

Jak se během 20. století změnila cirkulace na severní polokouli?

Vladimír Piskala

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy (Vladimir.Piskala@natur.cuni.cz)

Abstract

The Northern Hemisphere circulation has changed during the 20. century as many studies proved before. The aim of this study is to find out whether these changes are also evident in modes of low-frequency variability (i.e. teleconnections). The long-term reanalysis: 20th Century is employed to identify circulation changes in a period longer than 100 years according to reanalyses availability. Modes are detected by the varimax-rotated principle component analysis (PCA) of winter monthly mean 500 hPa geopotential heights. The moving PCA of 40 years periods with two years step is used which allows to get more precise information about a geographical shift of modes. The intensity and even the position of all modes have been slightly changing during the 20th century. The NAO mode was the first leading mode in the late 19th and the early 20th century period. However, the highest differences occur mainly in changes of the PNA mode which is the first leading mode for the most part of the 20th century. In the early century period, the explained variance of this mode is significantly lower and centres are weaker. This is probably caused by lack of observed data over North America or Siberia which were assimilated to the reanalyses. The distribution of assimilated data in the early period of reanalyses can lead to preference of European modes.

Annotation

The Northern Hemisphere circulation has changed during the past century. The long-term reanalysis 20th Century provide an opportunity to find out if these changes are also detectable in modes of low-frequency variability (i.e. teleconnections). Results can answer questions how the intensity and even the geographical position of modes have changed.

Key words

Atmospheric circulation, teleconnections, climate change, NAO, PNA, reanalysis

1 Úvod

Cirkulace vzduchu patří mezi základní klimatotvorné faktory. Výkyvy klimatu jsou tak zpravidla spojeny i se změnami v cirkulaci (Mayewski et al. 1994). Posuny v proudění doprovází i probíhající změnu klimatu pozorovanou v průběhu 20. století, která je prokazatelně spojena s činností člověka (Frich et al. 2002, He et al. 2015, Ding et al. 2017).

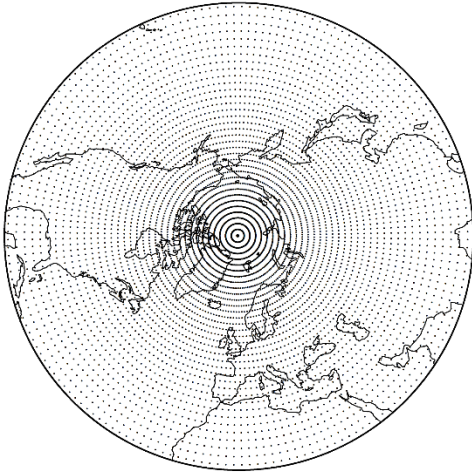
Změny klimatu probíhají v jednotlivých regionech různě rychle a s různou intenzitou. Vůbec nejrychleji se mění klima Arktidy, která se v posledních dekáдах ohřívá zhruba dvakrát rychleji, než zbytek severní polokoule (Screen et al. 2010). Tím slábne i teplotní gradient mezi Arktidou a středními zeměpisnými šířkami a to se projevuje v cirkulaci. Zonální proudění ve vyšších vrstvách atmosféry slábne a Rossbyho vlny se v hladině 500 hPa protahují směrem k severu. V důsledku se tak zpomalují i cirkulační systémy při zemi a vzrůstá pravděpodobnost extrémních výkyvů počasí jako jsou studené a horké vlny, sucho, nebo trvalé deště a povodně (Vavrus et al. 2006, Francis a Vavrus 2012). Zdá se, že mezi hlavní příčiny měnící se cirkulace patří úbytek mořského ledu, a to především během pozdního podzimu. Větší plochy otevřeného oceánu déle ohřívají přízemní vrstvy atmosféry. Tím přispívají k nárůstu geopotenciální výšky v hladině 500 hPa v Arktidě a častějšímu meridionálnímu proudění (Overland and Wang 2010, Pedersen et al. 2016). Předchozí studie prokázaly spojení úbytku mořského ledu v Arktidě i s posunem center severoatlantické oscilace (Pedersen et al. 2016).

Cílem této práce je zjistit, zda a jak jsou změny v cirkulaci zachyceny v nízkofrekvenčních módech proměnlivosti atmosféry, tzn. módy proměnlivosti. Díky reanalýzám, které zachycují vývoj atmosféry od konce 19. století do současnosti, je možné pozorovat, jak se během 20. století měnila poloha a intenzita center dálkových vazeb v atmosféře. Studie je omezena na dva nejsilnější módy – severoatlantickou oscilaci (NAO) a pacificko-severoamerickou oscilaci (PNA).

2 Data a metody

Módy nízkofrekvenční proměnlivosti jsou nejlépe patrné při analýze geop. v hladině 500 hPa. Použity byly průměry zimních měsíců (prosinec – únor), pro které jsou módy z celého roku nejvýraznější (Wallace a Gutzler 1981). Analyzováno bylo období od roku 1871–2011, pro které jsou dostupná data z reanalýzy 20th Century 20CRv2. Reanalýza je postavena na asimilaci staničních pozorování, ze kterých jsou pak odvozeny údaje pro

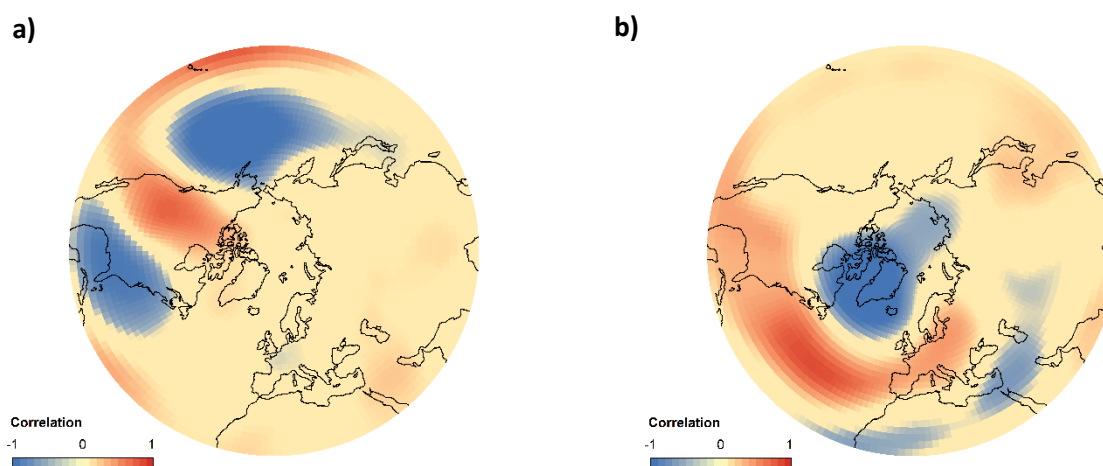
jednotlivé tlakové hladiny (Compo et al. 2011). Celkově bylo do výpočtů zahrnuto 139 kompletních zimních sezón. Oblast severní polokoule je omezena na území severně od 20. rovnoběžky, tedy bez tropických oblastí. Gridová síť s rozlišením $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ se směrem k pólu zahušťuje, proto byly všechny hodnoty váženy kosinem příslušné zeměpisné šířky (**obr. 1**).



Obrázek 1: Zájmové území a gridová síť

V prvním kroku byly odečteny průměry. Vždy se přitom jednalo jen o průměry daných měsíců, tedy například od prosincových dat byl odečten průměr všech prosinců. Do dalších výpočtů tak už vstupují jen anomálie výšek geopotenciálu (Wilks 2011). Následně byla data seřazena do matice a to tak, aby každý sloupec popisoval časovou proměnlivost hodnot v jednom gridovém bodě. Pro takto formátovaná data byla spočítána analýza hlavních složek. Tato, v meteorologii a klimatologii rozšířená metoda (Jackson 1991, Jolliffe 2002, Wilks 2011, Hannachi et al. 2007), má za úkol najít takové nové proměnné, které zachycují většinu pozorovaného rozptylu původních dat a to pomocí lineární kombinace původních proměnných (Hannachi et al. 2007). Výsledkem jsou mapy (loadings), které zachycují prostorovou variabilitu módu a časové řady (scores), které popisují intenzitu daného módu. Jednotlivé mapy jsou vzájemně nekorelované a na sobě tak zcela nezávislé. Největší část původního rozptylu pak vždy vysvětluje první mód. Celkový počet 8 módů byl stanoven subjektivně.

V dalším kroku byly výsledky analýzy hlavních složek ortogonálně rotovány pomocí metody VARIMAX (Richman 1986). Tím sice módy proměnlivosti ztrácí vlastnost vzájemné nulové korelace, naopak ale získají jednodušší strukturu, kterou lze i snáze interpretovat (Richman 1986, Hannachi 2007). Časové řady rotovaných módů pak byly v každém gridovém bodě korelovány s časovými řadami původních dat. Na obrázku 2 jsou mapy korelací dvou nejsilnějších módů (PNA a NAO).



Obrázek 2: Mapy korelací časových řad ortogonálně rotovaných hlavních složek s průběhem původních dat v jednotlivých gridových bodech a) PNA, b) NAO

Mapy korelací (obr. 2) ale nepřinášejí informaci o tom, zda a jak se v minulosti měnila geografická poloha center módů a jejich intenzita. Proto bylo celé období 1871–2011 rozděleno do 51 úseků o délce 40 let s časovým krokem 2 roky a provedena klouzavá analýza hlavních složek. Vždy bylo stanoveno 8 módů proměnlivosti tak, jak bylo určeno pro celé období. Dva po sobě následující kratší úseky tak tvoří prakticky stejná data a proto by se i výsledky měly lišit jen v detailech.

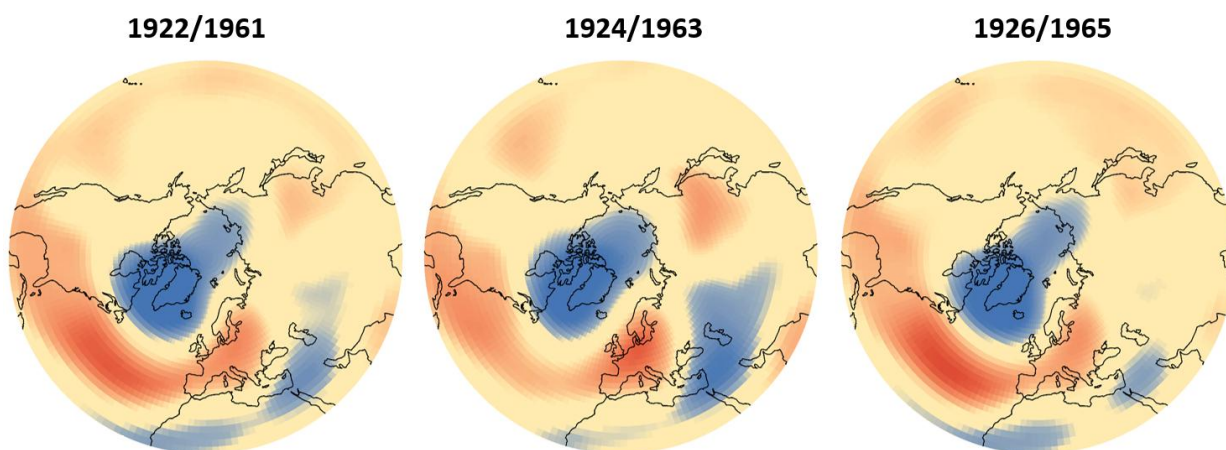
Z celkem 8 módů v každém kratším úseku byl automaticky vybrán mód NAO a PNA. Výběr probíhal na základě podobnosti. Pro všechny módy z kratšího úseku byl spočítán necentrováný korelační koeficient s NAO a PNA, které popisují celé období. Módy s nejvyšší absolutní hodnotou korelačního koeficientu byly označeny jako NAO, respektive PNA. Korelace, vysvětlený rozptyl, pořadí a jednotlivé mapy korelací NAO a PNA jsou zobrazeny v příložených animacích (příloha 1 a 2).

3 NAO

Intenzita center se během 20. století výrazně nemění. Nejvýraznější zůstává centrum nad Grónskem a Azorskými ostrovy (příloha 1). Poloha center během 20. století se jen nepatrně přesouvá k východu. Signifikantní je až pohyb během období konce 19. a přelomu 19. a 20. století (testováno pomocí Fisherovy Z transformace, grafické výsledky testování nejsou v příspěvku ukázány).

V obdobích, která zahrnují většinu 20. století, je NAO nejčastěji 3. až 5. nejsilnějším módem, který vysvětluje zpravidla okolo 10 % původního rozptylu dat. Zajímavý je ale přelom století. NAO je v obdobích na konci 19. století módem nejsilnějším, který vysvětluje přes 16 % rozptylu. Korelace s mapou, která zachycuje celé období, jsou podle očekávání nejvyšší pro úseky, které jsou zhruba ve středu analyzovaného období. Naopak úseky na začátku a na konci reanalýzy mají shodu nižší. Zajímavý je i náhlý propad korelací v úseku 1924 – 1963 (příloha 1).

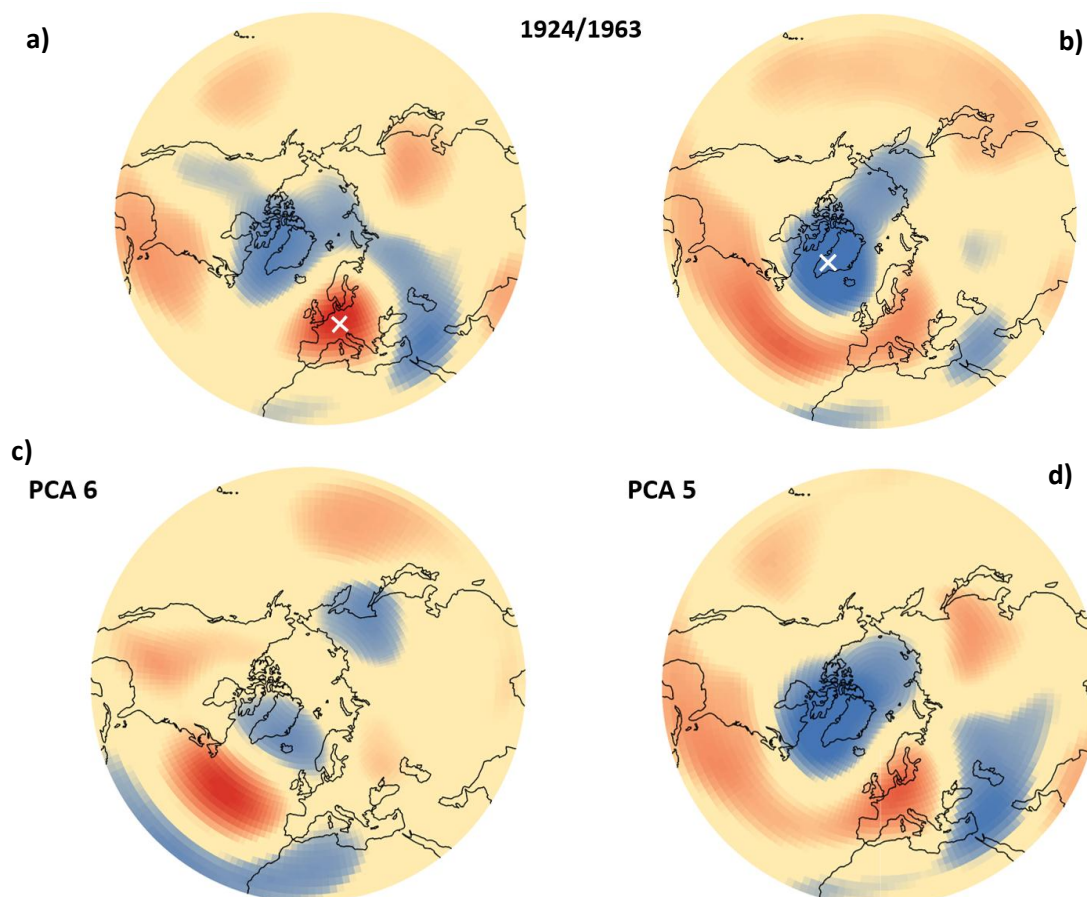
Od předchozího i následujícího úseku jsou centra NAO (1924–1963) posunuta a liší se i intenzita (obr. 3). Centrum nad Azorskými ostrovy zcela chybí, naopak centrum nad Evropou je intenzivnější. Změnilo se i centrum nad Grónskem, které je posunuto více na západ. Data, pro která byly módy počítány, jsou přitom téměř totožná a liší se vždy jen ve dvou letech.



Obrázek 3: Geografické rozložení módů automaticky určených jako NAO v úsecích 1922/1961, 1924/1963 a 1926/1965.

Mód, který byl v úseku 1924–1963 automaticky označen jako NAO, přitom nepopisuje severoatlantickou oscilaci. Toto tvrzení dokládá dvojice korelačních map, které byly spočítány pro gridový bod s nejvyšší korelací v centru nad Evropou (obr. 4 a) a pro bod s nejnižší korelací v centru nad Grónskem (obr. 4 b). Výsledné mapy se přitom liší. Zatímco korelační mapa pro bod nad Grónskem skutečně popisuje strukturu podobnou NAO, mapa pro bod nad Evropou spíše připomíná mód euroasijský. V tomto případě tak mód určený jako NAO pro úsek 1927-1963 nepopisuje skutečnou dálkovou vazebnost center.

Příčina přítom může být v celkovém počtu výsledných módů. Zdá se, že v úseku 1924-1963 byla severoatlantická oscilace rozdělena do dvou samostatných módů - 5. a 6. nejsilnějšího (obr. 4 c,d). Mapa c) totiž popisuje chybící vazebnost mezi centry nad Grónskem a Azorskými ostrovy. V tomto případě je tak pravděpodobné, že počet adekvátních módů



bude jiný než 8.

Obrázek 4: Korelační mapy pro body a) s nejvyšší a b) nejnižší hodnotou korelace v módu označeném jako NAO v úseku 1924-1963 d). Šestý nejsilnější mód v úseku 1924-1963 c).

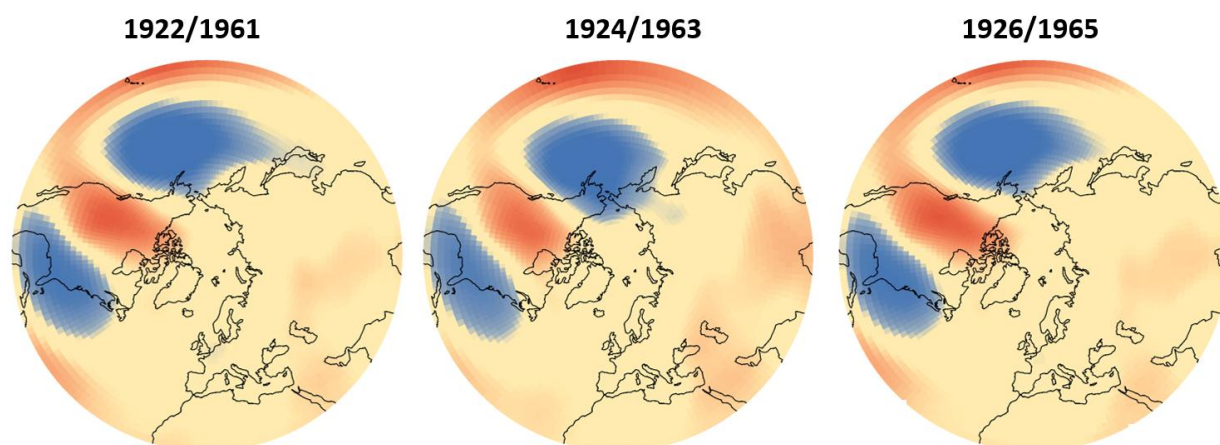
4 PNA

Pro většinu úseků ve 20. století zůstává pacificko-severoamerický mód první nebo druhý nejsilnější (příloha 2). V průměru mód vysvětluje mezi 12 a 14 % rozptylu dat. Stejně jako u NAO je i v tomto případě přítomný výrazný zlom na přelomu století. Mód se stává až 5. nejsilnějším s celkovým vysvětleným rozptylem kolem 9 %. Geografická poloha center se v průběhu 20. století mění spíše jen nepatrně. Jednotlivé posuny nejsou statisticky významné. Naopak výrazně odlišný je mód v úsecích, které popisují konec 19. a začátek 20. století. Intenzita center je nad jihovýchodem a nad severozápadem Severní Ameriky výrazně slabší.

Naopak centrum nad Tichým oceánem je rozsáhlejší, výraznější a pozorován je i statisticky významný posun centra k jihu. Posun je tak výrazný, že centra nad Pacifikem v období kolem přelomu století leží v oblastech nulových korelací v období druhé poloviny 20. století. Mód tak vykazuje rysy západo-pacifické oscilace.

Změna v podobě výrazně slabšího módu na přelomu století je ale příliš velká na to, aby odrážela skutečné změny v atmosférické cirkulaci (u evropských a euroasijských módů tak výrazná změna nenastala). Mnohem pravděpodobněji se tak jedná o vlastnost datového souboru. Ten totiž vznikl asimilací pouze přízemních pozorování, kterých bylo na konci 19. století v Severní Americe k dispozici jen omezené množství, zejména v odlehlých oblastech Kanady a Aljašky (Compo et al. 2011). Obecně více historických pozorování pochází z Evropy a pravděpodobně proto jsou evropské a euroasijské módy na konci 19. a na začátku 20. století dominantní. Právě NAO je v tomto období nejsilnější s výrazně vyšším podílem vysvětleného rozptylu variability než v průběhu 20. století. Naopak význam PNA je nižší.

I v případě PNA dochází k náhlým propadům korelací (módů určených jako PNA s mapou, která zahrnuje celé období). Stejně jako u NAO se jedná o úsek 1924-1963 a zároveň i o úsek 1906-1945 (příloha 2). Geografické rozdíly ale nejsou tak velké jako v případě severoatlantické oscilace (obr. 5). Přesto centrum nad Tichým oceánem je v úseku 1924-1963 posunuto k severu. O něco slabší je i centrum nad severozápadem Severní Ameriky. Naopak centrum nad jihovýchodem USA se liší jen nepatrně. V tomto případě je geografické rozložení center velmi podobné úseku předcházejícímu i následujícímu a mód, který byl automaticky označen jako PNA, skutečně popisuje dálkovou vazebnost. Velmi



podobná je pak i situace pro úsek 1906-1945.

Obrázek 5: Geografické rozložení módů automaticky určených jako PNA v úsecích 1922/1961, 1924/1963 a 1926/1965.

5 Závěr

Pomocí klouzavé analýzy hlavních složek byly popsány změny geografické polohy a intenzity center NAO a PNA během 20. století. Hlavní výsledky jsou následující:

- Datové soubory reanalýzy 20th Century 20CRv2 jsou na konci 19. a na začátku 20. století výrazně ovlivněny nedostatkem asimilovaných pozorování z odlehlých a hornatých míst. Módy proměnlivosti jsou v těchto oblastech výrazně slabší. Menší je i geografická rozloha center. Naopak dominantní se stávají módy proměnlivosti nad Evropou. Změny pozorované právě v období přelomu století tak nerepresentují reálné změny v cirkulaci atmosféry na severní polokouli. Přestože je reanalýza založená na asimilaci reálných pozorování, datové soubory z vyšších hladin atmosféry mohou být výrazně ovlivněny množstvím a nerovnoměrným rozložením pozorovaných dat. Proto může být zavádějící použití módů proměnlivosti z reanalýzy 20th Century v období přelomu 19. a 20. a na začátku 20. století jako referenčních hodnot při porovnávání modelových výsledků (Chen et al. 2017, Yi et al. 2018).
- Centra NAO se během 20. století nepatrně přesouvaly k východu. Naopak centra PNA ve stejném období spíše jen oscilují kolem jejich geografického průměru.
- Geografické rozložení center jednotlivých módů je velmi citlivé na zvolený časový úsek. I malá změna v datovém souboru může znamenat velké rozdíly ve výsledcích. Zároveň se ukazuje, že analýza je citlivá i na celkový počet módů. K jednotlivým úsekům je tak třeba přistupovat samostatně a počet módů určovat zvlášť.
- Je nutné provést srovnání s dalšími reanalýzami jako třeba ERA-20C, které by mohlo pomoci identifikovat, které změny jsou způsobeny reálnými změnami v cirkulaci, a které změny jsou naopak odrazem vlastností datového souboru.

Poděkování. Studie byla podpořena Grantovou Agenturou Univerzity Karlovy, projekt 426216.

6 Zdroje

- Chen, Z., Gan, B., Wu, L., Jia, F., 2018. Pacific-North American teleconnection and North Pacific Oscillation: historical simulation and future projection in CMIP5 models. *Climate Dynamics* 50, 4379–4403. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3881-9>
- Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M.C., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugeri, M., Mok, H.Y., Nordli, ø., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D., Worley, S.J., 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 1–28. <https://doi.org/10.1002/qj.776>
- Ding, Q., Schweiger, A., L'Heureux, M., Battisti, D.S., Po-Chedley, S., Johnson, N.C., Blanchard-Wrigglesworth, E., Harnos, K., Zhang, Q., Eastman, R., Steig, E.J., 2017. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice. *Nature Climate Change* 7, 289–295. <https://doi.org/10.1038/nclimate3241>
- Francis, J.A., Vavrus, S.J., 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes: ARCTIC LINKS TO MID-LATITUDE WEATHER. *Geophysical Research Letters* 39, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2012GL051000>
- Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A., Peterson, T., 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19, 193–212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
- Hannachi, A., Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B., 2007. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology* 27, 1119–1152. <https://doi.org/10.1002/joc.1499>
- He, J., Soden, B.J., 2015. Anthropogenic Weakening of the Tropical Circulation: The Relative Roles of Direct CO₂ Forcing and Sea Surface Temperature Change. *Journal of Climate* 28, 8728–8742. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0205.1>
- Jackson, J.E., 1991. A user's guide to principal components, Wiley series in probability and mathematical statistics. Wiley, New York.
- Jolliffe, I.T., 2002. Principal component analysis, 2nd ed. ed, Springer series in statistics. Springer, New York.
- Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Whitlow, S., Twickler, M.S., Morrison, M.C., Bloomfield, P., Bond, G.C., Alley, R.B., Gow, A.J., Meese, D.A., Grootes, P.M., Ram, M., Taylor, K.C., Wumkes, W., 1994. Changes in Atmospheric Circulation and Ocean Ice Cover over the North Atlantic During the Last 41,000 Years. *Science* 263, 1747–1751. <https://doi.org/10.1126/science.263.5154.1747>
- Overland, J.E., Wang, M., 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 62, 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x>
- Pedersen, R.A., Cvijanovic, I., Langen, P.L., Vinther, B.M., 2016. The Impact of Regional Arctic Sea Ice Loss on Atmospheric Circulation and the NAO. *Journal of Climate* 29, 889–902. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0315.1>

- Richman, M.B., 1986. Rotation of principal components. *Journal of Climatology* 6, 293–335. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>
- Screen, J.A., Simmonds, I., 2010. Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification: INCREASING ARCTIC OCEAN HEAT LOSS. *Geophysical Research Letters* 37, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL044136>
- Vavrus, S., Walsh, J.E., Chapman, W.L., Portis, D., 2006. The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming. *International Journal of Climatology* 26, 1133–1147. <https://doi.org/10.1002/joc.1301>
- Wallace, J.M., Gutzler, D.S., 1981. Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review* 109, 784–812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)
- Wilks, D.S., 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier/Academic Press, Amsterdam [u.a.
- Yi, D.L., Gan, B., Wu, L., Miller, A.J., 2018. The North Pacific Gyre Oscillation and Mechanisms of Its Decadal Variability in CMIP5 Models. *Journal of Climate* 31, 2487–2509. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0344.1>

7 Přílohy

- Příloha 1 Animace módů proměnlivosti určených jako NAO. Graf zachycuje vývoj korelací map jednotlivých 40 letých úseků s mapou, která byla spočtena pro celé období 1871-2011. Zároveň graf ukazuje pořadí jednotlivých módů a vysvětlený rozptyl. Animace plyne směrem do minulosti proto, že módy druhé poloviny 20. století lze jednoduše identifikovat a porovnat s módy jiných reanalýz.
- Příloha 2 Stejně jako příloha 1, ale pro mód PNA.