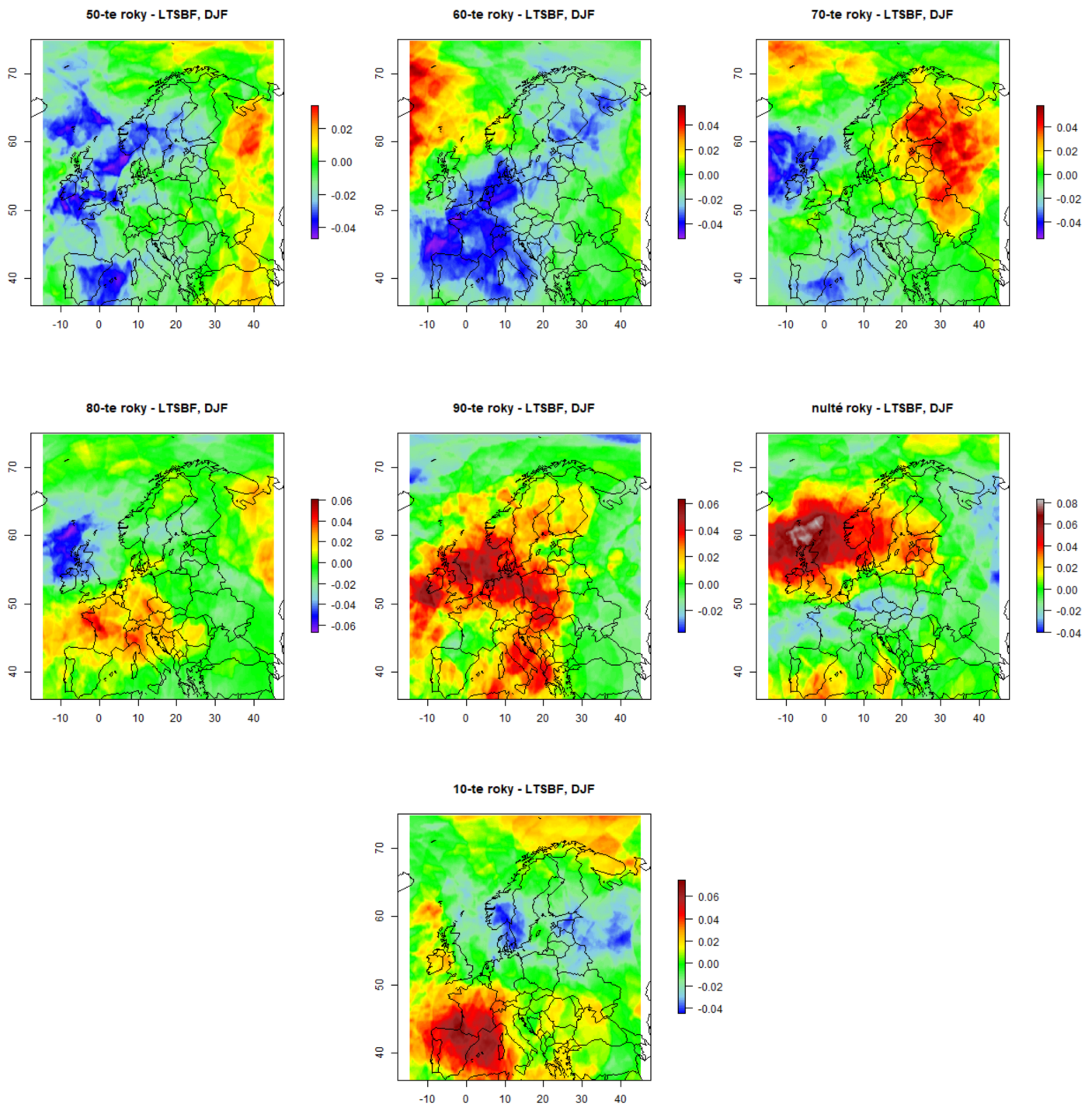
**Obr. 21:** Dlhodobá priemerná sezónna frekvencia blokovania za použitia rozličných kombinácií prahových hodnôt, sezóna JJA.

V rámci celkového porovnania sezón JJA a DJF možno na základe obrázkov 20 a 21 povedať, že blokovanie v priestore Európy je všeobecne výrazne častejšie v zimnom období, kde sa veľmi často vyskytuje v priestore západnej Európy, čo korešponduje so všeobecnými predpokladmi. Naopak hlavnou črtou letného blokovania je prakticky jeho úplná absencia v JZ časti kontinentu. Použitie premenlivého prahového poľa tieto medzisezónne rozdiely vymazáva a aj priestorové rozloženie, aj hodnoty LTSBF sú veľmi podobné.

Na obr. 22 je znázornený rozdiel LTSBF období 85-19 a 51-84 pre sezónu DJF, ktorý slúži ako názorný prostriedok na pozorovanie možnej korelácie medzi globálnym vzostupom teploty v rámci zosilňujúcej klimatickej zmeny a výskytom atmosférického blokovania v priestore Európy. Je zrejmé, že v rámci tohto rozdielu sa všetky prístupy značne zhodujú. Pozorovaný je jasný nárast frekvencie vo veľkej časti západnej Európy, kde sú hodnoty rozdielu na veľkej ploche v intervale 0,02 – 0,05, čo znamená nárast LTSBF v priemere až o 2-5 dní za sezónu. Vzhľadom na plošný rozsah týchto hodnôt možno tento nárast považovať za výrazný. Ďalej je z obr. 22 vidno, že jediná oblasť, kde LTSBF v zime v rámci klimatickej zmeny klesá, je región kontinentálneho Ruska. Opäť možno pozorovať zhodu v rámci všetkých prahových hodnôt, záporné hodnoty tu dosahujú -0,02 - -0,05 (2-5 dní), čo opäť reprezentuje pomerne výrazný pokles. Zaujímavosťou je, že zatiaľčo sa LTSBF za použitia premenlivého prahového poľa na obr. 20 príliš nezhodovala s ostatnými prahovými hodnotami, tak v rámci rozdielu sledovaných období došlo k zrejmej zhode. Aj to indikuje, že pozorovaný trend LTSBF je významný a je prakticky nezávislý na tom, aký prístup v rámci metódy  $Z^*$  použijeme.

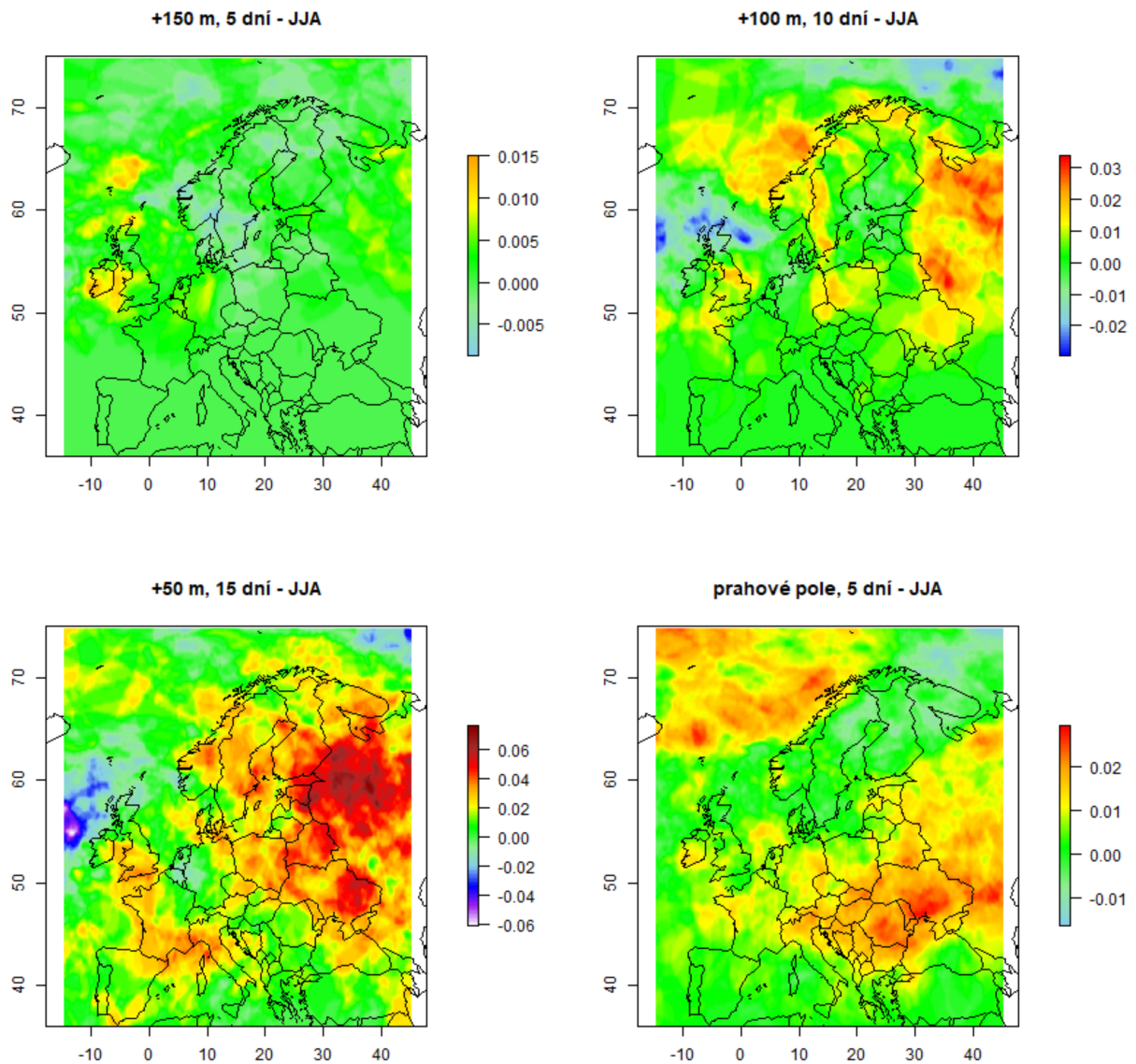


*Obr. 22: Rozdiel LTSBF období 85-19 a 51-84 za použitia rozličných kombinácií prahových hodnôt, sezóna DJF.*



**Obr. 23:** Dekadálne odchýlky frekvencie blokovania od LTSBF, od dekády 51-59 (vľavo hore) po dekádu 10-19 (dolu). Použitý prah: +150 m, sezóna: DJF.

Na obr. 23 vidíme, že rozsah a magnitúda kladných dekadálnych odchýliek od LTSBF sa začína zvyšovať v 80-tych rokoch, predovšetkým v západnej časti Európy. Naopak Rusko predstavuje jediná súvislú oblasť kladných odchýliek v skorších dekádach, veľmi výrazné sú tu odchýlky predovšetkým v dekáde 1970-1979, kedy tu bolo blokovanie relatívne najčastejšie.

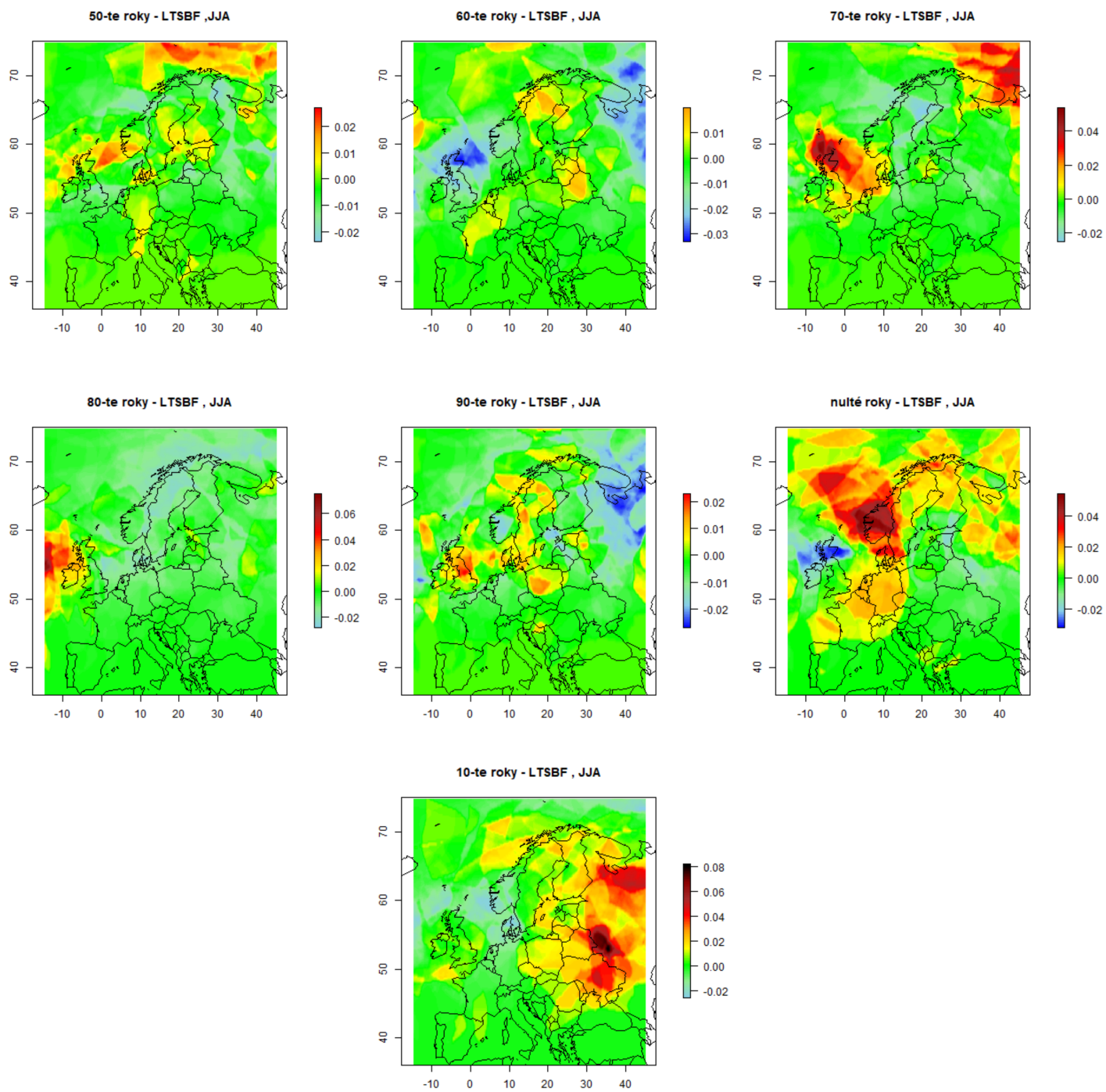


**Obr. 24:** Rozdiel LTSBF období 85-19 a 51-84 za použitia rozličných kombinácií prahových hodnôt, sezóna JJA.

Z obr. 23 je tiež zrejmé, že dekáda je pomerne krátky čas a je možné pozorovať hodnoty anomálne voči celkovému trendu. Príkladom je stredná a časť západnej Európy v dekáde 00-09 a tiež južná Škandinávia v dekáde 10-19.

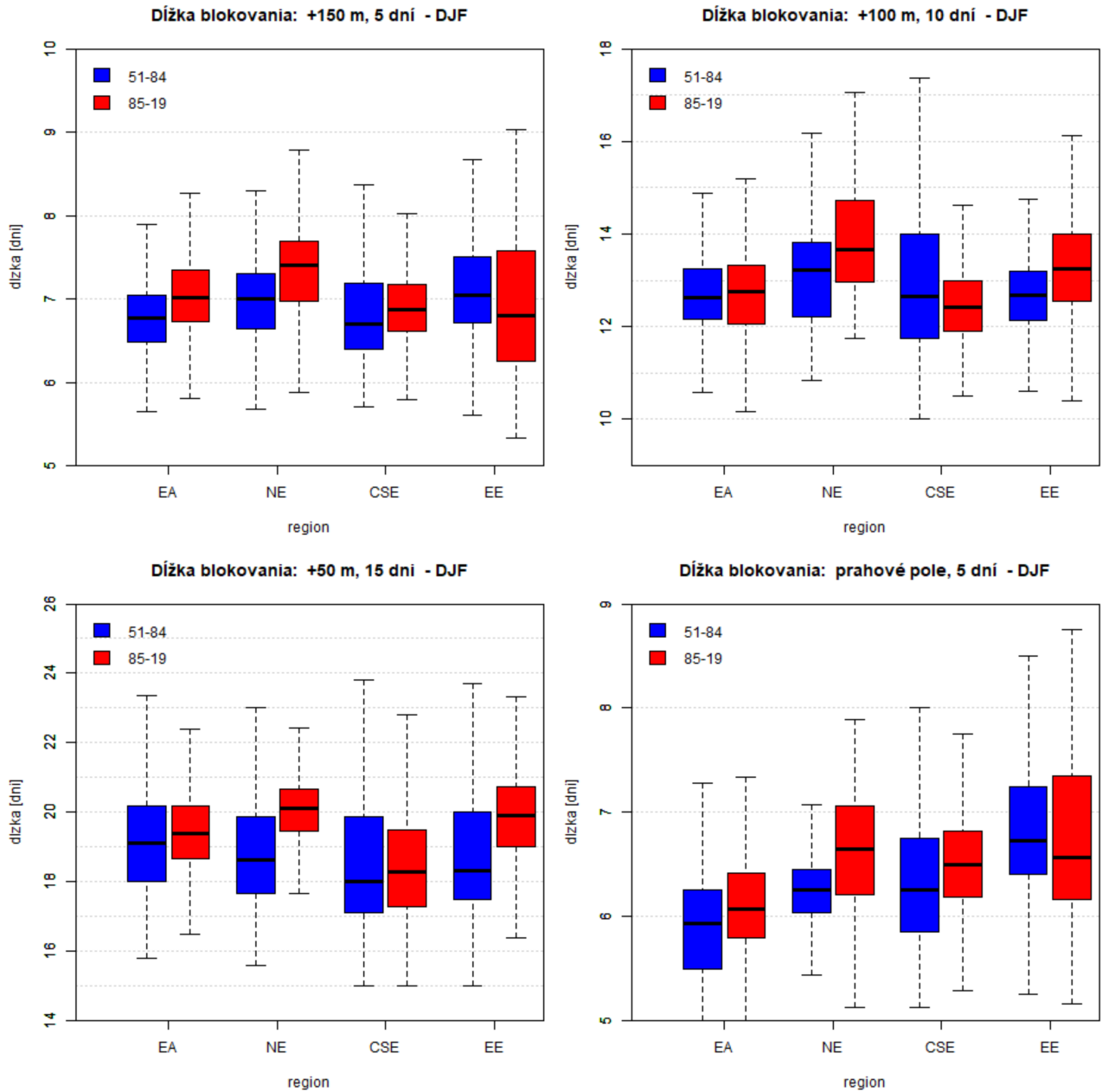
Z porovnania období 85-19 a 50-84 pre letnú sezónu (obr. 24) je tiež, podobne ako v prípade sezóny DJF, zrejmy nárast frekvencie blokovania vo veľkej časti Európy. Tentokrát ide ale o východnú časť, kde maximá možno nájsť v oblasti kontinentálneho Ruska a Ukrajiny. Prahová hodnota +150 m pochopiteľne nevykazuje významné hodnoty rozdielu, nakoľko sama detekuje blokovanie zriedkavo. Zvyšné prístupy sa opäť zhodujú, pričom sekundárne maximum nárastu frekvencie možno sledovať severne od Britských ostrovov, prípadne v oblasti Nórska. Hodnoty rozdielu však nie sú tak veľké, ako v prípade zimnej sezóny – nárast frekvencie o 0,01 – 0,03 (1-3 dni) nepredstavuje výrazný trend. Jediné významnejšie minimum naznačuje prah +50 m západne od Britských ostrovov, čo by znamenalo značný pokles miernych, ale perzistentných blokujúcich udalostí. K tejto lokálnej anomálii sa jemne prikláňa prah +100 m, ktorý v danej oblasti tiež vykazuje mierny pokles frekvencie.

Priebeh dekadálnych odchýlok frekvencie blokovania od LTSBF (obr. 25) ukazuje, že s výnimkou dekády 2010-2019 nedošlo v priebehu zvýrazňovania klimatickej zmeny k akémukoľvek dramatickému vývoju frekvencie v letnej sezóne. Použitý bol prah +100 m, aby boli obrázky 23 a 25 relevantne porovnateľné. Odchýlky v priebehu dekad majú skôr lokálny a málo výrazný charakter, hodnoty sú zväčša v intervale -0,02 – 0,02 (-2 až +2 dni). Jediné oblasti s výraznejšími a plošnejšími hodnotami sú oblasť Severného mora a Nórska v dekáde 2000-2009 a oblasť východnej Európy v dekáde 2010-2019. Ako bude zrejme v ďalšom pokračovaní, hlavnou zásluhou na výrazných kladných odchýlkach dekády 10-19 má letná sezóna 2010, kedy bola blokovaním ovplyvnená veľká časť Ruska po značnú časť sezóny.



**Obr. 25:** Dekadálne odchýlky frekvencie blokovania od LTSBF, od dekády 51-59 (vľavo hore) po dekádu 10-19 (dolu). Použitý prah: +100 m, sezóna: JJA.

## 5.1.2 Dĺžka blokovania

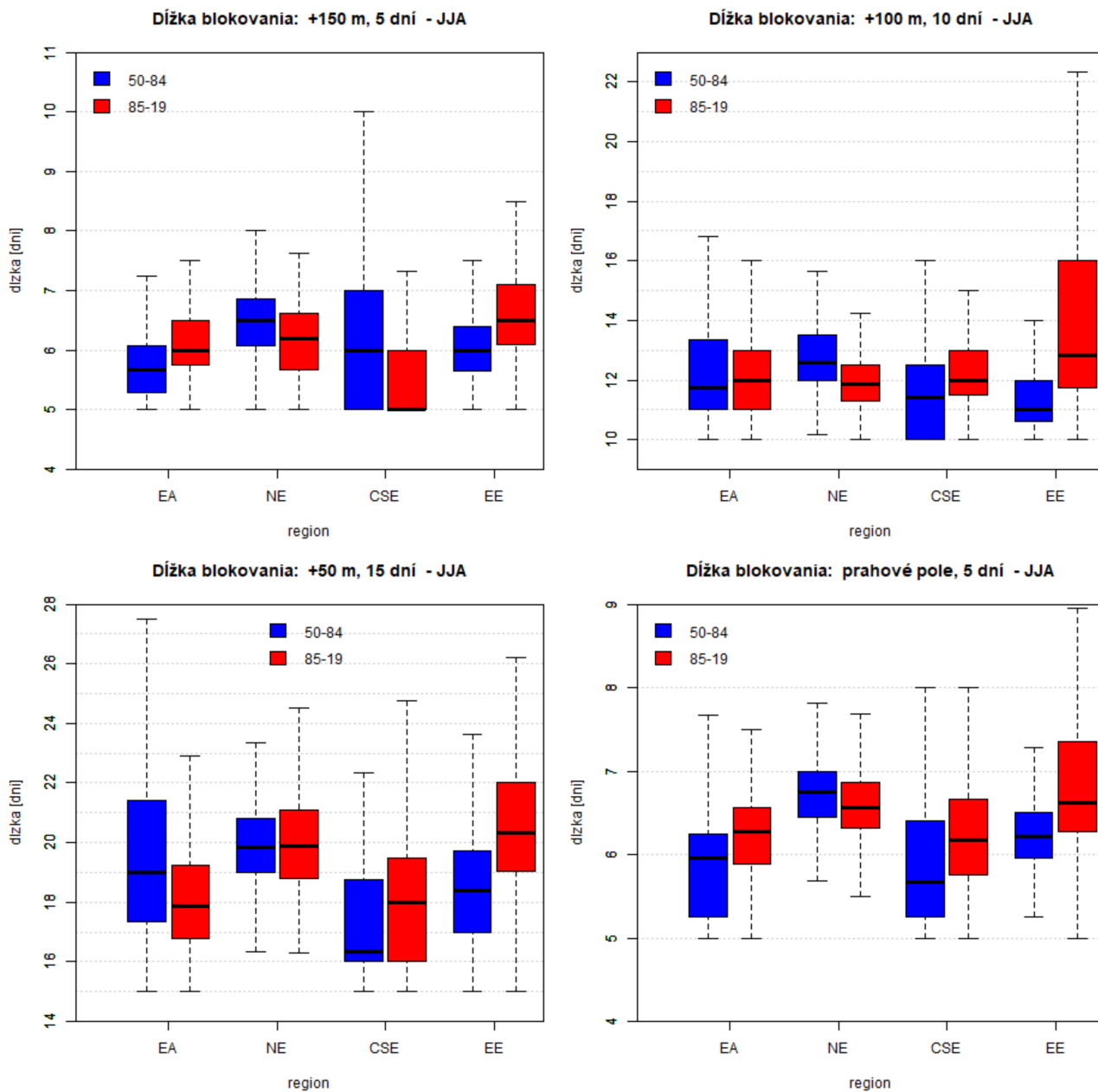


**Obr. 26:** Boxploty dlhodobej priemernej sezónnej dĺžky blokovania pre obdobie 51-84: modrá farba, a pre obdobie 85-19: červená farba, pre jednotlivé regióny Európy podľa obrázku 18. Sezóna DJF.

Obrázky 26 a 27 znázorňujú štatistické porovnanie dlhodobej priemernej sezónnej dĺžky blokovania (ďalej LTSBD – „long-term seasonal blocking duration“) metódou boxplot. Dáta, ktoré do boxplotov vstupujú, predstavujú hodnoty dlhodobej priemernej dĺžky blokujúcich udalostí v jednotlivých pixeloch konkrétneho regiónu. Stredová čiara v boxoch reprezentuje medián. Spodná a horná hranica boxov znamená 1., resp. 3. kvartil (25., resp. 75. percentil, skratky Q1/Q3). Dĺžka boxu v smere osi y teda predstavuje tzv. medzikvartilový interval – IQR („interquartile range“). Napokon spodná prerušovaná úsečka končí v minime, ktoré je definované ako  $Q1 - 1,5 * IQR$ . Analogicky horná prerušovaná úsečka končí v maxime, ktoré je určené ako  $Q3 + 1,5 * IQR$ .

Z obrázkov je zrejmé, že všeobecne výrazne prevažuje nárast dĺžky blokovania, či už v zimnej, alebo letnej sezóne. Použitie jednotlivých prahov opäť separuje blokovanie rôzneho charakteru a možno pozorovať rozdielne trendy dĺžok blokovania v závislosti na použítom prahu. Najvýznamnejší záver z obr. 26 predstavuje región severnej Európy (NE) – tu sa dĺžka blokovania v sezóne DJF v rámci klimatickej zmeny zvýšila dosť výrazne, a to nezávisle na použítom prahu. Ďalej nárast dĺžky blokovania v priestore východného Atlantiku je v zime veľmi nevýrazný. Keď vezmeme do úvahy, že v tomto regióne pozorujeme výrazný nárast LTSBF (obr. 22), možno prísť k záveru, že v tomto priestore sa v rámci klimatickej zmeny vyskytuje výrazne viac samostatných blokujúcich udalostí. Napokon na obr. 26 ešte možno pozorovať, že v priestore východnej Európy narástla dĺžka miernych ale dlhších blokujúcich epizód (prah 50 a 100 m). Čo sa však týka intenzívnych blokov (prah 150 m, či prahové pole), tu pozorujeme len jemný pokles dĺžky, prípadne takmer žiadnu zmenu.

Jasný trend LTSBD pre sezónu JJA je zrejмый na obr. 27 v regióne východnej Európy. Nezávisle na použítom prahu sledujeme významné predĺženie blokujúcich epizód. Je nutné si uvedomiť, že metóda v rámci sezóny JJA detekovala výrazne menej blokov ako v sezóne DJF, a preto napríklad v priestore strednej a južnej Európy (CSE), kde bolo detekovaných veľmi málo udalostí, vidíme značne rozkolísané boxploty. V oblasti EA ďalej pozorujeme mierne predĺženie intenzívnych udalostí, avšak zrejmé skrátenie udalostí v rámci prahu +50 m. V regióne NE možno zväčša vidieť jemné skrátenie blokov, s výnimkou prahu +50 m, kde je skôr stagnácia.



**Obr. 27:** Boxploty dlhodobej priemernej sezónnej dĺžky blokovania pre obdobie 51-84: modrá farba, a pre obdobie 85-19: červená farba, pre jednotlivé regióny Európy podľa obrázkov 18 a 19. Sezóna JJA.

V tabuľkách 1 a 2 sú uvedené percentuálne hodnoty nárastu/poklesu jednotlivých štatistických momentov zobrazených boxplotov. Výpočet podľa vzťahu:

$$\Delta X = \frac{X_2}{X_1} \cdot 100 - 100 \quad (5)$$

$\Delta X$  znamená nárast/pokles štatistického momentu  $X$  v %,  $X_2$  je hodnota  $X$  pre boxplot prislúchajúci obdobiu 1985-2019 a  $X_1$  je hodnota  $X$  pre boxplot prislúchajúci obdobiu 1950-1984.

Kladné hodnoty  $\Delta$  teda značia nárast, záporné zasa pokles. V ľavom stĺpci sú uvedené kombinácie sezón a prahov, pre ktoré dané prírastky platia. Napr. DJF150 značí zimnú sezónu a prah +150 m, DJF\_p zimnú sezónu a použitie prahového poľa.

	$\Delta Q1$		$\Delta Q3$		$\Delta med$	
	<i>EA</i>	<i>NE</i>	<i>EA</i>	<i>NE</i>	<i>EA</i>	<i>NE</i>
DJF150	3,5	5,0	4,1	<b>5,5</b>	3,7	<b>5,7</b>
DJF100	-0,7	<b>6,1</b>	0,6	<b>6,5</b>	1,0	3,4
DJF50	3,7	<b>10,0</b>	0,1	3,9	1,4	<b>8,0</b>
DJF_p	<b>5,5</b>	2,6	2,7	<b>9,5</b>	2,4	<b>6,2</b>
JJA150	<b>8,8</b>	<b>-6,6</b>	<b>6,9</b>	-3,4	<b>5,8</b>	-4,6
JJA100	0,0	<b>-5,8</b>	-2,7	<b>-7,4</b>	2,1	<b>-5,9</b>
JJA50	-3,1	-1,1	<b>-10,1</b>	1,4	<b>-5,9</b>	0,2
JJA_p	<b>12,2</b>	-1,9	4,9	-1,9	<b>5,4</b>	-2,7

**Tab. 1:** Rozdiel štatistických momentov v % pre boxploty z obrázkov 26 a 27 pre regióny *EA* a *NE*.

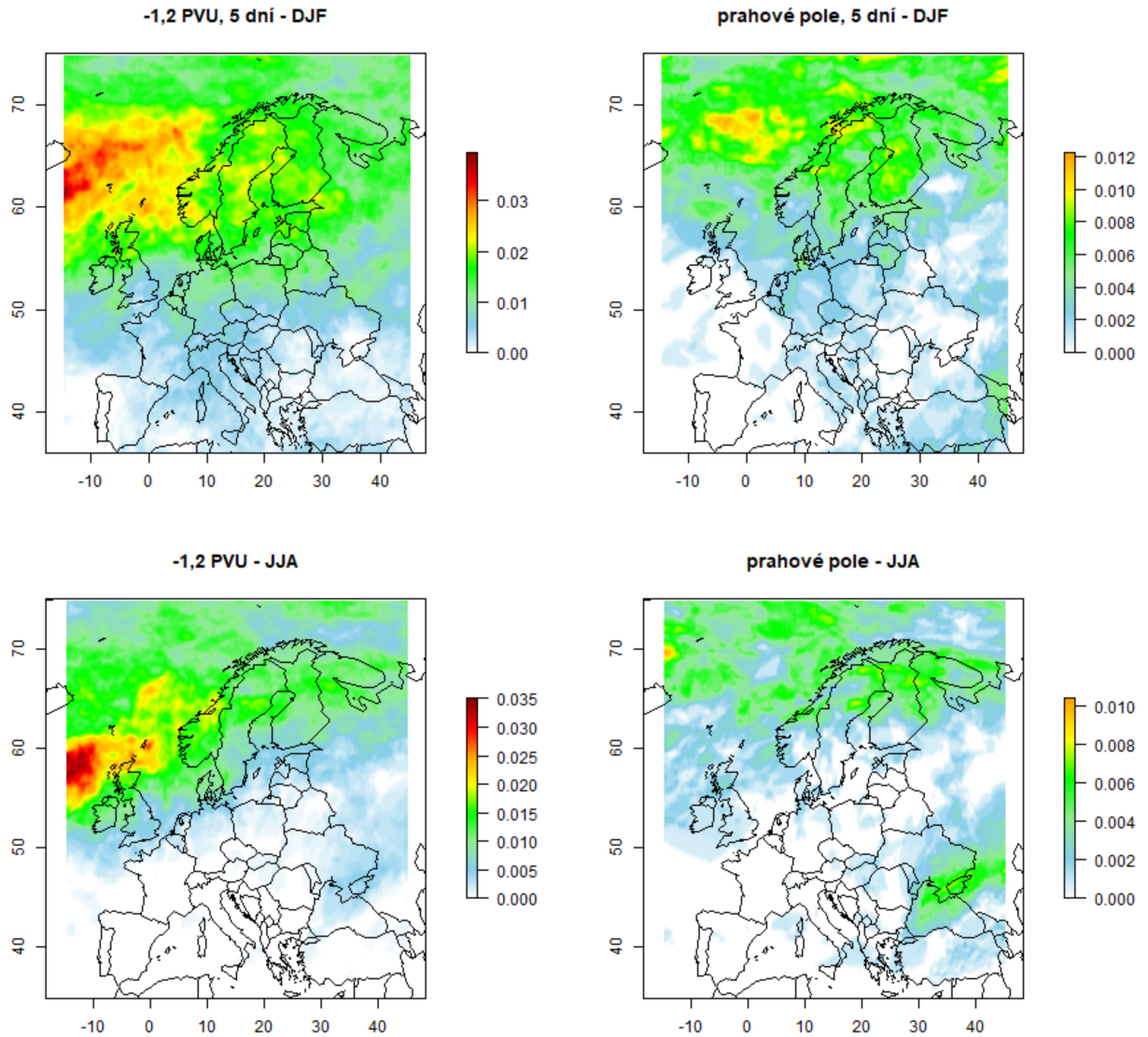
	$\Delta Q1$		$\Delta Q3$		$\Delta med$	
	<i>CSE</i>	<i>EE</i>	<i>CSE</i>	<i>EE</i>	<i>CSE</i>	<i>EE</i>
DJF150	3,3	<b>-7,0</b>	0,0	1,1	2,6	-3,4
DJF100	1,3	3,4	<b>-7,1</b>	<b>6,2</b>	-1,8	4,6
DJF50	0,8	<b>8,6</b>	-1,8	3,8	1,5	<b>8,6</b>
DJF_p	<b>5,5</b>	-3,6	1,0	1,2	4,0	-2,5
JJA150	0,0	<b>8,2</b>	<b>-14,3</b>	<b>11,0</b>	<b>-16,7</b>	<b>8,3</b>
JJA100	<b>15,0</b>	<b>10,8</b>	4,0	<b>33,3</b>	<b>5,3</b>	<b>16,6</b>
JJA50	0,0	<b>12,1</b>	4,0	<b>11,7</b>	<b>10,2</b>	<b>10,5</b>
JJA_p	<b>9,5</b>	<b>5,2</b>	4,2	<b>13,1</b>	<b>8,8</b>	<b>6,7</b>

**Tab. 2:** Rozdiel štatistických momentov v % pre boxploty z obrázkov 26 a 27 pre regióny *CSE* a *EE*.

Štatistické údaje z boxplotov z obrázkov 26 a 27 len potvrdzujú dva hlavné výsledky – významné predĺženie blokujúcich epizód v rámci klimatickej zmeny nezávisle na použítom prahu pre severnú Európu v zime a pre východnú Európu v lete.

## 5.2 Metóda PV\*

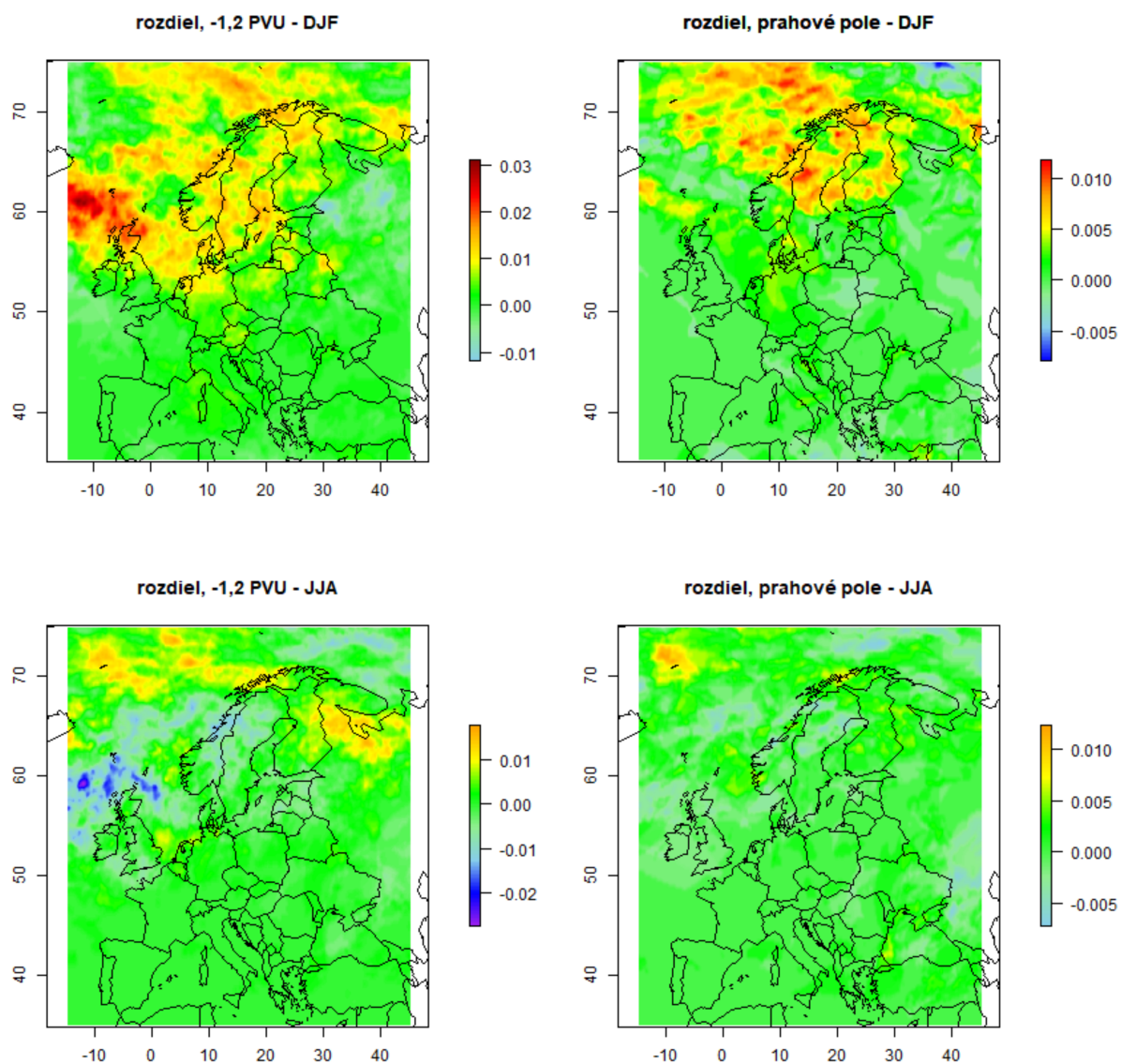
### 5.2.1 Frekvencia blokovania



**Obr. 28:** Dlhodobá priemerná sezónna frekvencia blokovania za použitia konštantného prahu -1,2 PVU (vľavo) a prahového poľa (vpravo). Sezóna DJF – hore, sezóna JJA – dolu.

V rámci metódy PV\* sú použité dva prahové prístupy – priestorovo konštantný prah -1,2 PVU a priestorovo premenlivé prahové pole (viď podkapitola 4.2.2), pričom časový prah je 5 dní v oboch prípadoch. Z obr. 28 je zrejmé, že za použitia prahového poľa metóda detekuje blokovanie len zriedkavo – či už v zimnej, alebo v letnej sezóne. Práh -1,2 PVU detekuje výraznú oblasť maxima frekvencie severne od britských ostrovov s hodnotami okolo 0,03, čo priemerne predstavuje zhruba 3 dni za sezónu. V zimnej sezóne je táto oblasť podstatne rozsiahlejšia s menej ostrými lokálnymi maximami, zatiaľčo v lete ide o relatívne menší región, ktorý je situovaný južnejšie a maximum je zreteľne ostrejšie. Všeobecne možno povedať, že metóda PV\* detekuje bloky takmer výhradne len v severnej časti Európy, preferovane nad SV Atlantikom. Podružné slabšie maximá možno rozoznať nad Škandináviou, a to hlavne v zimnom období.

Výsledky tejto metódy možno porovnať s vybranými výsledkami metódy Z\*. Vybrané výsledky metódy Z\* neobsahujú prah +50 m, keďže prístupy použité v rámci metódy PV\* reprezentujú skôr intenzívne a kratšie blokujúce epizódy. Keď sa však pozrieme na obrázky 20 a 21, konkrétne napríklad na prah +150 m pre sezónu DJF, možno pozorovať určitú priestorovú zhodu s obrázkom 28. Metóda Z\* tu detekuje maximá mierne južnejšie ako metóda PV\* a oblasť vysokých hodnôt frekvencie je rozsiahlejšia. Ďalej možno porovnať letné sezóny, napríklad s prahom +100 m (prah +150 m bol pre letnú sezónu príliš vysoký). Tu sa výsledky zhodujú už dosť výrazne, navyše aj veľkosť frekvencie je takmer identická (cca 0,03). Všeobecne možno povedať, že metóda PV\* detekuje bloky južnejšie od rovnobežky 50° s.š. veľmi ojedinele, zatiaľčo metóda Z\* ich tu detekuje podstatne častejšie. Ďalší významný rozdiel medzi metódami je vidieť nad východnou Európou. Či už v zime alebo v lete, metóda PV\* v oblasti Ruska detekuje veľmi málo blokov, pričom metóda Z\* ich tam detekuje niekoľkonásobne viac.

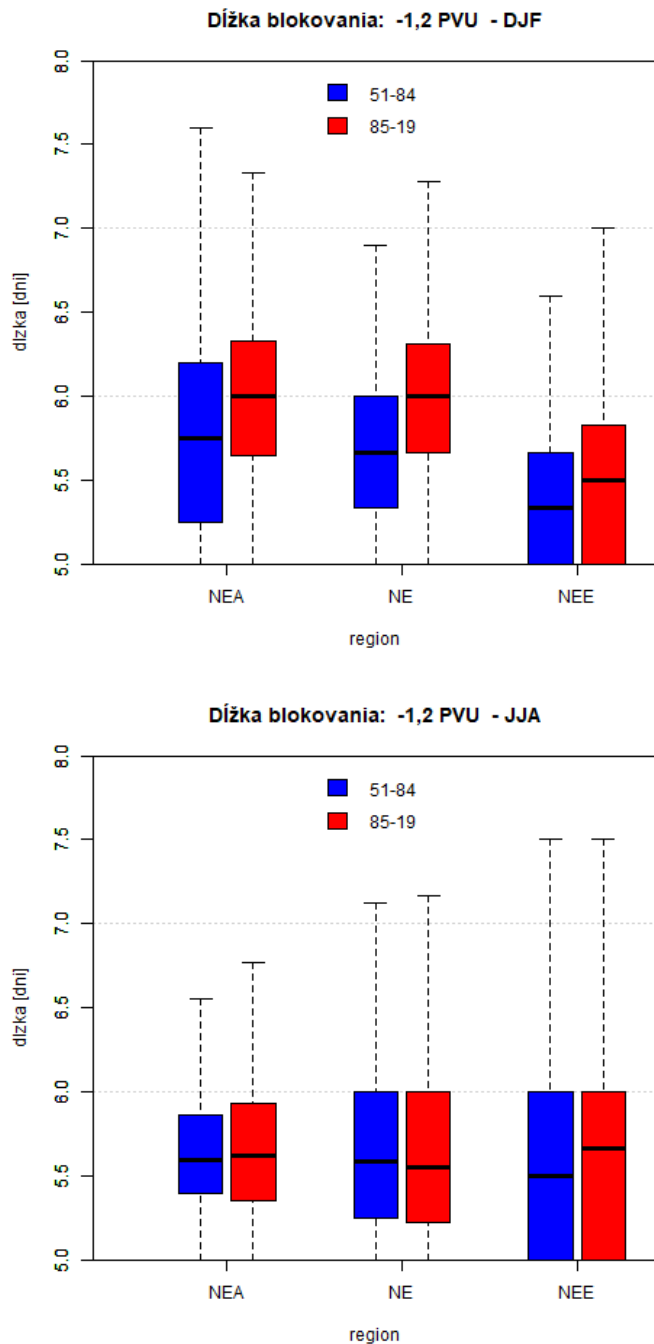


**Obr. 29:** Rozdiel LTSBF období 85-19 a 50-84 za použitia konštantného prahu -1,2 PVU (vľavo) a prahového poľa (vpravo). Sezóna DJF – hore, sezóna JJA – dolu.

Z obr. 29 je zřejmý nárast frekvencie blokovania prakticky v celej severnej Európe v zimnom období. Najvýraznejší nárast možno pozorovať nad Škandináviou a Nórskym morom, prah -1,2 PVU vykazuje výrazné maximum nárastu aj v blízkosti severných pobreží britských ostrovov. Tiež možno povedať, že v rámci porovnania období 50-84 s obdobím 85-19 sa oba prahové prístupy značne zhodujú napriek tomu, že pri celkovej LTSBF obdobia 50-19 boli zřejmé rozdiely (obr. 28). Tendencia blokovania pre letné obdobie nie je taká výrazná, ale to je vzhľadom na zriedkavosť detekcie blokovania očakávané. Slabšie maximá sú tu zreteľné v oblasti Nórskeho a Grónskeho mora, pričom prah -1,2 PVU dokonca v blízkosti britských ostrovov detekuje lokálny pokles frekvencie.

Pri porovnaní s metódou  $Z^*$  vidno, že aj z pohľadu trendu frekvencie blokovania sa metódy dosť rozchádzajú (obr. 22 a 24). Zhodujú sa v náraste frekvencie v severnej Európe a v oblasti britských ostrovov. Metóda  $Z^*$  však vykazuje výrazný nárast frekvencie v priestore JZ Európy v zimnom období, zatiaľčo metóda  $PV^*$  tu blokovanie ako také prakticky vôbec nedetekuje. Podobný prípad je východná Európa v letnom období – metóda  $Z^*$  vykazuje značný nárast frekvencie, metóda  $PV^*$  tu detekuje veľmi málo blokov všeobecne. Tieto rozdiely opäť pramenia z toho, že metóda  $PV^*$  južnejšie od  $50^\circ$  s.š. bloky prakticky nedetekuje.

## 5.2.2 Dĺžka blokovania



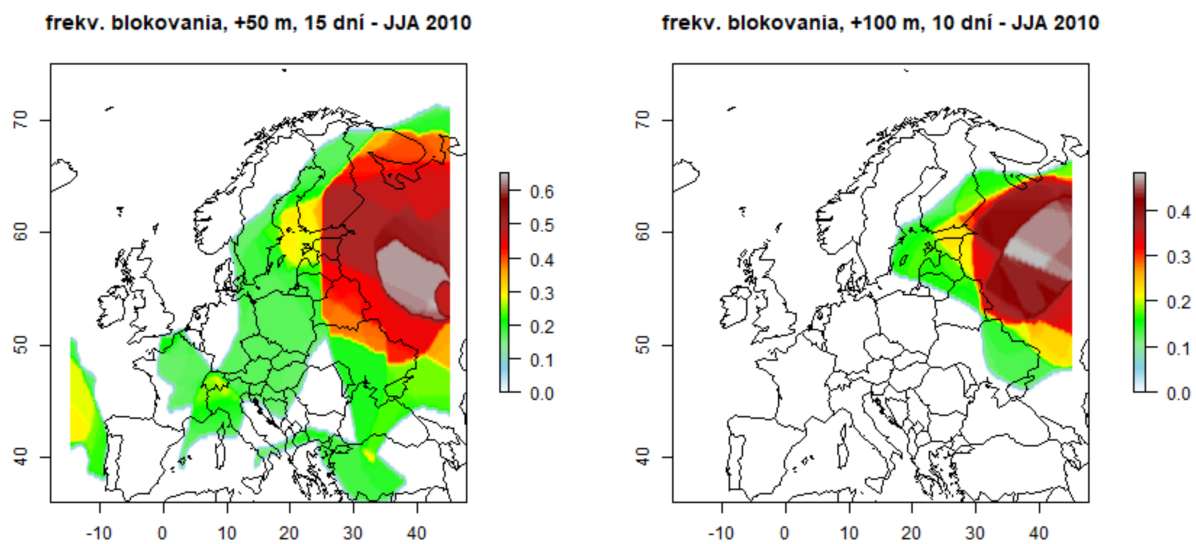
**Obr. 30:** Boxploty dlhodobej priemernej sezónnej dĺžky blokovania pre obdobie 51-84: modrá farba, a pre obdobie 85-19: červená farba, pre jednotlivé regióny Európy podľa obrázku 19. Sezóna DJF – hore, sezóna JJA – dolu.

Na obr. 30 boli vybrané len boxploty dĺžok blokov, ktoré boli detekované za použitia prahu -1,2 PVU. Keďže metóda za použitia premenlivého prahového poľa detekuje bloky len zriedkavo, štatistický súbor priemernej dĺžky blokov v jednotlivých pixeloch nie je dostatočne mohutný na to, aby výsledná informácia z boxplotov bola relevantná. Z obr. 30 je zrejmé, že dĺžka blokov detekovaných metódou PV\* len veľmi zriedkavo prekročí 7 dní. Evidentný je tiež trend v rámci zimnej sezóny – dĺžka blokovania v rámci klimatickej zmeny mierne vzrástla vo všetkých sledovaných regiónoch. Naopak v letnej sezóne nemožno pozorovať prakticky žiaden trend. Tieto poznatky korešpondujú s obr. 24, kde bolo ukázané, že v letnej sezóne (na rozdiel od zimnej) nedošlo v rámci klimatickej zmeny k výraznejším zmenám frekvencie blokovania.

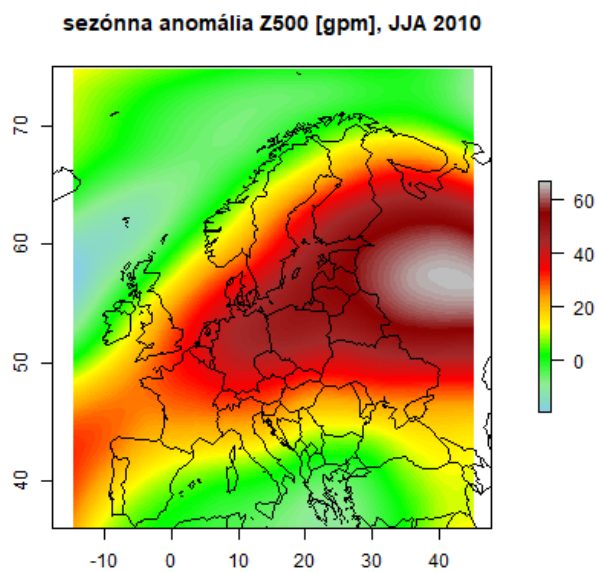
Pri porovnaní s obrázkami 26 a 27 vidíme, že tieto výsledky sa v dostatočnej miere zhodujú s výsledkami metódy Z\* - predovšetkým v rámci zimnej sezóny. V letnej sezóne možno pozorovať zhodu medzi regiónmi EA/NEA a NE, avšak v regióne NEE/EE vykazuje metóda Z\* významný nárast dĺžky blokovania, zatiaľčo metóda PV\* nie. Dôvodom je opäť fakt, že metóda PV\* vo východnej Európe všeobecne detekuje omnoho menej blokov ako metóda Z\*.

### **5.3 Blokovanie v lete 2010**

V podkapitole 1.3. bola uvedená epizóda blokovania vo východnej Európe z letnej sezóny roku 2010, ktorá do veľkej časti Ruska priniesla rekordne vysoké teploty, veľmi výrazné sucha a následne rozsiahle lesné požiare. Faktom je, že z pohľadu metódy Z\* sa jedná o suverénne najvýznamnejšiu a najdlhšiu blokujúcu epizódu v nami sledovanom európskom regióne (blok zasahoval aj do veľkej časti ázijského Ruska) za celé obdobie 1950-2019. Na nasledujúcich obrázkoch je detailnejšie priblíženie tejto udalosti.



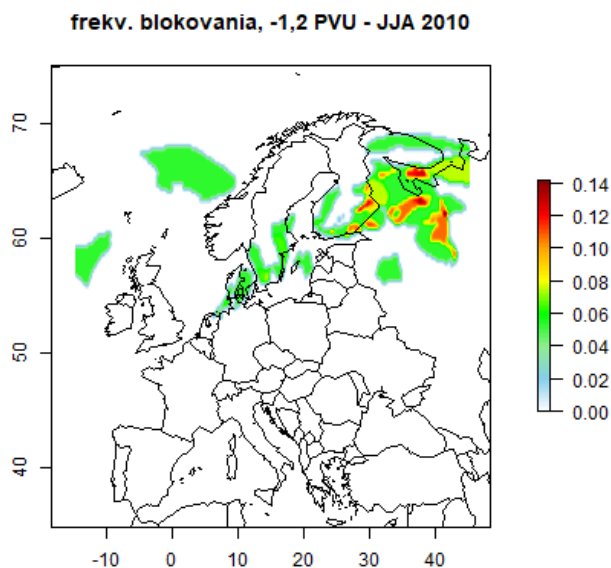
**Obr. 31:** Frekvencia blokovania detekovaná metódou  $Z^*$  v letnej sezóne roku 2010.  
 Použitý prah: +50 m – vľavo, +100 m – vpravo.



**Obr. 32:** Sezónna anomália geopotenciálnej výšky izobarickej hladiny 500 hPa v lete 2010. Uvedené v jednotkách gpm.

Na obr. 31 vidíme extrémne vysoké hodnoty sezónnej frekvencie blokovania predovšetkým nad územím Ruska. Keď tieto hodnoty porovnáme s dlhodobým letným priemerom frekvencie (obr. 21), tak je jasné, že kladné relatívne anomálie dosahujú stovky %. Čo je ešte zaujímavejšie na tejto situácii je fakt, že blokované dni v priestore maxim frekvencie nasledovali neprerušene v rade. To znamená, že za použitia prahu +50 m detekovala metóda v maxime až 60 blokovaných dní v rade! V prípade prahu +100 m to bolo 45 dní v rade, použitie premenlivého prahového poľa vykazuje 42 dní v rade a prah +150 m detekuje 28 blokovaných dní v rade. Iné sezóny, ktoré tiež disponovali výraznými blokovanými situáciami, sa k podobným hodnotám ani nepriblížili.

Z obr. 31 tiež vidno pomerne vysoké gradienty frekvencie blokovania, ktoré sú ale celkom prirodzené, nakoľko sledujeme len jednu sezónu. V rámci pomalého pohybu anticyklóny tiež môže dochádzať k tomu, že na okrajoch pozorovaných vysokých hodnôt blokovania dôjde k prerušeniu série dní potrebných k detekcii bloku (časové prahy 5, resp. 10 dní).

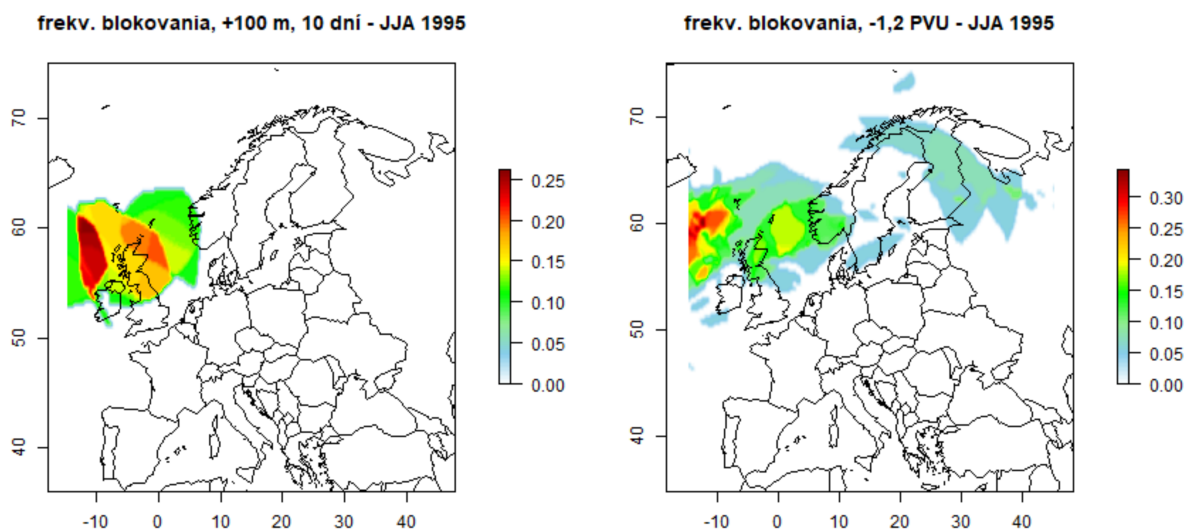


**Obr. 33:** Frekvencia blokovania detekovaná metódou PV\* v letnej sezóne roku 2010.

Použitý prah: -1,2 PVU.

Z obr. 33 je zřejmé, že metoda PV\* detekuje blokovanie v lete 2010 diametrálne odlišne. V porovnaní s metódou Z\* vykazuje maximá len lokálne na relatívne malej ploche, pričom veľkosť maxim je 3 až 4-krát nižšia. Oblasť maxim je tiež voči Z\* posunutá výrazne severne, pričom v blízkosti 55° s.š. metóda nedetekuje prakticky žiadne blokovanie. Práve v týchto miestach však Z\* detekovala maximá frekvencie. To opäť potvrdzuje fakt, že metóda PV\* má ťažkosti s detekovaním blokov v priestore východnej a juhovýchodnej Európy. Keďže blokujúca epizóda z leta 2010 je spracovaná v rôznych článkoch (napr. *NOAA – Physical Sciences Laboratory*, online) a býva popisovaná ako mohutná a perzistentná, v priestore východnej Európy by som jednoznačne uprednostnil metódu Z\*, ktorá túto situáciu vystihla svojou detekciou významne vhodnejšie, ako metóda PV\*.

Pre porovnanie prikladám obr. 34, na ktorom je vidno, že v určitých regiónoch Európy sa metódy Z\* a PV\* značne zhodujú. Na obrázku je uvedená frekvencia blokovania z leta 1995, čo je v rámci metódy PV\* jedna z najvýznamnejších sezón.



**Obr. 34:** Frekvencia blokovania v letnej sezóne roku 1995. Metóda Z\* s prahom +100 m -vľavo, metóda PV\* s prahom -1,2 PVU – vpravo.

## 6. Diskusia

K hodnoteniu blokovania v priestore Európy v rámci obdobia zvyrazňujúcej sa klimatickej zmeny boli použité metódy Z\* a PV\*. Zrejmé rozdiely vo výsledkoch medzi týmito metódami pramenia predovšetkým z toho, že metóda Z\* pracuje s jednou vertikálnou hladinou, zatiaľčo metóda PV\* berie do úvahy väčšinu hornej polovice troposféry (150 – 500 hPa). Samozrejme, do úvahy je nutné brať tiež fakt, že metódy používajú k detekcii blokovania inú fyzikálnu veličinu.

Porovnanie získaných výsledkov s inými publikáciami nie je jednoduché hneď z niekoľko dôvodov. Prvým z nich je časový rozsah použitej reanalýzy – prakticky nejestvuje publikácia, ktorá by hodnotila blokovanie za tak dlhé obdobie, ako je obdobie 1950 - 2019. Ďalším dôvodom je nedostatok publikácií, ktoré sa venujú blokovaniu v súvislosti s globálnym nárastom teploty. Napokon, asi najpodstatnejší dôvod predstavujú výpočtové rozdiely medzi autormi, ktorí sa tejto problematike venujú. Napríklad, množstvo autorov okrem časovej podmienky a podmienky veľkosti anomálie príslušnej veličiny používa aj plošnú podmienku. Tá predstavuje prah plošného rozsahu v km<sup>2</sup>, ktorý musí blok prekročiť, aby bol vôbec detekovaný. Príkladom môže byť publikácia *Schwierz et al.*, 2004, kde autor používa plošný prah pre detekciu bloku  $1,8 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup> v rámci anomálnej metódy potenciálnej vorticity. Všetky tieto aspekty práce s blokovaním vedú k tomu, že výsledky sa líšia nielen medzi jednotlivými metódami, ale aj v rámci tej istej metódy medzi inými autormi. Z uvedeného vyplýva, že veľká časť výsledkov tejto práce je originálna a porovnanie s inými publikáciami možno uviesť len veľmi rámcovo.

Výsledky práce korešpondujú so základnými, dlho známymi faktami, že blokovanie sa v priestore Európy najčastejšie vyskytuje vo východnom Atlantiku a v oblasti britských ostrovov (*J. L. Pelly*, 2003). Tiež všetky uvedené postupy potvrdili, že blokovanie je podstatne častejšie v zimnej sezóne. Čo sa týka konkrétnych hodnôt LTSBF, napríklad *Woollings et al.*, 2018 či *Pinheiro et al.*, 2019 prezentujú pre zimnú sezónu hodnoty v maximách medzi 0,10 a 0,15 a pre letnú sezónu 0,06 až 0,10. To pre porovnanie predstavuje trochu vyššie hodnoty, avšak opäť je nutné podotknúť, že obe

publikácie používali rôzne výpočtové detaily, čo sa týka plošného prahu či plošného zhladzovania. V rámci geografickej distribúcie maximálnych hodnôt frekvencie sa však naše výsledky zhodujú.

Najvýznamnejším výsledkom práce je zrejmy nárast LTSBF vo veľkej časti Európy v rámci klimatickej zmeny. V zimnom období ide predovšetkým o priestor západnej Európy, zatiaľčo v lete sú maximá nárastu frekvencie vo východnej Európe v oblasti Ruska. Predovšetkým trend letnej sezóny značne súhlasí s publikáciou *Woollings et al.*, 2018, ktorá tiež vykazuje v priestore Európy významný nárast LTSBF v regióne kontinentálneho Ruska. Zhoda je menšia pre zimnú sezónu, kde uvedená publikácia, s výnimkou malej oblasti v blízkosti britských ostrovov, neukazuje žiaden výraznejší trend frekvencie. Detekovaný nárast frekvencie je podporený štatistikou dĺžky blokovania – všetky spomenuté regióny nárastu frekvencie vykazujú tiež nárast dĺžky blokov.

## 7. Záver

Atmosférické blokovanie predstavuje významný fenomén počasia, ktorý nie je možné exaktne definovať. Taktiež problematika detekcie blokovania disponuje významnou mierou subjektivity, čoho dôkazom je aj táto práca. V rámci vývoja metód detekcie boli testované rôzne prístupy, týkajúce sa predovšetkým prahových hodnôt – či už denných anomálií príslušných veličín, alebo následne počtu dní nutného k neprerušnému prekročeniu anomálneho prahu. Každý z prístupov má svoje výhody a nevýhody a niektoré z nich sú pre analyzovanú doménu a sezónu viac či menej relevantné.

Cieľom tejto práce bolo skúmať klimatológiu základných blokujúcich charakteristík (frekvencia a dĺžka blokovania) v priestore Európy za použitia vybraných metód detekcie blokovania. Dôraz bol kladený na odhalenie novej súvislosti medzi časovým vývojom týchto charakteristík a globálnym nárastom teploty vzduchu. Napokon boli na základe získaných výsledkov použité metódy (metódy Z\* a PV\*) prakticky porovnané.

Základným výsledkom práce je zreteľný nárast frekvencie výskytu blokovania vo veľkej časti Európy v rámci klimatickej zmeny, resp. v posledných 30 rokoch. Nárast je výraznejší v zimnej sezóne – metóda Z\* tu detekuje priestorovo rozsiahle maximá nárastu v priestore JZ a Z Európy, nižšie hodnoty nárastu možno pozorovať v oblasti Škandinávie. V lete táto metóda detekuje značný nárast frekvencie predovšetkým vo východnej Európe.

Metóda PV\* je s metódou Z\* v zhode len v rámci severnej Európy, kde tiež v zimnom období vykazuje nárast frekvencie aj dĺžky blokovania. Rozdielne výsledky v iných regiónoch sú spôsobené charakterom samotnej metódy PV\*, ktorá južne od rovnobežky 50° s.š., a tiež v priestore Ruska, detekuje blokovanie len veľmi zriedkavo. To je teda napríklad dôvodom toho, prečo táto metóda v letnom období nedetekuje žiaden významný trend frekvencie blokovania. Všeobecne možno prehlásiť, že metóda PV\* detekuje podstatne menej blokov v porovnaní s metódou Z\*, čo je v zhode s *Pinheiro et al.*, 2019. Predpokladám, že zníženie prahu denných anomálií PV napríklad na -1,0 PVU by mohlo priniesť zaujímavé výsledky, a tiež by bolo možné sledovať, či

by sa následne výsledky približovali k výsledkom metódy  $Z^*$ .

Vo výsledkoch bol zahrnutý aj prístup, ktorý bol prvý krát uvedený v publikácii *Pinheiro a kol.* (2019). Tento prístup počíta prah príslušnej veličiny na základe vzťahu (4). Z výsledkov bolo zrejmé, že tento prístup významne znížil frekvenciu blokovania nezávisle na použitej metóde, a taktiež značne oklieštil priestor, v ktorom boli akékoľvek bloky vôbec detekované. V prípadnom ďalšom výskume metód by možno bolo vhodné znížiť normalizačný koeficient vo vzťahu (4) z 1,5 na napr. 1,2, prípadne výsledné priestorovo premenlivé prahové pole významným spôsobom zhladiť.

## Použitá literatura

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY [online]. [cit. 2019-10-01]. *Glossary of meteorology*.

URL: <<https://glossary.ametsoc.org/wiki/Welcome>>.

BERGGREN , R., 1949: *An Aerological Study of Zonal Motion, its Perturbations and Break-down*. Tellus, Vol. 1, Iss. 2, (14-37). Wiley Online Library.

COPERNICUS [online]. *The European Earth Observation Programme*. Reanalysis ERA5.

URL: <<https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>>.

CROCI-MASPOLI, M., et al., 2007: *A Multifaceted Climatology of Atmospheric Blocking and Its Recent Linear Trend*. ETH Zurich, Switzerland: Institute for Atmospheric and Climate Science. Researchgate.

ČMeS – ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST [online]. [cit. 2019-10-10]. *Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický*.

URL: <<http://slovník.cmes.cz>>.

DOLE, M., a GORDON, D., 1983: *Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics*. Monthly Weather Review 111(8): s. 1567 – 1586. Researchgate.

DUNN-SIGOUIN, E., et al., 2012: *Northern Hemisphere blocking frequency and duration in the CMIP5 models*. JGR Atmospheres, Vol. 118, Iss. 3, s. 1179-1188. Wiley Online Library.

GROTJAHN, R., a ZHANG, R., 2017: *Synoptic analysis of cold air outbreaks over the California Central Valley*. Journal of Climate, Vol. 30, Iss. 23, s. 9417-9433.

AMS – American Meteorological Society.

LEJENÄS, H., a ØKLAND, H., 1983: *Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data*.

Tellus, Vol. 35A , Iss 5, s. 350-362. Wiley Online Library.

MASPOLI, M., et al., 2007: *Atmospheric blocking – Space-time links to the NAO and PNA*. Climate Dynamics 29(7): s. 713-725. Researchgate.

NATIONAL WEATHER SERVICE: *Basic Wave Patterns* [online]. [cit. 2019-10-02].

URL: <<https://www.weather.gov/jetstream/basic>>.

NOAA PHYSICAL SCIENCES LABORATORY: *Ongoing Scientific Assessment of the 2010 Western Russia Heatwave* [online]. [cit. 2020-05-21].

URL: <<https://psl.noaa.gov/csi/events/2010/russianheatwave/prelim.html>>.

PELLY, J. L., et al., 2003: *A New Perspective on Blocking*. Journal of the Atmospheric Science, Vol. 60, Iss. 5, s. 743-755. AMS – American Meteorological Society.

PINHEIRO, M. C., et al., 2019: *Atmospheric blocking and intercomparison of objective detection methods: flow field characteristics*. Climate Dynamics 53, s. 4189 – 4216.

SpringerLink.

REUTERS [online]. [cit. 2021-07-02 ]. *Deaths surge in U.S. And Canada from worst heatwave on record*.

URL: <<https://www.reuters.com/world/americas/dire-fire-warnings-issued-wake-record-heatwave-canada-us-2021-06-30/>>.

REX, D. F., 1950: *Blocking Action in the Middle Troposphere and its Effect upon Regional Climate*. Tellus, Vol. 2, Iss. 3, s. 196-211. Wiley Online Library.

R PROJECT: *The R Project for Statistical Computing* [online].

URL: <<https://www.r-project.org>>.

SAUSEN, R., et al., 1995: *Analysis of blocking events from observations and ECHAM model simulations*. Tellus, Vol. 47, Iss. 4, s. 421-438. Wiley Online Library.

SCHERRER, S. C., et al., 2006: *Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region*. International Journal of Climatology 26(2): s. 233-249. Researchgate.

SCHWIERZ, C., et al., 2004: *Perspicacious indicators of atmospheric blocking*. Geophysical Research Letters, Vol. 31, Iss. 6. Wiley Online Library.

SOBÍŠEK, B., et al., 1993: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Academia, Praha, 594 s.

TIBALDI, S., a MOLTENI, F., 1990: *On the operational predictability of blocking*. Tellus, Vol. 42, Iss. 3, s.343-365. Wiley Online Library.

WETTERZENTRALE [online]. [cit. 2019-10-10]. *Archiv: Reanalysis ERA – Europa*.

URL: <<https://www.wetterzentrale.de/en/reanalysis.php?model=era>>.

WOOLINGS, T., et al., 2018: *Blocking and its response to climate change*. Current climate change reports 4, s. 287-300. SpringerLink.

## Použité skratky

AGP	geopotential height gradient (gradient geopotenciálnej výšky)
CSE	Central and Southern Europe (stredná a južná Európa)
DJF	December-January-February (sezóna december-január-február)
EA	Eastern Atlantic (východný Atlantik)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Európske centrum pre strednodobú predpoveď počasia)
EE	Eastern Europe (východná Európa)
GHGN	Geopotential Height Gradient North (severný gradient geopot. výšky)
GHGS	Geopotential Height Gradient South (južný gradient geopot. výšky)
GPM	Geopotential Meter (geopotenciálny meter)
IQR	Interquartile Range (medzikvartilový interval)
JJA	June-July-August (sezóna jún-júl-august)
LTMM	Long – Term Monthly Mean (dlhodobý mesačný priemer)
LTSBD	Long – Term Seasonal Blocking Duration (priemerná dlhodobá sezónna dĺžka blokovania)

LTSBF	Long – Term Seasonal Blocking Frequency (priemerná dlhodobá sezónna frekvencia blokovania)
LTSM	Long – Term Seasonal Mean (dlhodobý sezónny priemer)
NA	North Atlantic (severný Atlantik)
NC	Northern Continents (kontinenty severnej hemisféry)
NE	Northern Europe (severná Európa)
NEA	North – Eastern Atlantic (severovýchodný Atlantik)
NEE	North – Eastern Europe (severovýchodná Európa)
NP	Northern Pacific (severný Pacifik)
NWPC	Numerical Weather Prediction Centres (centrá numerickej predpovedi počasia)
PV*	Potential Vorticity (method) (metóda potenciálnej vorticity)
PVU	Potential Vorticity Unit (jednotka potenciálnej vorticity)
Q1	First Quartile (prvý kvartil)
Q3	Third Quartile (tretí kvartil)
SA	Southern Atlantic (južný Atlantik)

SI	Southern Indian ocean (Indický oceán južnej hemisféry)
SP	Southern Pacific (Tichý oceán južnej hemisféry)
Z*	geopotential height method (metóda geopotenciálnej výšky)
Z500	500 mbar surface geopotential height (geopotenciálna výška hladiny 500 hPa)
Z500*	normalised daily anomaly of 500 mbar surface geopotential height (denné normalizované anomálie geopotenciálnej výšky hladiny 500 hPa)