

Auftragnehmer: Goethe-Universität Frankfurt



Blockierende Wetterlagen in CMIP6-Klimaprojektionen für Hessen

- Anhang zum Abschlussbericht -

Laufzeit: 01.09.2019-31.08.2023

Projektleitung: Prof. Dr. Bodo Ahrens

Projektbearbeitung: M.Sc. Richard Lohmann

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung
im Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung

Frankfurt am Main, im Mai 2024

Anhangsverzeichnis

A	Identifikation blockierender Wetterlagen	8
B	Reanalysedaten	16
C	Saisonale Trends der <i>blocking</i>-Frequenz	17
D	Entstehung und Erhaltung blockierender Wetterlagen.....	23
E	Blockierende Wetterlagen in CMIP6-Simulationen.....	24
F	Beziehungen zwischen großskaligen Treibern und blockierenden Wetterlagen	31
a	Atlantische Multidekadenvariabilität (AMV) und blockierende Wetterlagen.....	32
b	SST-Anomalien im Atlantischen Erwärmungsloch und blockierende Wetterlagen.....	36
c	Saisonale Schnee- und Eisbedeckung und blockierende Wetterlagen	48
G	Klimaextreme und blockierende Wetterlagen	60
a	Kontingenztabellen und Heidke-Skill-Score.....	60
b	Temperaturextreme und blockierende Wetterlagen	61
c	Niederschlagsextreme und blockierende Wetterlagen	62
d	Flauten und blockierende Wetterlagen	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines potentiellen <i>blocks</i>	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kombination der als <i>block</i> ausgewiesenen Flächen des HGHA-Index und des DAV12 zum HGHA-DAV12. Links oben: HGHA-Index; rechts oben: DAV12; unten: HGHA-DAV12. Abbildung aus Richling (2020).	10
Abbildung 3: Räumliche Verteilungen der <i>blocking</i> -Frequenz in ERA-20C berechnet mit den Indizes von DAV12 (a), HGHA-DAV12 (b), Schwierz (c) und Masato (d).....	12
Abbildung 4: Mittlere <i>blocking</i> -Frequenz im Zeitraum 1961-2010 in ERA-20C (links) und ERA5 (rechts) auf Basis des Schwierz-Index.	13
Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der <i>blocking</i> -Frequenz in den Reanalysen in Mitteleuropa (45°-60°N, 0°-20°O) mit Schwierz-Index.	13
Abbildung 6: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in Osteuropa in ERA-20C (1900-2010) für Schwierz-Index (links) und HGHA-DAV12 (rechts). Das Jahr 2010 stellt somit den letzten Wert der Zeitreihe dar. Die rote Linie ist die für den Sommer relevante.	14
Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung der <i>blocking</i> -Frequenz in der ERA-20C-Reanalyse in Mitteleuropa (45°-60°N, 0°-20°O) mit Masato-Index.....	15
Abbildung 8: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in Grönland in ERA-20C (1900-2010) für Masato-Index (links) und HGHA-DAV12 (rechts). Das Jahr 2010 stellt somit den letzten Wert der Zeitreihe dar. Die blaue Linie ist die für den Winter relevante.....	15
Abbildung 9: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von DAV12 in ERA-20C. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.....	17
Abbildung 10: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von DAV12 in 20CR im Mittel der Ensemble-Member. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.....	18
Abbildung 11: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von DAV12 in ERA5. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.	19
Abbildung 12: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von HGHA-DAV12 in ERA-20C. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.....	20
Abbildung 13: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von HGHA-DAV12 in 20CR im Mittel der Ensemble-Member. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.	21
Abbildung 14: Saisonale Trends der <i>blocking</i> -Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von HGHA-DAV12 in ERA5. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.....	22
Abbildung 15: Abweichung der <i>blocking</i> -Frequenz im Jahresmittel in allen CMIP6-Simulationen vom Mittel der 25 betrachteten Realisierungen der 20CR-Reanalyse im Zeitraum 1900-2010.....	25
Abbildung 16: Abweichung der <i>blocking</i> -Frequenz im Jahresmittel in allen CMIP6-Simulationen von der ERA5-Reanalyse im Zeitraum 1961-2010.	26
Abbildung 17: Änderung der <i>blocking</i> -Frequenz im Mittel des CMIP6-Ensembles zwischen den Zeiträumen 2051-2100 im SSP5-8.5-Szenario und 1961-2010 im ganzen Jahr (a), Winter (b) und Sommer (c). Punkte	

kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	27
Abbildung 18: Änderung der <i>blocking</i> -Frequenz zwischen den Zeiträumen 2051-2100 im SSP5-8.5-Szenario und 1961-2010 im Jahresmittel in allen CMIP6-Simulationen.....	28
Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung der <i>blocking</i> -Frequenz in verschiedenen Regionen im europäisch-atlantischen Raum für das CMIP6-Ensemblemittel im SSP5-8.5-Szenario (rot), und die Bandbreite des Ensembles (grau). (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.....	29
Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung der Anzahl der <i>blocking</i> -Ereignisse pro Jahr (a), der mittleren Dauer (b) und der mittleren räumlichen Ausdehnung der <i>blocking</i> -Ereignisse pro Jahr (c) für das CMIP6-Ensemblemittel im SSP5-8.5-Szenario (rot), und die Bandbreite des Ensembles (grau). Es wurden alle <i>blocks</i> in der Region zwischen 45° und 75°N sowie 60°W und 60°O berücksichtigt.	29
Abbildung 21: Boxplots der <i>blocking</i> -Trends (jährliche, winterliche und sommerliche Trends) in den Regionen in den Simulationen des CMIP6-Ensembles im Szenario SSP5-8.5. Die drei horizontalen Linien zeigen das erste und dritte Quartil, sowie den Median. Striche zeigen den Ensemble-Range, sind aber auf das 1,5-fache des Interquartilsabstands begrenzt. Trendwerte außerhalb dieses Bereichs sind durch Punkte gekennzeichnet.	30
Abbildung 22: Differenz der Winter- <i>blocking</i> -Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger AMV (1961-2010) in ERA5 und ausgewählten CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	32
Abbildung 23: Differenz der Winter- <i>blocking</i> -Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger AMV (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.....	34
Abbildung 24: Differenz der Winter- <i>blocking</i> -Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger AMV (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	35
Abbildung 25: SST-Trends in Nordhemisphäre (1900-2010) in ERA-20C und ausgewählten CMIP6-Simulationen.....	38
Abbildung 26: Differenz der Winter- <i>blocking</i> -Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs (gekennzeichnet durch die Box in der linken oberen Abbildung) im Dezember (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	39
Abbildung 27: Differenz der Winter- <i>blocking</i> -Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Dezember (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	41
Abbildung 28: Differenz der Frühlings- <i>blocking</i> -Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im März (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.....	42
Abbildung 29: Differenz der Sommer- <i>blocking</i> -Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Juni (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.....	43

Abbildung 30: SST-Trends in Nordhemisphäre (2015-2100), hochgerechnet auf 100 Jahre im SSP5-8.5-Szenario in ausgewählten CMIP6-Simulationen.	44
Abbildung 31: Differenz der Winter-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Dezember (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	45
Abbildung 32: Differenz der Frühlings-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im März (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	46
Abbildung 33: Differenz der Sommer-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Juni (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	47
Abbildung 34: Differenz der Frühlings-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Schneebedeckung in Eurasien (40°-80°N, 0°-120°O, gekennzeichnet durch die Box in der linken oberen Abbildung) im März (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	48
Abbildung 35: Differenz der Frühlings-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Schneebedeckung in Eurasien im März (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	50
Abbildung 36: Differenz der Frühlings-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Schneebedeckung in Eurasien im März (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	51
Abbildung 37: Differenz der <i>blocking</i>-Frequenz der Monate Januar bis März zwischen Jahren mit großen und kleinen Unterschieden der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals (55°-70°N, 65°-115°O - 50°-60°N, 30°-60°O, gekennzeichnet durch die beiden Boxen in der linken oberen Abbildung) im November (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	52
Abbildung 38: Differenz der <i>blocking</i>-Frequenz der Monate Januar bis März zwischen Jahren mit großen und kleinen Unterschieden der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals (55°-70°N, 65°-115°O - 50°-60°N, 30°-60°O) im November (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	54
Abbildung 39: Differenz der <i>blocking</i>-Frequenz der Monate Januar bis März zwischen Jahren mit großen und kleinen Unterschieden der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals (55°-70°N, 65°-115°O - 50°-60°N, 30°-60°O) im November (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	55
Abbildung 40: Differenz der Sommer-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Eisbedeckung in der Barents-Karasee (68°-85°N, 25°-100°O, gekennzeichnet durch Box in der linken oberen Abbildung) in den Monaten März bis Mai (1961-2010) in ERA5 und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	56
Abbildung 41: Differenz der Sommer-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Eisbedeckung in der Barents-Karasee (68°-85°N, 25°-100°O) in den Monaten März bis Mai (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.	58

Abbildung 42: Differenz der Sommer-<i>blocking</i>-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Eisbedeckung in der Barents-Karasee (68°-85°N, 25°-100°O) in den Monaten März bis Mai (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.....	59
Abbildung 43: Ausschnitt, in dem untersucht wurde, ob bei Hitzewellen im Sommerhalbjahr <i>blocking</i> vorliegt.	62
Abbildung 44: Ausschnitt, in dem untersucht wurde, ob bei Hitzewellen im Winterhalbjahr <i>blocking</i> vorliegt.	62
Abbildung 45: 99,9. Perzentil der täglichen Niederschlagsmenge in ERA5 (a), ERA-20C (b), 20CR (c) und CCLM-EC-Earth3-Veg (d). Der Punkt in a kennzeichnet den Ort, für den die zeitliche Entwicklung der Starkregen-Tage untersucht wurde.....	63
Abbildung 46: Ausschnitte, in denen untersucht wurde, ob bei Starkregen <i>blocking</i> vorliegt.	64
Abbildung 47: Ausschnitte, in denen untersucht wurde, ob bei Vb-Tiefs <i>blocking</i> vorliegt.	64
Abbildung 48: 5. Perzentil der Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe in ERA5 (a), ERA-20C (b), 20CR (c) und CCLM-EC-Earth3-Veg (d). Der Punkt in a kennzeichnet den Ort, für den die zeitliche Entwicklung der Flaute-Tage untersucht wurde.....	65
Abbildung 49: Ausschnitt, in dem untersucht wurde, ob bei Flauten <i>blocking</i> vorliegt.....	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Reanalyseprodukte	16
Tabelle 2: Übersicht der verwendeten CMIP6-Modelle.....	24
Tabelle 3: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der <i>blocking</i> -Frequenz im Winter in Abhängigkeit der AMV-Phase zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.	34
Tabelle 4: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der <i>blocking</i> -Frequenz im Winter in Abhängigkeit der SST-Anomalien im Erwärmungsloch zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.	41
Tabelle 5: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der <i>blocking</i> -Frequenz im Frühling in Abhängigkeit der Eurasischen Schneebedeckung im März zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.	50
Tabelle 6: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der <i>blocking</i> -Frequenz im Winter in Abhängigkeit der November-Schneebedeckung westlich und östlich des Urals zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.	54
Tabelle 7: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der <i>blocking</i> -Frequenz im Sommer in Abhängigkeit der Frühlings-Eisbedeckung in der Barents-Karasee zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.	58
Tabelle 8: Schema einer Kontingenztabelle.	60
Tabelle 9: Kontingenztabelle für das Auftreten von <i>blocking</i> und Hitzewellen im Sommerhalbjahr (April-September, 1961-2010) in ERA5.	61
Tabelle 10: Übersicht über die bedingten Häufigkeiten bei Flauten in der Mitte Deutschlands im CMIP6-Szenario SSP5-8.5 (2051-2100).	66

A Identifikation blockierender Wetterlagen

In diesem Kapitel des Anhangs werden verschiedene Indizes zur Identifikation von blockierenden Wetterlagen (kurz: *blocking*) vorgestellt. Für die Indizes, die im Haupttext dieses Berichts nicht diskutiert werden, werden hier einige Ergebnisse gezeigt. Anhand dieser Ergebnisse wird aufgezeigt, warum diese Indizes nicht näher untersucht wurden.

Index von Tibaldi und Molteni sowie Davini (DAV12)

In der Literatur wird zur Identifikation blockierender Wetterlagen häufig der Index nach Tibaldi und Molteni (1990) verwendet. Dieser berechnet für eine festgelegte geographische Breite den meridionalen Gradienten der geopotentiellen Höhe im 500 hPa Druckniveau. Ausgehend von der geographischen Breite ϕ_M wird der Gradient nach Norden (GHGN) berechnet aus

$$GHGN = Z(\phi_N) - Z(\phi_M) / (\phi_N - \phi_M),$$

der nach Süden (GHGS) aus

$$GHGS = Z(\phi_M) - Z(\phi_S) / (\phi_M - \phi_S).$$

Typischerweise werden die Gradienten als Differenz der geopotentiellen Höhen über 15 Breitengrade bestimmt. Ein *block* liegt vor, wenn $GHGS > E_{min}$ und $GHGN < W_{min}$. Typischerweise werden die Schwellwerte festgesetzt zu $W_{min} = -10 \text{ m/}^\circ$ und $E_{min} = 0 \text{ m/}^\circ$. Diese Bedingungen bedeuten, dass auf der Nordseite des *block* die Westkomponente des geostrophischen Winds größer als ca. 8 m/s ist und auf der Südseite des *block* der Wind aus Osten kommt. Zusätzlich wurde nach Davini et al. (2012) noch ein drittes Kriterium für einen zweiten Gradienten auf der Südseite des Hochdruckgebiets festgelegt, um eine Detektion des subtropischen Hochdruckgürtels als *block* zu verhindern. Da der subtropische Hochdruckgürtel, dem Sonnenstand folgend, sich im Sommer nach Norden ausdehnt, würde der Hochdruckgürtel ohne das zusätzliche Kriterium von Davini als *block* erkannt werden. Da es sich hierbei aber um ein jahreszeitlich bedingt regelmäßig auftretendes Phänomen und nicht um eine Druckanomalie wie ein *block* in mittleren Breiten handelt, soll der Algorithmus den subtropischen Hochdruckgürtel nicht als *block* detektieren. Das zusätzliche Kriterium von Davini umfasst das Gebiet 15° südlich von ϕ_S und ist durch

$$GHGS_2 = Z(\phi_S) - Z(\phi_{S_2}) / (\phi_S - \phi_{S_2})$$

definiert, wobei $\phi_{S_2} = \phi_S - 15^\circ$. Für das dritte Kriterium gilt $GHGS_2 < W_{min_2}$. Der Schwellwert nach Davini ist $W_{min_2} = -5 \text{ m/}^\circ$. Dies bedeutet, dass südlich von ϕ_S ausreichend starker Westwind vorherrscht.

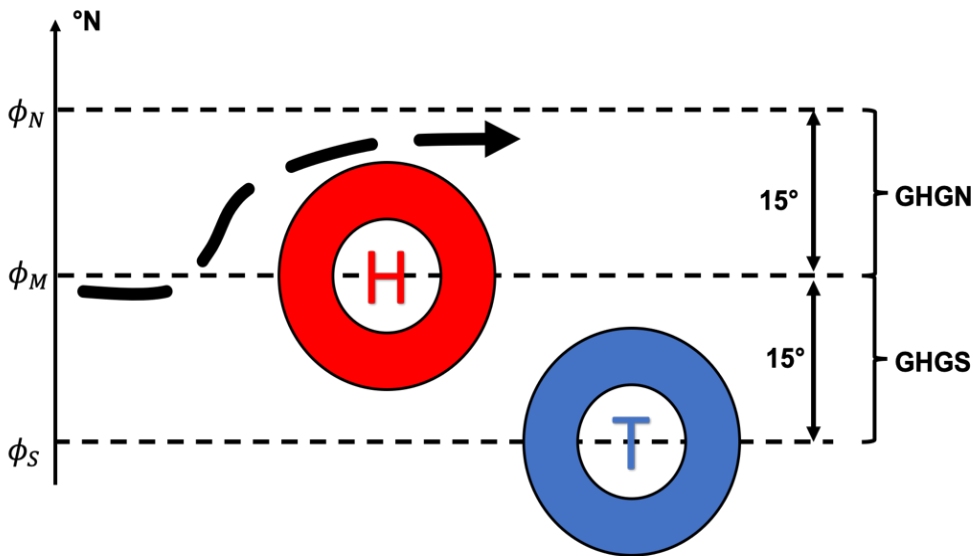


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines potentiellen blocks.

Somit lässt sich für jeden geographischen Punkt auf dem Breitenkreis ϕ_M ermitteln, ob ein instantaner *block* vorliegt oder nicht. In der 2D-Erweiterung von Barnes et al. (2006), Scherrer et al. (2012) und Davini et al. (2012) wird die Berechnung des Gradienten nicht nur für eine geographische Breite, sondern für ein Intervall von Breiten durchgeführt. Die Werte für ϕ_N , ϕ_M und ϕ_S werden erweitert mittels

$$\begin{aligned}\phi_N &= \phi_C + \delta_\phi, \\ \phi_M &= \phi_C, \\ \phi_S &= \phi_C - \delta_\phi,\end{aligned}$$

wobei ϕ_C zwischen 30°N und 75°N variiert und $\delta_\phi = 15^\circ$. Nach Davini et al. (2012) liegt ein instantaner *block* vor, wenn die Kriterien für GHGN, GHGS und GHGS₂ erfüllt sind. Dies kennzeichnet den *blocking*-Index DAV12.

Erweiterung des Index von Davini (HGHA-DAV12)

Ein Nachteil des Index von Davini besteht darin, dass die Gebiete am Rand eines Hochdruckgebiets, die nur schwache meridionale Gradienten haben, nicht als Teil eines *blocks* erkannt werden. Diesem Defizit wird entgegengewirkt, indem der DAV12 mit dem *High Geopotential Height Area* (HGHA)-Index kombiniert wird. Zu der Berechnung des in Richling (2020) beschriebenen, sogenannten HGHA-Index wird ebenfalls die geopotentielle Höhe in 500 hPa angewendet. Das Kriterium für das Vorliegen eines instantanen *blocks* nach dem HGHA-Index an einem geografischen Punkt ist nach Gessner (2018)

$$Z(\lambda, \phi) > \overline{Z(\lambda, \phi)} + \sigma_Z(\lambda, \phi) .$$

Hierbei sind λ die geographische Länge, ϕ die geographische Breite, \overline{Z} das klimatologische Mittel der geopotentiellen Höhe und σ_Z die Standardabweichung der geopotentiellen Höhe. Dabei ist zu beachten, dass der HGHA-Index alleine nicht ausreichend ist, um blockierende Wetterlagen zu erkennen. In Kombination mit dem DAV12 ist es jedoch möglich, die Ausdehnung der Antizyklone zu erfassen. Die Kombination der beiden Indizes besteht somit aus folgenden Schritten (Richling, 2020):

1. Berechnung des DAV12
2. Berechnung des HGHA-Index
3. Berechnung der räumlichen Ausdehnung der Überlappung instantan blockierter Flächen von beiden Indizes

4. Überprüfung, ob der Überlapp eine Fläche von mindestens $1,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ bedeckt. Ist diese Bedingung erfüllt, ist die komplette Fläche des *blocks* aus dem HGHA-Index ein *block* beim HGHA-DAV12.

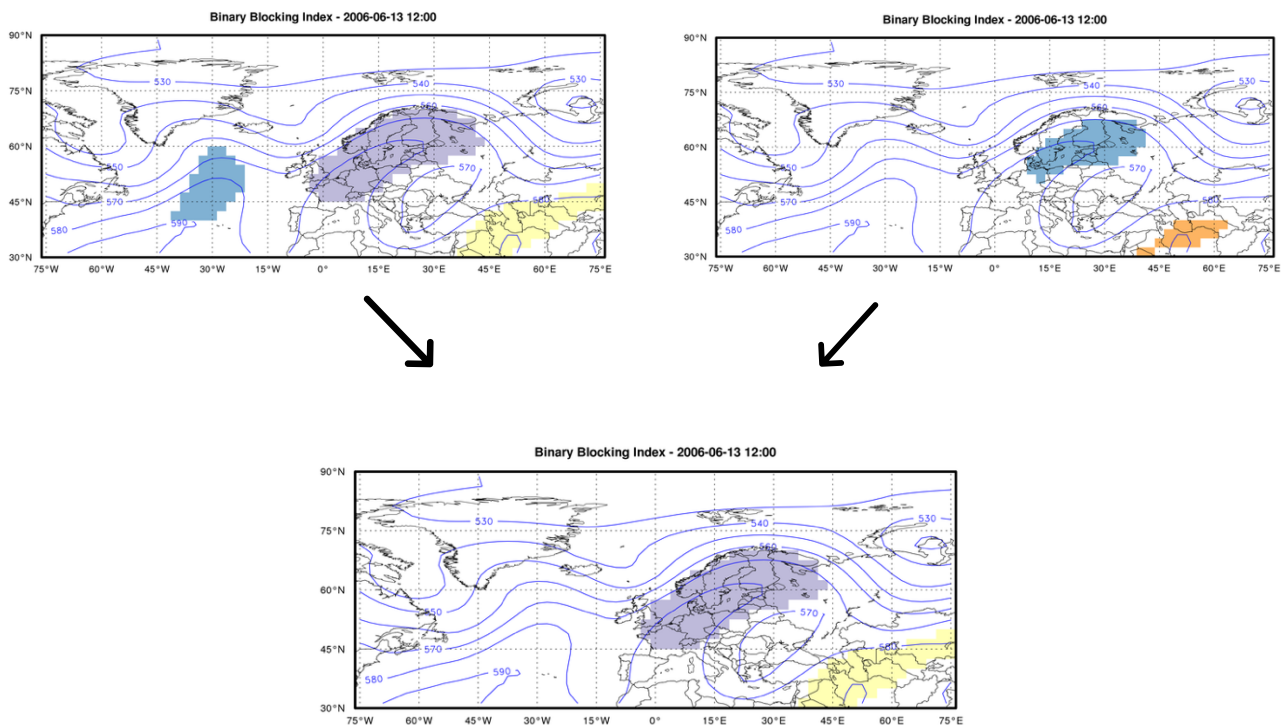


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kombination der als *block* ausgewiesenen Flächen des HGHA-Index und des DAV12 zum HGHA-DAV12. Links oben: HGHA-Index; rechts oben: DAV12; unten: HGHA-DAV12. Abbildung aus Richling (2020).

Außerdem ist es wichtig, bei der Berechnung des HGHA-Index den globalen Positvtrend der geopotentiellen Fläche herauszurechnen, der aus dem globalen Erwärmungstrend resultiert. Dies geschieht, indem für den Mittelwert eine gleitende Klimatologie verwendet wird. Ohne Herausrechnen des Positvtrends würden die Zeitserien der *blocking*-Frequenz von thermischen Effekten dominiert werden und dynamisch bedingte Änderungen (Änderungen der Zirkulationsmuster) könnten nicht mehr identifiziert werden. Für die Standardabweichung wird dagegen ein fester Referenzzeitraum (hier: 1981-2010) verwendet, da angenommen wird, dass Änderungen der Standardabweichung eine veränderte Häufigkeit der Variabilität von Zirkulationsmustern und somit von blockierenden Wetterlagen ausdrücken. Nach der Berechnung der instantanen *blocks* wird eine zeitlich-räumliche Filterung angewendet, um kurzlebige und kleinräumige Hochdruckgebiete, die in der Regel nicht mit Extremereignissen in Verbindung stehen, auszuschließen. Diese Filterung wird bei allen Indizes angewendet. Die minimale räumliche Ausdehnung hängt vom Index ab, die minimale Dauer ist 5 Tage unabhängig vom Index. Instantane *blocks*, die nicht herausgefiltert werden, werden nach dem Filtern als *blocks* bezeichnet.

Masato-Index

Um den Index von Masato et al. (2012) für eine festgelegte geographische Breite zu berechnen, wird der mittlere polwärtige Gradient der potentiellen Temperatur auf dem 2PVU-Level (dynamische Tropopause) verwendet. Ein *block* liegt an einem Gitterpunkt i vor, wenn folgendes Kriterium erfüllt ist:

$$B_i = \bar{\theta}_i^n - \bar{\theta}_i^s > 0$$

Die mittlere potentielle Temperatur nördlich ($\bar{\theta}_i^n$) und südlich ($\bar{\theta}_i^s$) des Gitterpunktes berechnet sich dabei mittels

$$\bar{\theta}_i^n = \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0}^{\phi_0+\Delta\phi/2} \theta_i d\phi, \quad \bar{\theta}_i^s = \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0-\Delta\phi/2}^{\phi_0} \theta_i d\phi.$$

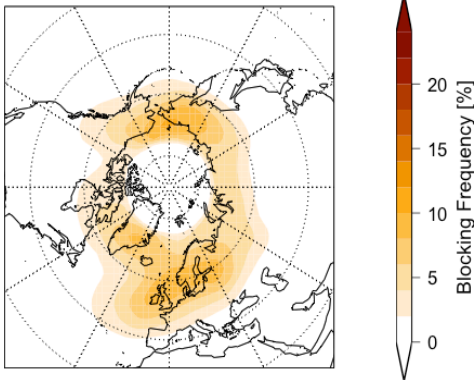
Schwierz-Index

Der Index von Schwierz et al. (2004) erfasst *blocks* als Gebiete mit niedriger potentieller Vorticity (PV) in der oberen Troposphäre. Dazu werden die Abweichungen der mittleren PV zwischen 500 hPa und 150 hPa vom klimatologischen Mittel betrachtet. Alternativ können auch die 315 K und 330 K Isentropen verwendet werden. Ein *block* liegt vor, wenn folgendes Kriterium erfüllt ist:

$$PV - \overline{PV} < -1,2 PVU$$

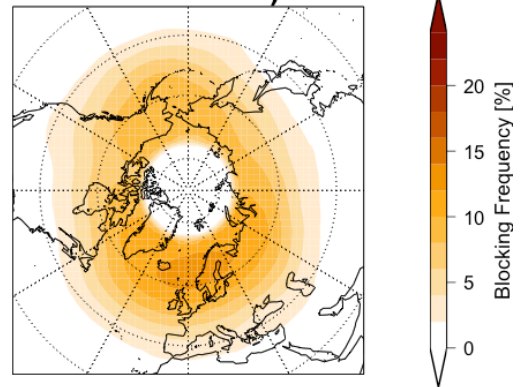
Im Folgenden wird die räumliche Verteilung der *blocking*-Frequenz (Anteil der Tage, an denen ein *block* vorliegt) für alle 4 Indizes, angewendet auf die ERA-20C-Reanalyse, gezeigt, um einen Überblick über die Unterschiede zu bekommen (Abbildung 3). Es werden räumliche Verteilungen der *blocking*-Frequenz zwischen 30°N und 75°N gezeigt. Somit bleiben die Gebiete nördlich und südlich dieses Bereichs weiß, auch wenn dort blockierende Wetterlagen auftreten können. Für die Gebiete südlich von 30°N liegen keine Daten vor, da die *blocking*-Frequenz nur für Breitengrade nördlich von 30°N berechnet wird. Da der Fokus auf blockierenden Wetterlagen in mittleren Breiten liegt, werden analog zu Davini und D'Andrea (2020) die hohen Breiten nördlich von 75°N ebenfalls nicht betrachtet. Anschließend werden die für den Schwierz- und den Masato-Index erhaltenen Ergebnisse noch etwas ausführlicher beschrieben. Die Ergebnisse für den DAV12 und HGHA-DAV12 werden im Hauptteil des Berichts ausführlich beschrieben.

ERA-20C (DAV12, 1961-2010)



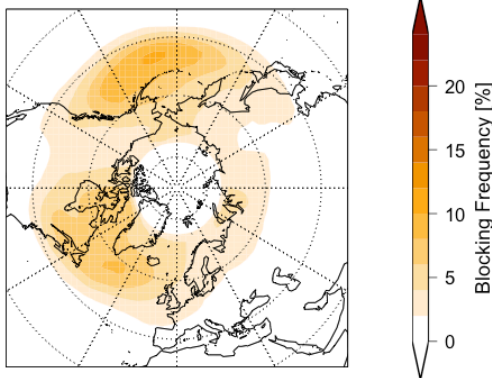
a)

ERA-20C (HGHA-DAV12, 1961-2010)



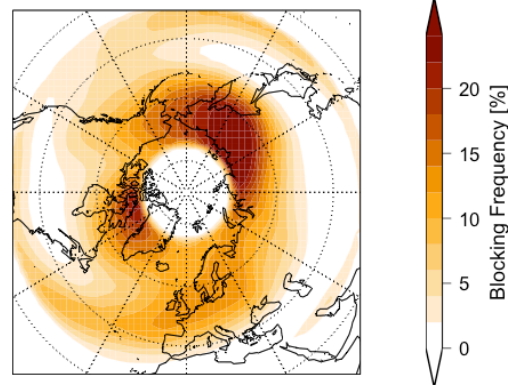
b)

ERA-20C (Schwierz, 1961-2010)



c)

ERA-20C (Masato, 1961-2010)



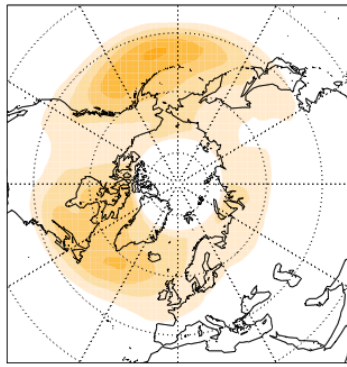
d)

Abbildung 3: Räumliche Verteilungen der *blocking*-Frequenz in ERA-20C berechnet mit den Indizes von DAV12 (a), HGHA-DAV12 (b), Schwierz (c) und Masato (d).

Schwierz-Index

Im Folgenden werden die *blocking*-Klimatologien auf Basis des Index von Schwierz et al. (2004) präsentiert. Der Index wurde für alle drei Reanalysen auf Isentropen (315 und 330 K) berechnet. Bei der 20CR-Reanalyse besteht allerdings das Problem, dass die potentielle Vorticity nur auf den 300 K-, 330 K- und 350 K-Isentropen verfügbar ist. Deshalb wurde diese Reanalyse hier nicht untersucht. Betrachtet man die räumliche Verteilung der langjährigen Mittelwerte der *blocking*-Frequenz (Abbildung 4), fällt auf, dass die räumliche Verteilung zwischen ERA5 und ERA-20C zwar konsistent ist, bei ERA5 aber nahezu im kompletten Untersuchungsgebiet der Nordhemisphäre die *blocking*-Frequenz um ca. 5% höher ist. Betrachtet man die Zeitserie für Mitteleuropa (Abbildung 5), kann man erkennen, dass dies auf systematische Abweichungen zurückzuführen ist. Eine weitere Auffälligkeit liegt darin, dass über Eurasien die *blocking*-Frequenzen sehr niedrig sind. Dies trifft insbesondere auf die ERA-20C-Reanalyse mit Werten, die verbreitet deutlich unter 5% liegen, zu. Aber auch in ERA5 sind die Werte in Mittel- und Osteuropa mit weniger als 5% sehr niedrig.

ERA-20C (Schwierz, 1961-2010)



ERA5 (Schwierz, 1961-2010)

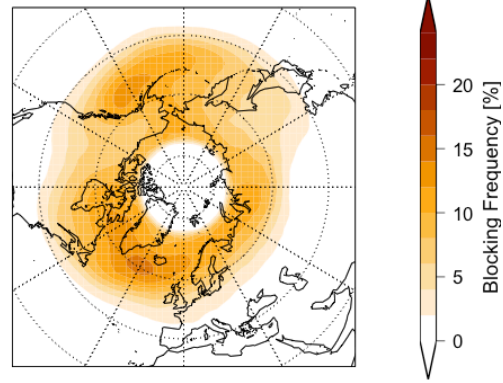


Abbildung 4: Mittlere *blocking*-Frequenz im Zeitraum 1961-2010 in ERA-20C (links) und ERA5 (rechts) auf Basis des Schwierz-Index.

Betrachtet man nun die zeitliche Entwicklung der *blocking*-Frequenz in Mitteleuropa (Abbildung 5), ergibt sich abhängig von der Reanalyse ein uneinheitliches Bild. So zeigt ERA-20C nach 1950 einen leichten Rückgang und ERA5 einen leichten Anstieg. Nach 1990 gleichen sich die *blocking*-Frequenzen in ERA5 und ERA-20C an. Dabei sind gegenläufige Trends (Zunahme in ERA-20C und Abnahme in ERA5) festzustellen.

Trend of Yearly Blocking Frequency in Central Europe (Schwierz)

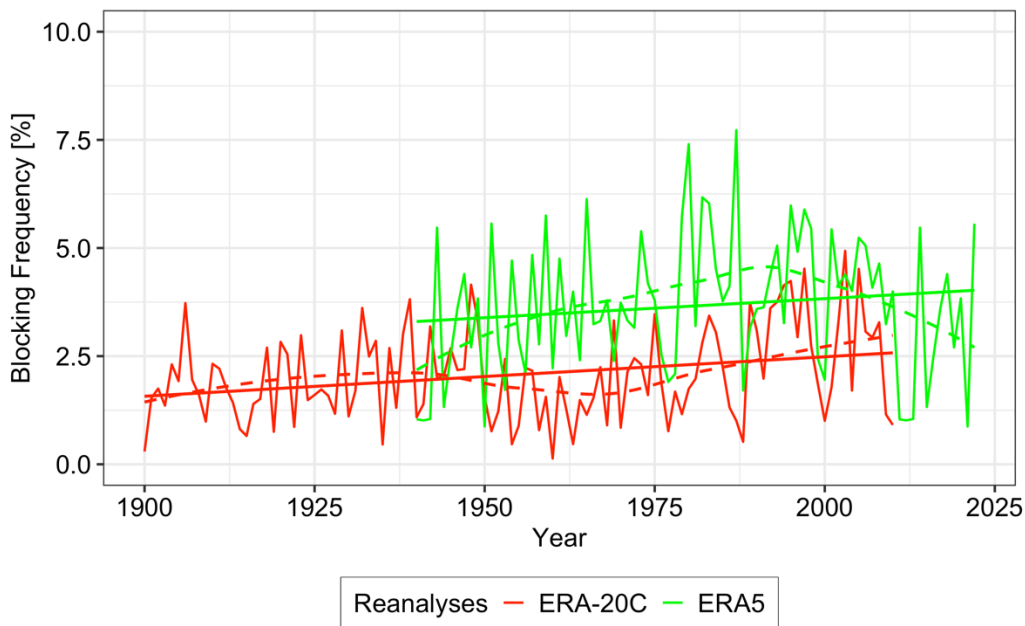


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der *blocking*-Frequenz in den Reanalysen in Mitteleuropa (45°-60°N, 0°-20°O) mit Schwierz-Index.

Insgesamt zeigen die unterschiedlichen Trends zwischen den einzelnen Reanalysen, dass die Ergebnisse von diesem Index aufgrund der fehlenden Konsistenz schwierig zu interpretieren sind. Ein weiteres Problem sind die sehr niedrigen *blocking*-Frequenzen über dem Kontinent, da *blocks* über Osteuropa Relevanz für Starkregen sowie Vb-

Lagen haben. Zusätzlich erfasst der Index nicht alle Perioden mit hoher *blocking*-Frequenz. So ist zum Beispiel bei Betrachtung des osteuropäischen Ausschnitts im Sommer 2010 keine Auffälligkeit festzustellen (Abbildung 6, links), obwohl die extreme Hitzewelle in Russland in diesem Sommer auf eine deutlich erhöhte *blocking*-Frequenz zurückzuführen war, was in den geopotentialbasierten Indizes auch sichtbar ist. So ist beim HGHA-DAV12 bei der roten Linie für den Sommer ein deutlicher Ausschlag nach oben erkennbar (Abbildung 6, rechts). Aufgrund dieser Defizite wurde der Schwierz-Index bei den weiteren Untersuchungen nicht mehr berücksichtigt.

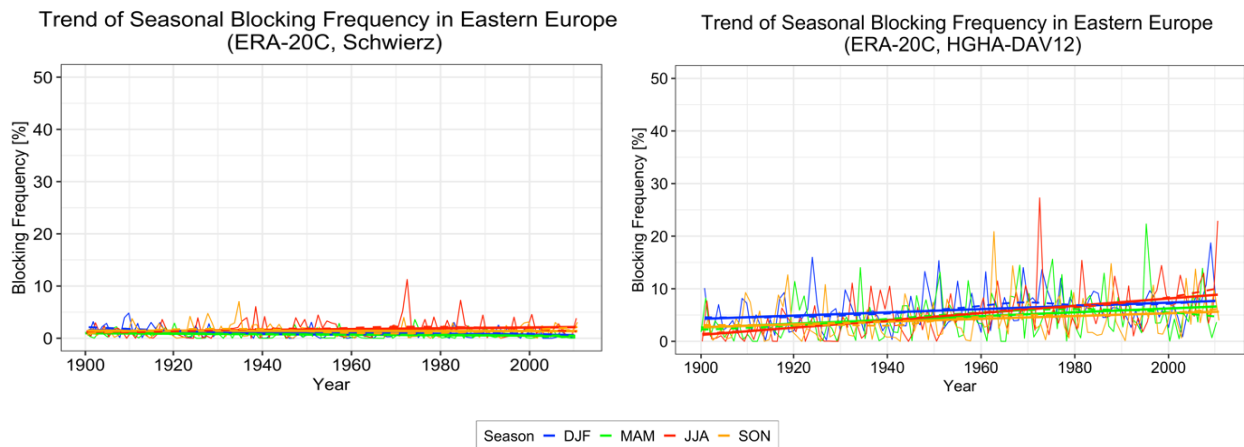


Abbildung 6: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in Osteuropa in ERA-20C (1900-2010) für Schwierz-Index (links) und HGHA-DAV12 (rechts). Das Jahr 2010 stellt somit den letzten Wert der Zeitreihe dar. Die rote Linie ist die für den Sommer relevante.

Masato-Index

Im Folgenden zeigen wir die *blocking*-Frequenz basierend auf dem Index von Masato et al. (2012). Da die potentielle Temperatur an der dynamischen Tropopause nur in ERA-20C verfügbar ist, wird für diesen Index nur die ERA-20C-Reanalyse gezeigt. Die Auswertung der durchschnittlichen jährlichen *blocking*-Frequenz zeigt, dass man bei Verwendung dieses Index deutlich höhere Frequenzen bekommt als bei den anderen Indizes (vergleiche Abbildung 3a, b, c und d). So werden im westlichen Bereich des nordpazifischen Maximums, aber auch westlich von Grönland Frequenzen von über 25% berechnet, über Europa bis 15%. Insbesondere im Bereich von Grönland stellt dies deutlich höhere *blocking*-Frequenzen dar. Damit unterscheidet sich dieser Index vom DAV12, da der DAV12 die *blocking*-Frequenz über Skandinavien höher als über Grönland berechnet und das grönländische Maximum eher schwach ausgeprägt ist. Diese deutlichen Unterschiede werden in der Literatur bestätigt. So werden bereits in Pelly und Hoskins (2003), wo der eindimensionale Index, den Masato et al. (2012) dann auf zwei Dimensionen erweitert haben, entwickelt wurde, deutlich höhere Frequenzen als bei Tibaldi und Molteni (1990) festgestellt. Auch in Masato et al. (2013) ergeben sich deutlich höhere Frequenzen. So werden für die Wintermonate im nordpazifischen *blocking*-Maximum Frequenzen von bis zu 50% berechnet. Der Vergleich der Lage der *blocking*-Zentren zwischen beiden Indizes zeigt außerdem, dass bei Masato das grönländische und nordpazifische Maximum westlicher liegt als beim DAV12. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass starke Warmluftadvektion, die zu einer Umkehr des meridionalen Gradienten der potentiellen Temperatur führt und die Ausbildung eines starken Hochdruckgebietes fördert, westlich des Hochkerns stattfindet. Insofern ist es überraschend, dass im europäischen Maximum die Lage sich zwischen diesem Index und den geopotentialbasierten Indizes nur geringfügig unterscheidet. Untersucht man die zeitliche Entwicklung blockierender Wetterlagen in Mitteleuropa, berechnet mit dem Masato-Index, ist kein Trend zu erkennen (siehe Abbildung 7). Ein Problem beim Masato-Index bestand darin, dass die als Input benötigte Größe, die potentielle Temperatur an der dynamischen Tropopause, nur in wenigen Produkten verfügbar ist. Dadurch war kein Vergleich mit anderen Reanalysen und Klimamodellen möglich.

Trend of Yearly Blocking Frequency in Central Europe (Masato)

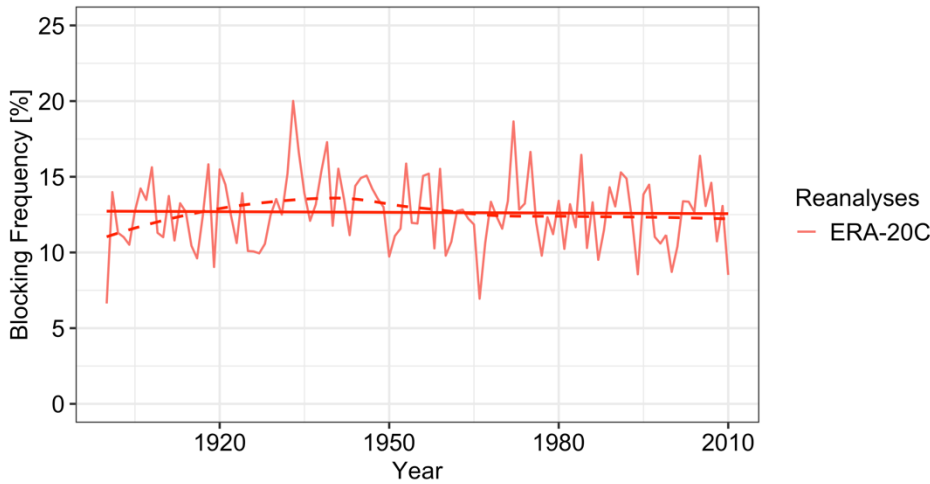


Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung der *blocking*-Frequenz in der ERA-20C-Reanalyse in Mitteleuropa (45°-60°N, 0°-20°O) mit Masato-Index.

Ein weiteres Defizit des Masato-Index ist, dass analog zu Schwierz, Perioden mit ungewöhnlich hoher *blocking*-Frequenz, nicht abgebildet werden. So ist wie bei Schwierz keine Auffälligkeit bei der *blocking*-Frequenz in Südrussland im Sommer 2010 zu erkennen. Außerdem ist das überdurchschnittlich häufige Auftreten von Grönland-*blocking* im kompletten Jahr 2010, insbesondere aber im Winter, nicht dargestellt (Abbildung 8 links). Verwendet man den HGHA-DAV12 als *blocking*-Indikator, ist bei der *blocking*-Frequenz im Winter 2010 ein deutlicher Ausschlag nach oben zu erkennen (Abbildung 8 rechts). Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Datenbeschaffung und der hier beschriebenen Defizite wurde der Masato-Index für weitere Untersuchungen nicht verwendet.

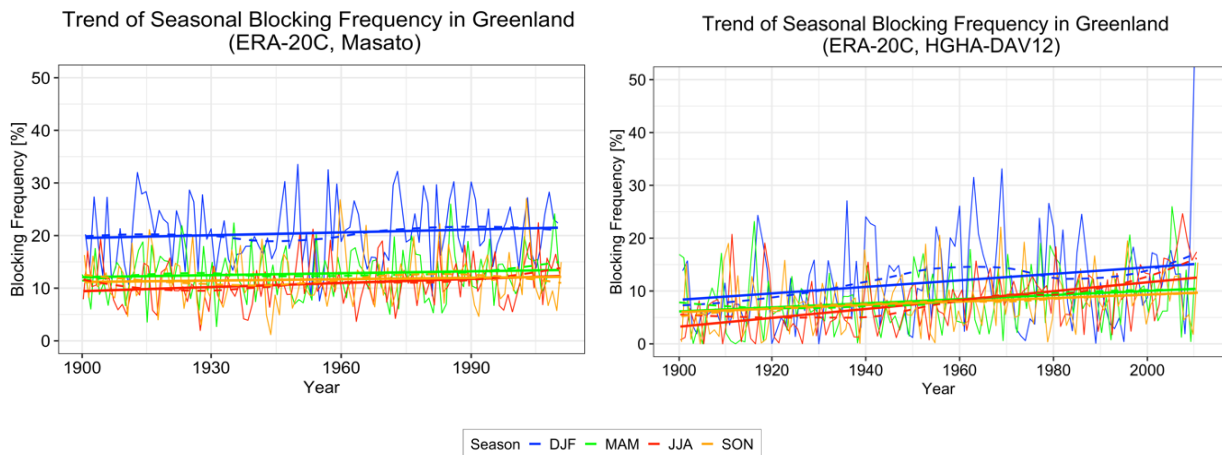


Abbildung 8: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in Grönland in ERA-20C (1900-2010) für Masato-Index (links) und HGHA-DAV12 (rechts). Das Jahr 2010 stellt somit den letzten Wert der Zeitreihe dar. Die blaue Linie ist die für den Winter relevante.

B Reanalysedaten

Reanalysen stellen den Zustand der Atmosphäre bestmöglich dar. Sie sind konsistent, da sie mit einem numerischen Atmosphärenmodell berechnet werden, welches unserem (bestmöglichen, aber dennoch mangelhaften) physikalischen Verständnis der Atmosphäre genügt. Man unterscheidet zwischen Reanalysen, die alle zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten, insbesondere Fernerkundungsdaten, assimilieren („full-input“) und deshalb auf einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten beschränkt sind, und solchen, die das Ziel haben, einen möglichst langen Zeitraum zu umfassen (zum Beispiel das gesamte 20. Jahrhundert) und deshalb aus Konsistenzgründen nur Oberflächenbeobachtungen assimilieren. Auf Seiten der auf Oberflächenbeobachtungen basierenden Reanalysen wurden im Projekt die Produkte ERA-20C (Poli et al., 2016) des ECMWF und das amerikanische 20CRv3 der NOAA-Behörde (Slivinski et al., 2019) verwendet. Als „full-input“ Reanalyse wurde ERA5 (Hersbach et al., 2019) verwendet, welche im Laufe des Jahres 2019 die Vorgängerversion ERA-Interim als Standard-Reanalyseprodukt des ECMWF ablöste. In Tabelle 1 sind wesentliche Merkmale der Reanalysen zusammengefasst. Die 20CR-Reanalyse umfasst 80 Member und ein Ensemble-Mittel. Da sich im Verlauf des Projekts herausgestellt hat, dass die Verwendung der geopotentiellen Höhe des Ensemble-Mittels in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wegen Mittelungseffekten zu einer Unterschätzung der *blocking*-Frequenz führte, wurde die *blocking*-Frequenz der einzelnen Member berechnet. Anschließend wurde das arithmetische Mittel der einzelnen Member berechnet. Als Kompromiss zwischen einer möglichst großen Zahl an Membern und dem Einsparen von Rechenzeit wurden die ersten 25 Member verwendet.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Reanalyseprodukte.

Reanalyse	Institution	Untersuchungs-Zeitraum	Horiz. Auflösung	Datenbasis (Assimilations-schemata)	Referenz
ERA5	ECMWF	1940–2022	31 km (0.25°)	full input (4D-Var)	Hersbach et al., 2019
ERA-20C	ECMWF	1900–2010	ca. 125 km (1°)	surface input only (4D-Var)	Poli et al., 2016
20CRv3	NOAA CIRES	1900–2015	ca. 125 km (1°)	surface input only (EKF)	Slivinski et al., 2019

C Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz

Im Folgenden werden die saisonalen Trends der *blocking*-Frequenz in den vier gewählten und in Kapitel 2 im Haupttext beschriebenen Regionen präsentiert. Dazu werden die Zeitserien für die beiden Indizes, die für weitere Untersuchungen verwendet werden (DAV12 und HGHA-DAV12), für alle drei Reanalysen gezeigt.

DAV12:

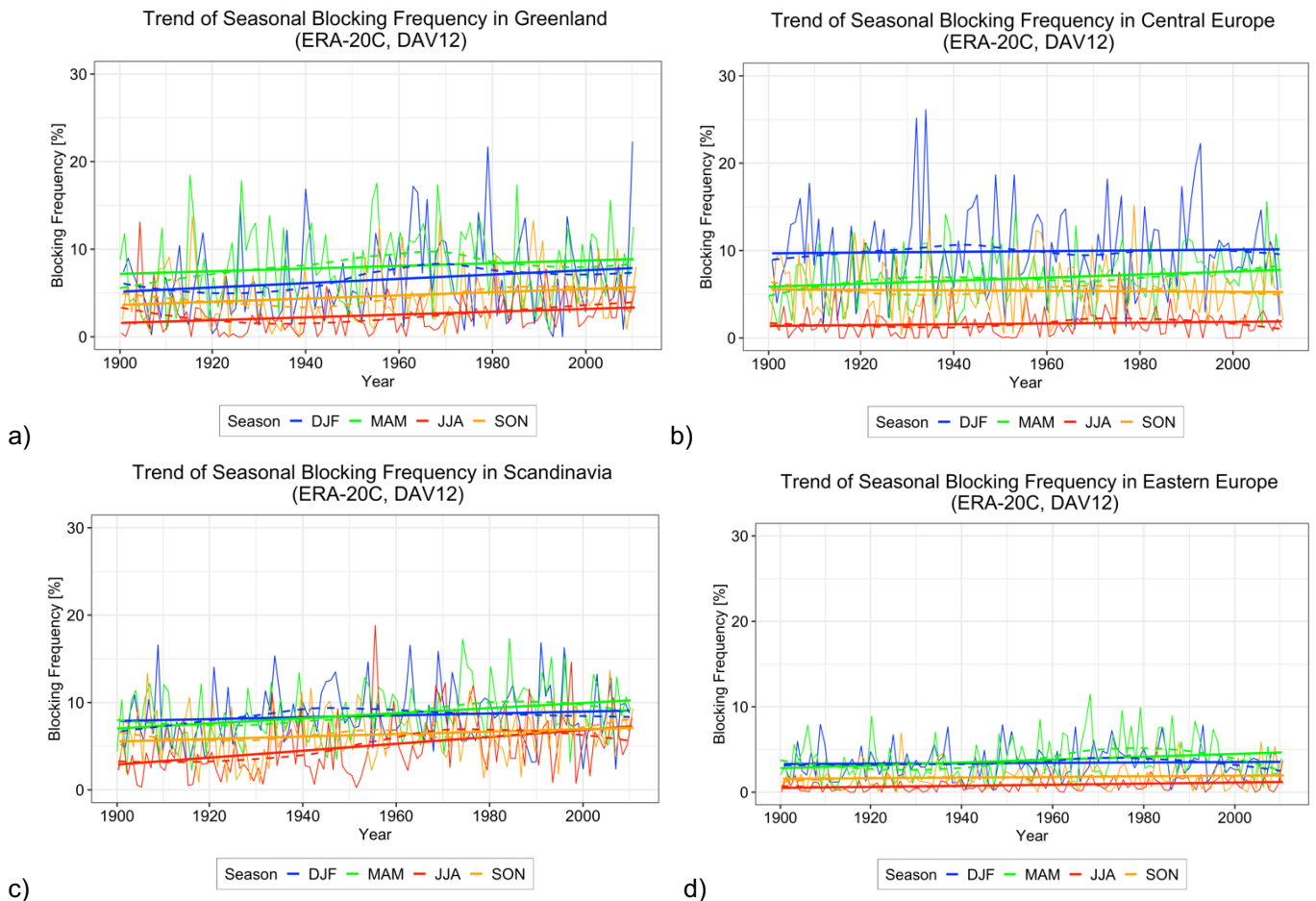


Abbildung 9: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von DAV12 in ERA-20C. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.

Abbildung 9 bis Abbildung 11 zeigen die Zeitserien der saisonalen *blocking*-Frequenzen in Grönland, Mitteleuropa, Skandinavien und Osteuropa unter Verwendung des DAV12 in drei Reanalysen. Analog zur Analyse der jährlichen *blocking*-Frequenz im Haupttext ist bei den saisonalen Trends in Grönland und Skandinavien eine Zunahme der *blocking*-Frequenz in allen Jahreszeiten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu erkennen. Wie aber bereits im Haupttext diskutiert, ist diese Zunahme wahrscheinlich eine Folge der dünnen Datenlage. Das Mittel der Ensemble-Member von 20CR (Abbildung 10) zeigt eine Zunahme von Winter-*blocking* in Grönland bis 1960, gefolgt von einer Abnahme. In den drei anderen Regionen hat die Winter-*blocking*-Frequenz im 20. Jahrhundert abgenommen, wenn auch in Osteuropa nur leicht. Die Frühlings-*blocking*-Frequenz hat im 20. Jahrhundert in Skandinavien und in Mitteleuropa zugenommen, in Grönland dagegen abgenommen. Im Sommer zeigt das Mittel der Ensemble-Member von 20CR eine Zunahme in den vier Regionen, während bei der *blocking*-Frequenz im Herbst nur geringfügige

Veränderungen detektiert wurden. Die Zeitserien der *blocking*-Frequenz in ERA5 (Abbildung 11) zeigen gute Übereinstimmungen mit den 20CR-Zeitserien. Jedoch ist der lineare Trend der Sommer-*blocking*-Frequenz nur noch in Grönland positiv, was darauf hindeutet, dass in Skandinavien und Mitteleuropa Sommer-*blocking* vor allem in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zugenommen hat. In Grönland zeigt der lineare Trend der Winter-*blocking*-Frequenz eine Abnahme, was darauf zurückzuführen ist, dass das Maximum um 1960, das auch in 20CR sichtbar ist, relativ am Anfang des ERA5-Zeitraums (1940-2022) ist.

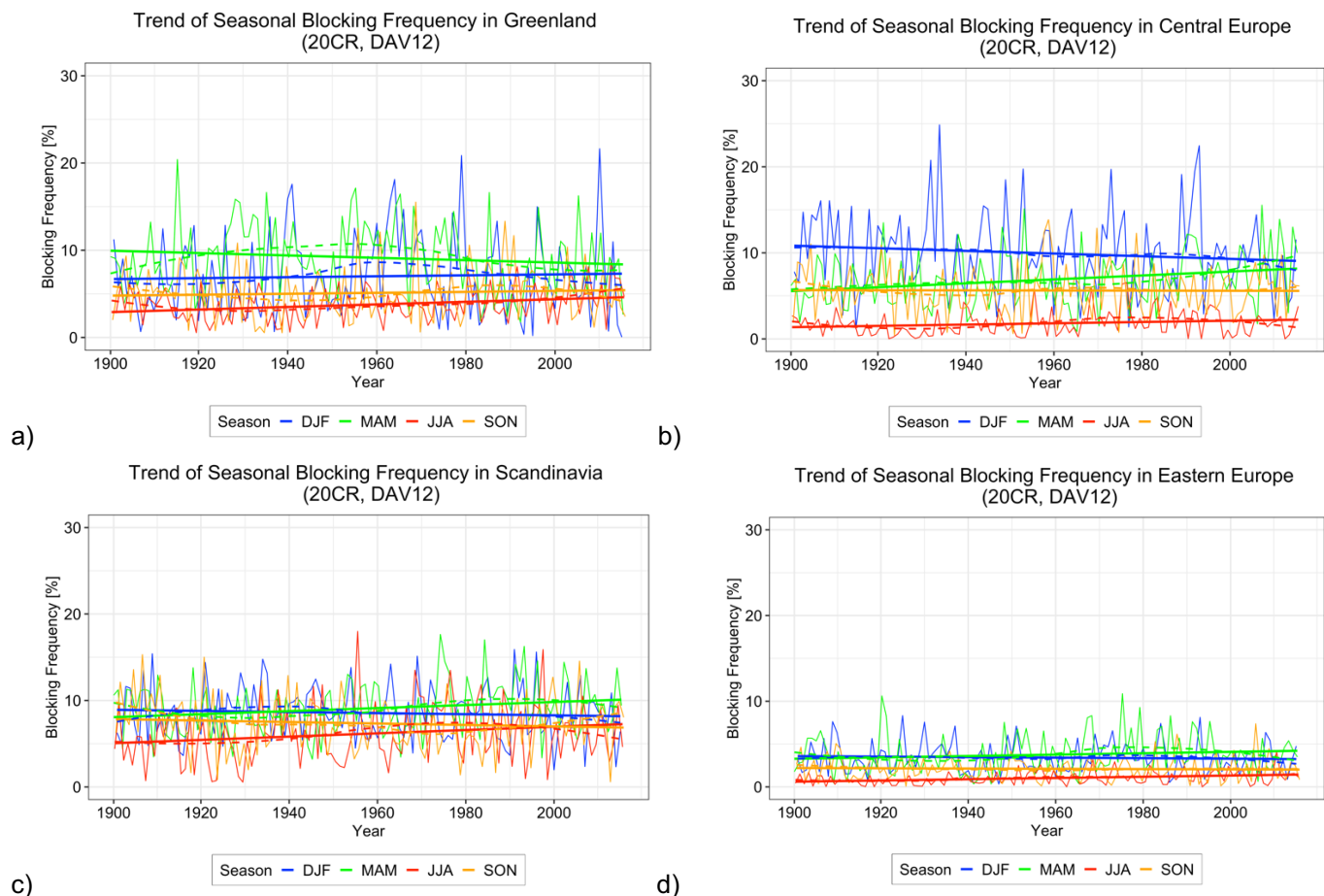


Abbildung 10: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von DAV12 in 20CR im Mittel der Ensemble-Member. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.

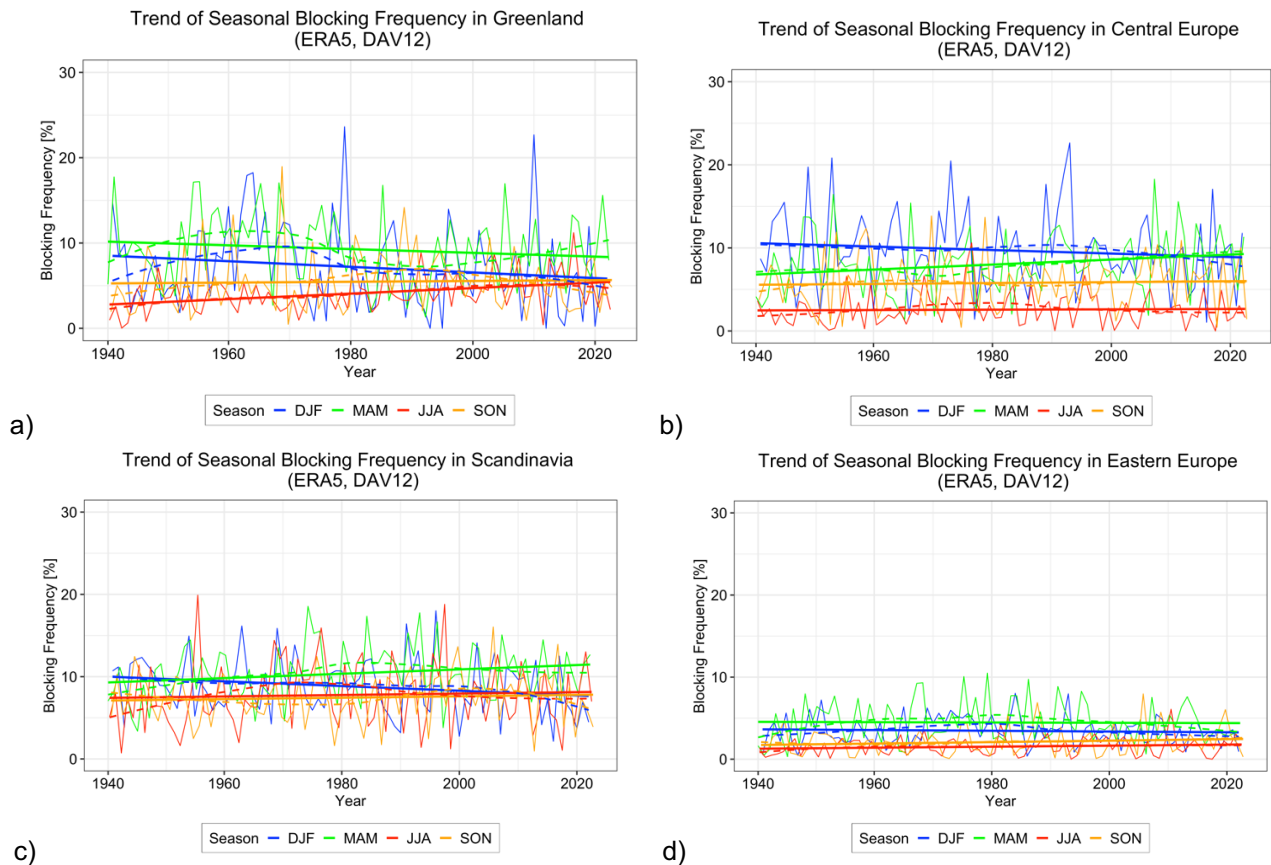


Abbildung 11: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von DAV12 in ERA5. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.

HGHA-DAV12:

Abbildung 12 bis Abbildung 14 zeigen die Zeitserien der saisonalen *blocking*-Frequenzen in Grönland, Mitteleuropa, Skandinavien und Osteuropa unter Verwendung des HGHA-DAV12 in drei Reanalysen. In ERA-20C ist eine Zunahme der *blocking*-Frequenz in allen Jahreszeiten in den vier untersuchten Regionen erkennbar (Abbildung 12). Wie bei der Beschreibung der Zeitserien der *blocking*-Frequenz unter Verwendung des DAV12 erwähnt, ist auch beim HGHA-DAV12 die Zunahme sehr wahrscheinlich eine Folge der dünnen Datenlage zu Beginn des 20. Jahrhunderts.

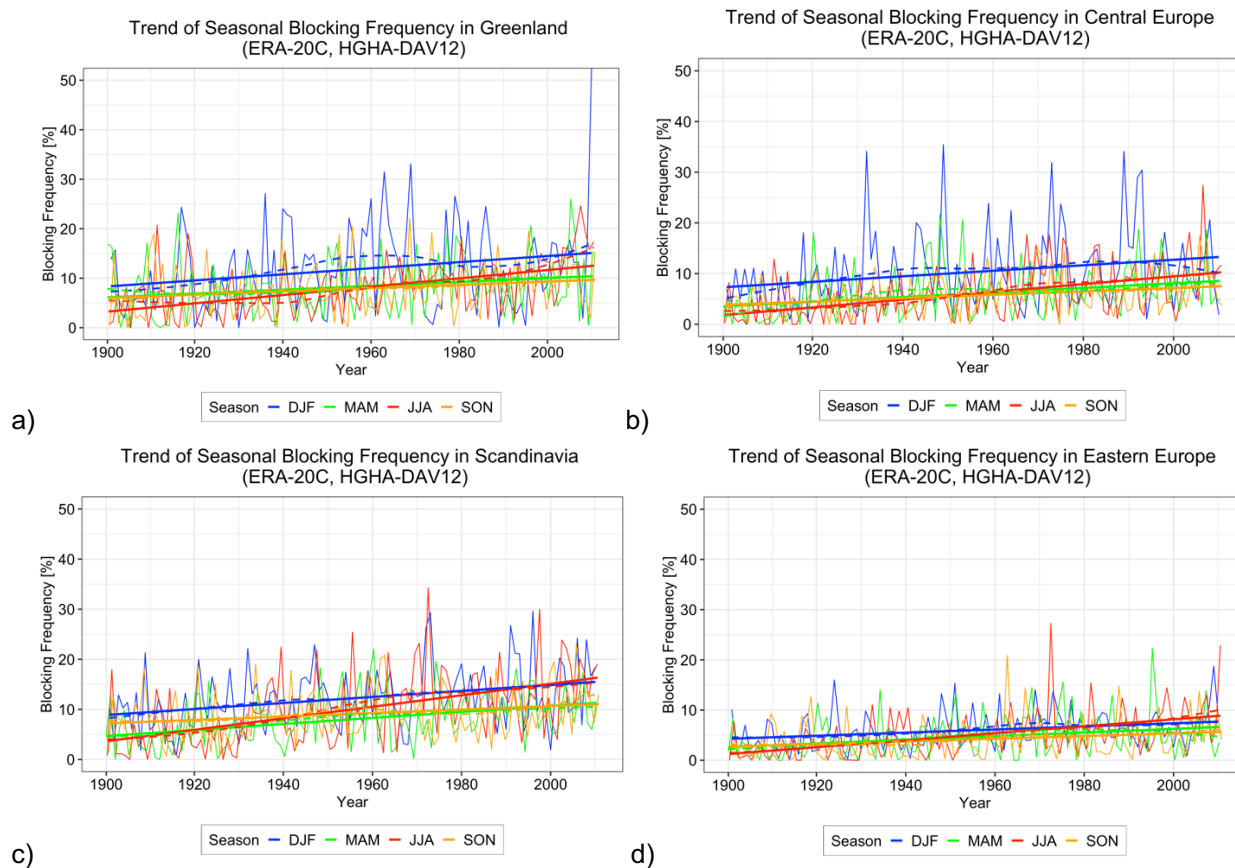


Abbildung 12: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von HGHA-DAV12 in ERA-20C. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.

Das Mittel der Ensemble-Member von 20CR (Abbildung 13) zeigt in den vier Regionen eine Zunahme der Sommer-*blocking*-Frequenz, die in Grönland und Skandinavien am stärksten ausgeprägt ist. Bei der Winter-*blocking*-Frequenz zeigt sich in Mitteleuropa eine leichte Abnahme, während in Grönland diese, analog zum DAV12, bis ca. 1960 zunahm, bevor eine Abnahme erfolgte. Die *blocking*-Frequenzen im Herbst und Frühling ändern sich am wenigsten, wobei im Herbst eine leichte Abnahme in den vier Regionen und im Frühling eine leichte Zunahme in den vier Regionen erkennbar ist. ERA5 (Abbildung 14) bestätigt im Großen und Ganzen die Trends der *blocking*-Frequenz in 20CR, jedoch ergeben sich im Detail einige Unterschiede. So führt analog zum DAV12 das Maximum der Winter-*blocking*-Frequenz in Grönland um 1960 zu einem negativen Trend über den ganzen Zeitraum von ERA5 (1940-2022). Außerdem ist in Skandinavien und Osteuropa eine verstärkte Zunahme von Sommer-*blocking* nach 2010 detektiert worden, die in 20CR wegen des früheren Endes des Reanalysezeitraums (2015) nicht erkennbar ist. Ob es sich um den Beginn einer beschleunigten Zunahme oder um multijährliche Variabilität handelt, wird die Zukunft zeigen.

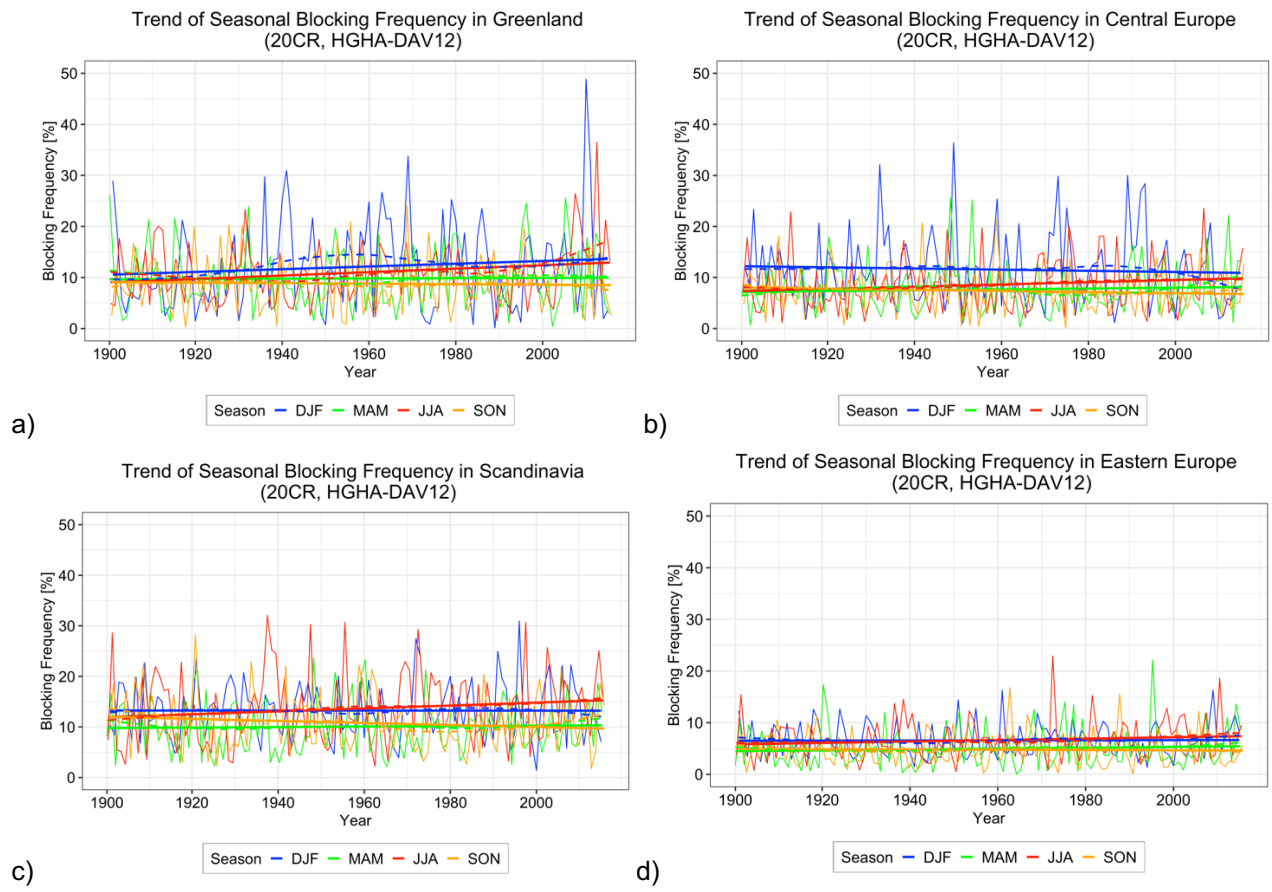


Abbildung 13: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von HGHA-DAV12 in 20CR im Mittel der Ensemble-Member. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.

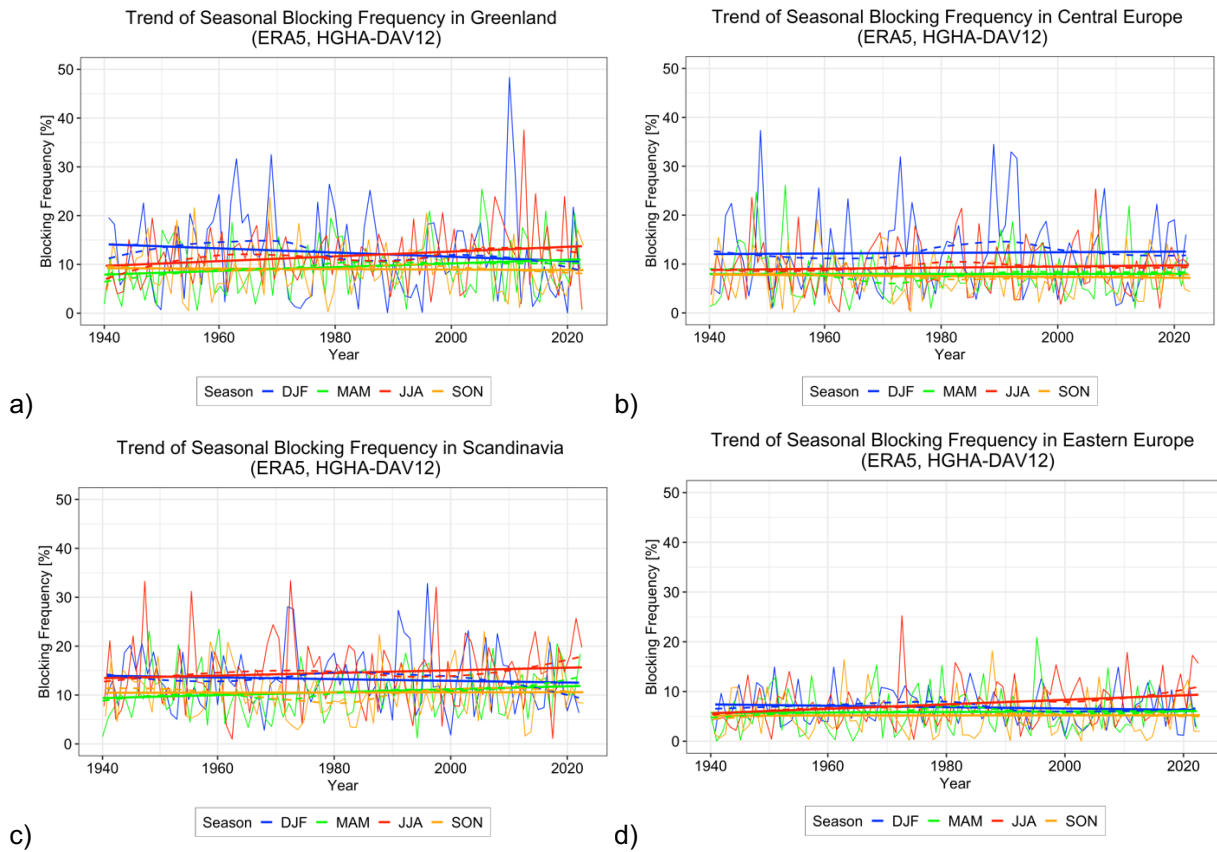


Abbildung 14: Saisonale Trends der *blocking*-Frequenz in verschiedenen Regionen auf Basis von HGHA-DAV12 in ERA5. (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.

D Entstehung und Erhaltung blockierender Wetterlagen

Bisher gibt es keine einheitliche Theorie, die die Entstehung von blockierenden Wetterlagen und die Mechanismen, die ihre Langlebigkeit ermöglichen, vollumfänglich erklärt. Der Beginn einer blockierenden Wetterlage wird verursacht von einer stationären Rossbywelle mit großer Amplitude. Im Rücken der Rossbywelle wird zu Beginn eines Blocks subtropische Luft nach Norden transportiert. Diese ist gekennzeichnet durch geringe potentielle Vorticity (PV) bzw. hohe potentielle Temperatur im Niveau der dynamischen Tropopause (die eine Fläche konstanter PV ist). Die Entwicklung des Rückens erfolgt typischerweise innerhalb von 1-3 Tagen. Sie kann beispielsweise durch extrem starke Zyklogenese bei einem sich langsam verlagernden Tiefdruckgebiet verursacht werden (Colucci, 1985). Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig. Eine stehende Rossbywelle kann auch ausschließlich durch die Interaktion von planetaren Wellen mit verschiedenen Wellenlängen verursacht werden (Austin, 1980). Über die genaue Bedeutung von synoptischskaligen und großskaligen Mechanismen auf der planetaren Skala herrscht noch Unklarheit.

In den letzten Jahren wurde die Bedeutung von diabatischen Prozessen in sogenannten „Warm-Conveyor-Belts“ für *blocking* stärker untersucht (z.B. Madonna et al., 2014; Steinfeld et al., 2020). Im „Warm-Conveyor-Belt“, welcher sich im Warmluftsektor eines Tiefdruckgebiets befindet, wird subtropische Luft (mit geringer PV) dynamisch gehoben und Richtung Norden transportiert. Durch Kondensation verstärkt sich die Hebung, sodass Luftmassen aus der Grenzschicht bis in die Höhe der Tropopause gelangen können. Durch die Advektion von Luftmassen geringer PV wird der Rücken verstärkt und *blocking* begünstigt. Verschiedene Studien zeigen einen Zusammenhang zwischen *blocking* und Veränderungen im Polarwirbel der Stratosphäre (z.B. Barriopedro und Calvo, 2014). *Blocking* kann zu einem schwächeren Polarwirbel und zu sogenannter plötzlicher Stratosphärenenerwärmung führen. Außerdem wurde eine umgekehrte Ursache-Wirkung-Beziehung festgestellt, nämlich ein Anstieg in der Häufigkeit und Länge von *blocks* nach plötzlichen Stratosphärenenerwärmungen, was Kaltluftausbrüche nach Süden begünstigt.

E Blockierende Wetterlagen in CMIP6-Simulationen

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten CMIP6-Modelle.

Modell	Institution	Zeitraum	Geopotentielle Höhe in 500 hPa in SSP5-8.5-Szenario verfügbar
ACCESS-CM2	CSIRO (Australien)	1950-2100	Ja
AWI-ESM-1-1-LR	AWI (Deutschland)	1900-2014	Nein
CESM2	UCAR (USA)	1900-2100	Ja
CESM2-WACCM	UCAR (USA)	1900-2100	Ja
CNRM-CM6-1	CNRM (Frankreich)	1900-2100	Ja
CNRM-ESM2-1	CNRM (Frankreich)	1900-2100	Ja
CanESM5	CCCma (Kanada)	1900-2100	Ja
EC-Earth3	EC-Earth Konsortium (Europa)	1900-2100	Ja
EC-Earth3-Veg	EC-Earth Konsortium (Europa)	1950-2100	Ja
GISS-E2-1-G	NASA (USA)	1900-2014	Nein
HadGEM3-GC31-MM	MetOffice (Vereinigtes Königreich)	1900-2100	Ja
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (Frankreich)	1900-2100	Ja
MIROC-ES2L	AORI Univ of Tokyo (Japan)	1900-2100	Ja
MIROC6	AORI Univ of Tokyo (Japan)	1900-2100	Ja
MPI-ESM1-2-LR	Max-Planck-Institut (Deutschland)	1900-2100	Ja
MPI-ESM1-2-HR	Max-Planck-Institut (Deutschland)	1900-2100	Ja
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (Japan)	1950-2100	Ja
NorESM2-LM	Norwegian Climate Consortium (Norwegen)	1900-2100	Ja
NorESM2-MM	Norwegian Climate Consortium (Norwegen)	1900-2100	Ja
UKESM1-0-LL	UKESM (Vereinigtes Königreich)	1900-2100	Ja

Vergleich zwischen CMIP6-Simulationen und dem Mittel der 25 betrachteten Realisierungen von 20CR (1900-2010) bzw. ERA5 (1961-2010) mit HGHA-DAV12:

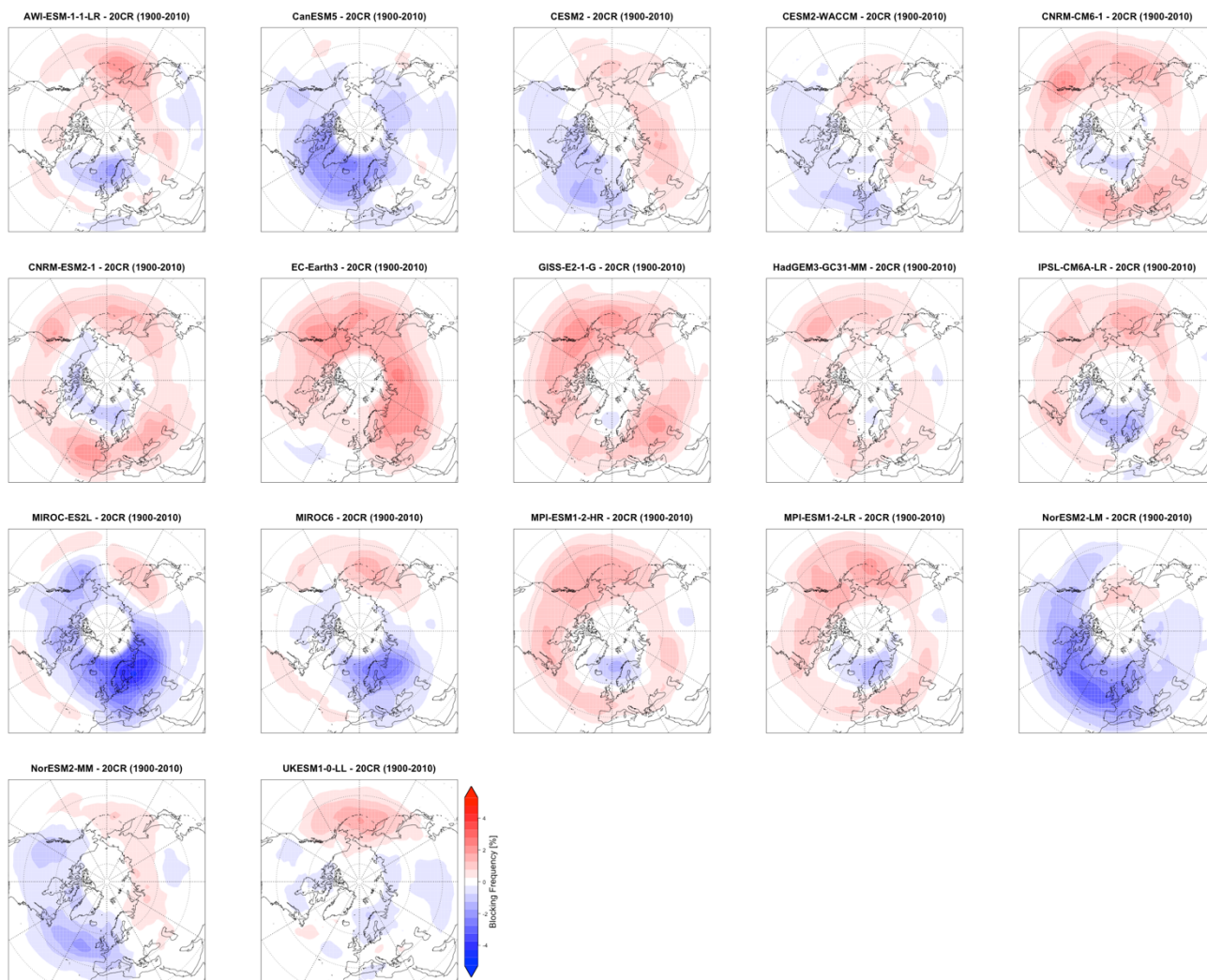


Abbildung 15: Abweichung der *blocking*-Frequenz im Jahresmittel in allen CMIP6-Simulationen vom Mittel der 25 betrachteten Realisierungen der 20CR-Reanalyse im Zeitraum 1900-2010.

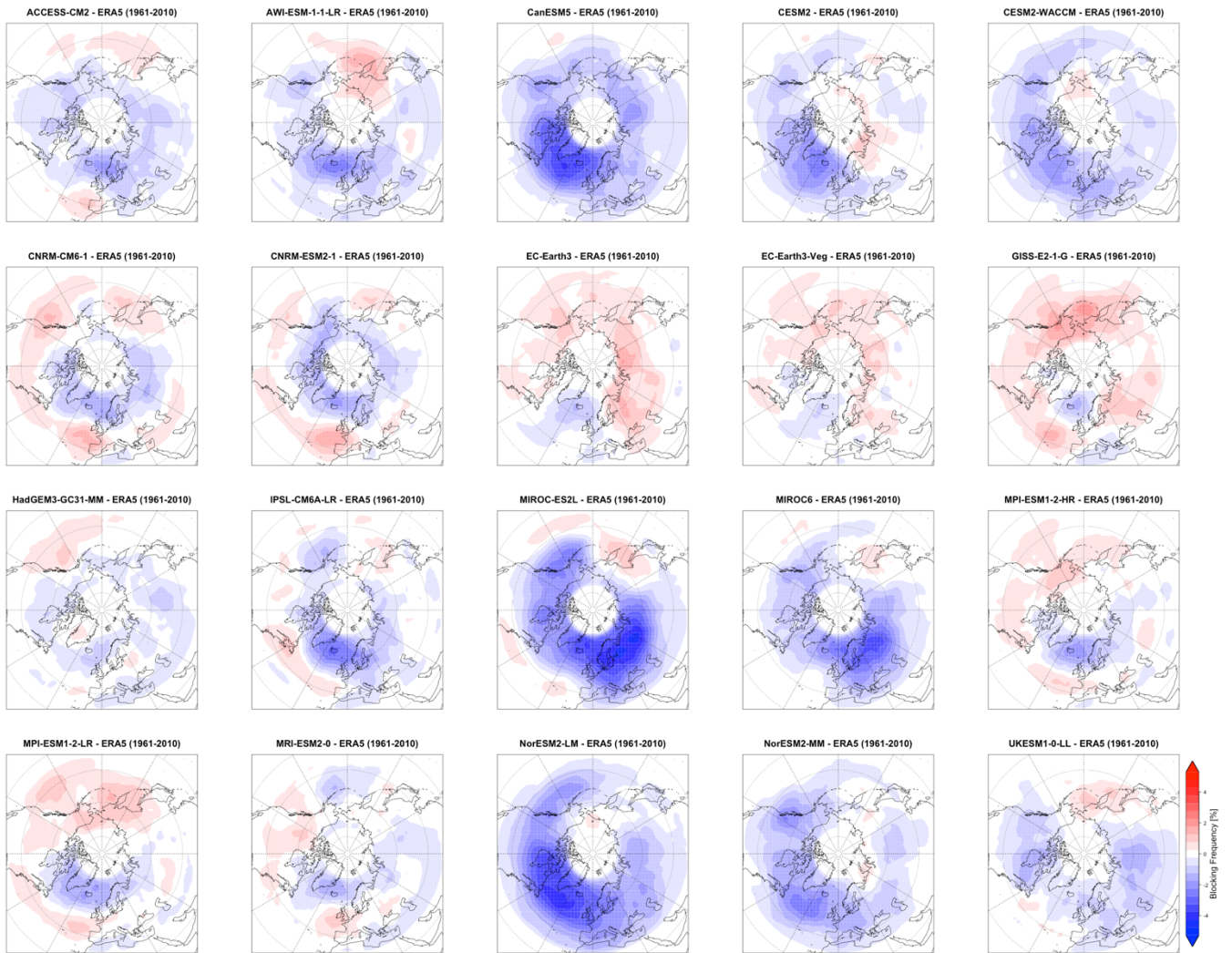


Abbildung 16: Abweichung der *blocking*-Frequenz im Jahresmittel in allen CMIP6-Simulationen von der ERA5-Reanalyse im Zeitraum 1961-2010.

Vergleich der Zukunft (2051-2100, SSP5-8.5) mit der Historie (1961-2010):

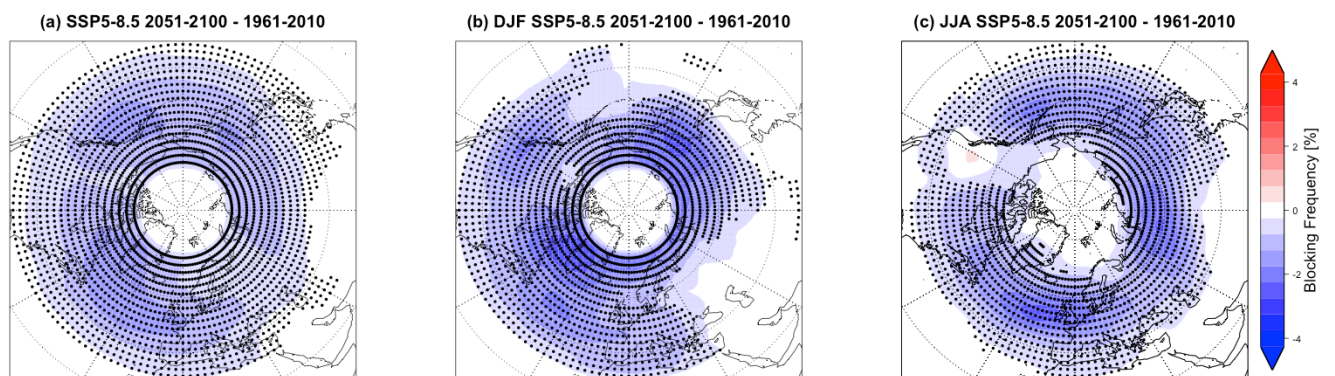


Abbildung 17: Änderung der *blocking*-Frequenz im Mittel des CMIP6-Ensembles zwischen den Zeiträumen 2051-2100 im SSP5-8.5-Szenario und 1961-2010 im ganzen Jahr (a), Winter (b) und Sommer (c). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

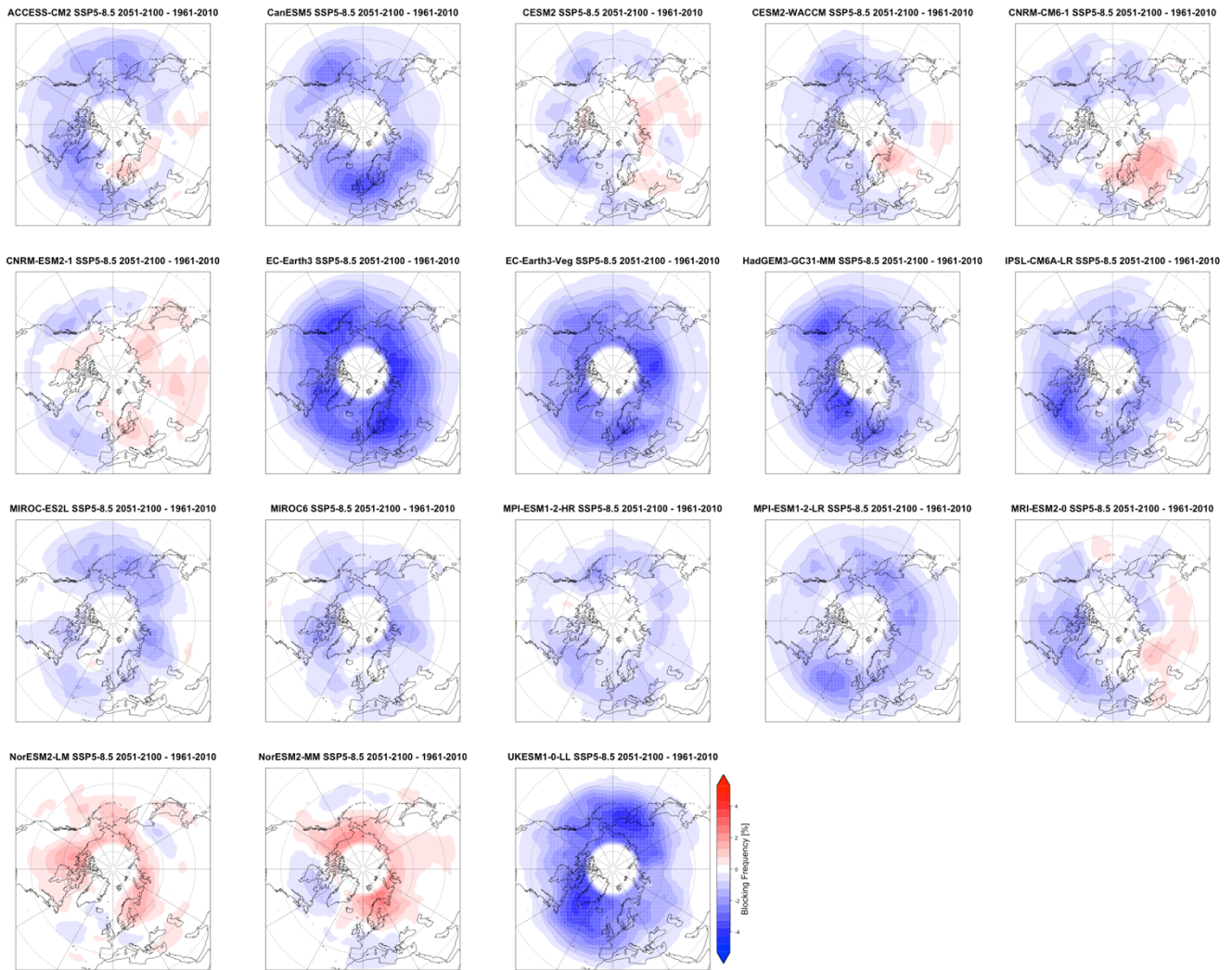


Abbildung 18: Änderung der *blocking*-Frequenz zwischen den Zeiträumen 2051-2100 im SSP5-8.5-Szenario und 1961-2010 im Jahresmittel in allen CMIP6-Simulationen.

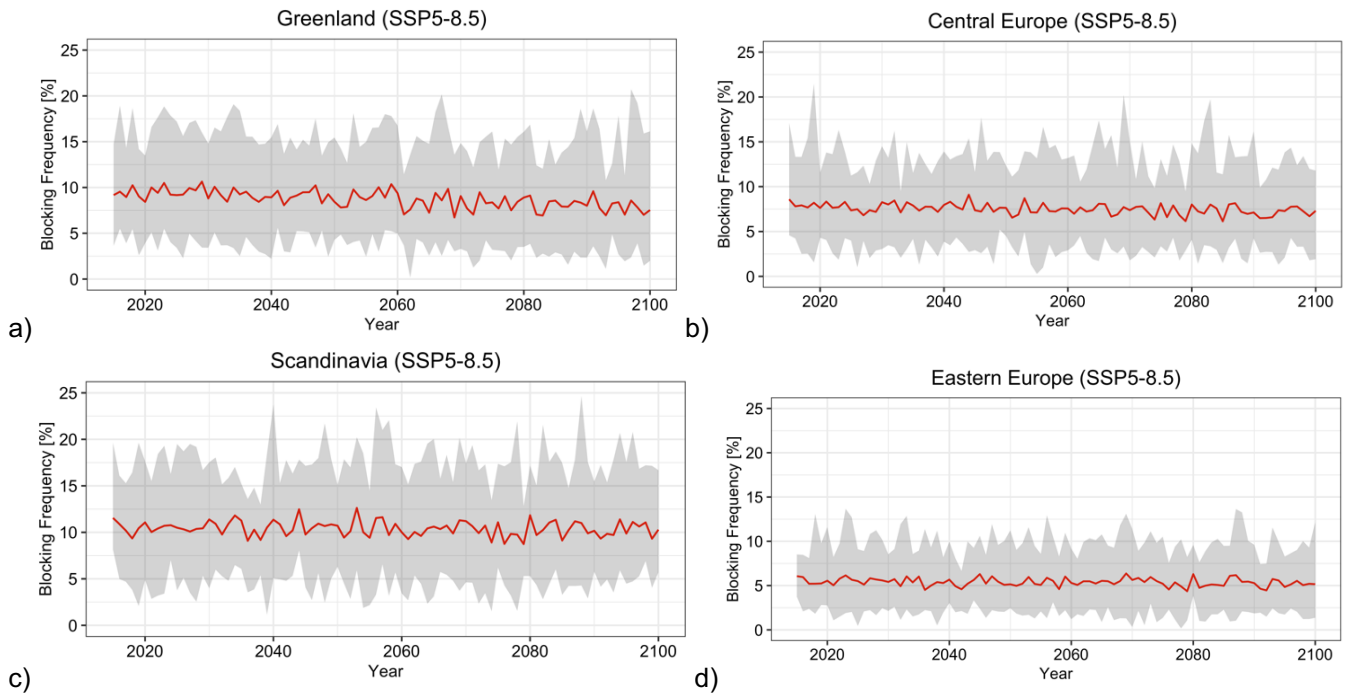


Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung der *blocking*-Frequenz in verschiedenen Regionen im europäisch-atlantischen Raum für das CMIP6-Ensemblemittel im SSP5-8.5-Szenario (rot), und die Bandbreite des Ensembles (grau). (a) Grönland; (b) Mitteleuropa; (c) Skandinavien; (d) Osteuropa.

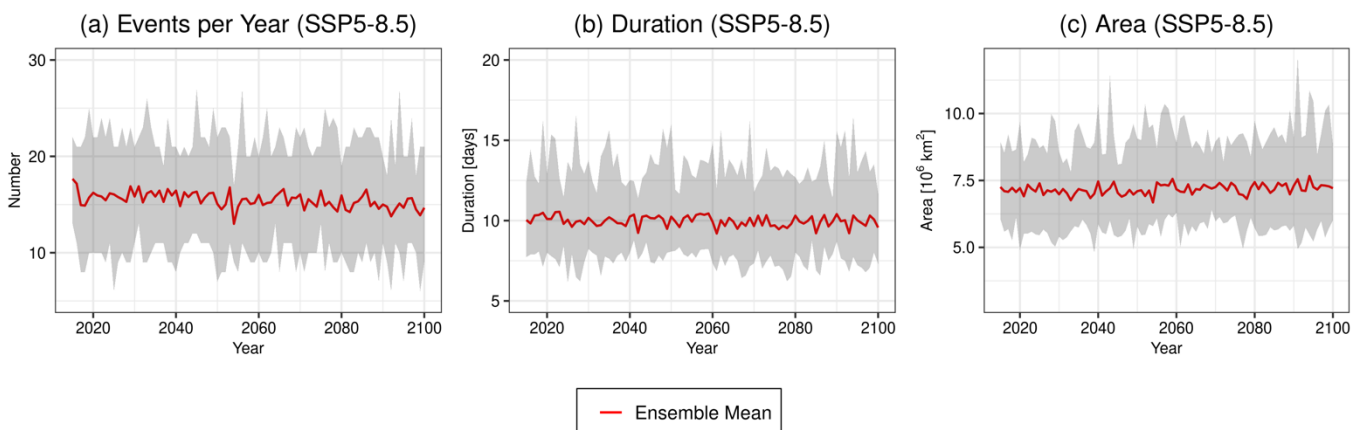


Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung der Anzahl der *blocking*-Ereignisse pro Jahr (a), der mittleren Dauer (b) und der mittleren räumlichen Ausdehnung der *blocking*-Ereignisse pro Jahr (c) für das CMIP6-Ensemblemittel im SSP5-8.5-Szenario (rot), und die Bandbreite des Ensembles (grau). Es wurden alle *blocks* in der Region zwischen 45° und 75°N sowie 60°W und 60°O berücksichtigt.

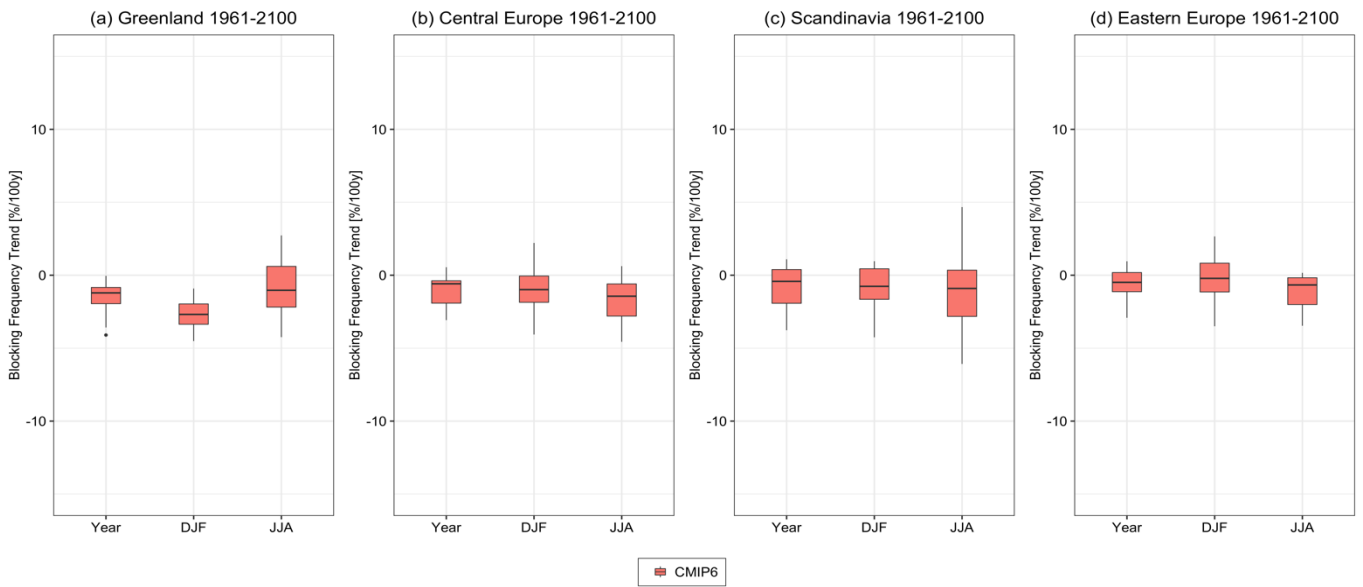


Abbildung 21: Boxplots der *blocking*-Trends (jährliche, winterliche und sommerliche Trends) in den Regionen in den Simulationen des CMIP6-Ensembles im Szenario SSP5-8.5. Die drei horizontalen Linien zeigen das erste und dritte Quartil, sowie den Median. Striche zeigen den Ensemble-Range, sind aber auf das 1,5-fache des Interquartilsabstands begrenzt. Trendwerte außerhalb dieses Bereichs sind durch Punkte gekennzeichnet.

F Beziehungen zwischen großskaligen Treibern und blockierenden Wetterlagen

Im Folgenden werden die Beziehungen zwischen Treibern und *blocking* für die am Ende von Kapitel 4 im Haupttext ausgewählten CMIP6-Simulationen gezeigt. Bei einigen Modellen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1 und NorESM2-LM) werden für die historische Periode mehrere Realisierungen gezeigt, um eine größere Stichprobe und ein umfassenderes Bild zu erhalten. Dabei wird zunächst die Beziehung für alle Realisierungen gezeigt. Dies wird dann Ensemble genannt (z.B. „CESM2-WACCM Ensemble“). Dabei wurden das 25. und 75. Perzentil über alle Realisierungen ermittelt, um anschließend gemäß der Beschreibung im Haupttext des Berichts die Differenz der *blocking*-Frequenz zwischen Jahren unterhalb des 25. bzw. oberhalb des 75. Perzentils des Treibers zu bestimmen. Anschließend wurden diese beiden Perzentile für jede einzelne Realisierung bestimmt. Anschließend wurde die räumliche Korrelation der Differenzen der *blocking*-Frequenz zwischen ERA5 und den CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O (untere Hälfte in den folgenden Abbildungen) berechnet. Diese wird sortiert von der höchsten bis zur niedrigsten Korrelation tabellarisch gezeigt, um Aufschluss über die Qualität der einzelnen Simulationen zu geben. Es ist zu beachten, dass bei den ausgewählten Simulationen nicht alle Parameter verfügbar sind. So ist bspw. die Schneebedeckung nicht für die Modelle ACCESS und EC-Earth3-Veg verfügbar.

a Atlantische Multidekadenvariabilität (AMV) und blockierende Wetterlagen

AMV – Winter-blocking (1961-2010):

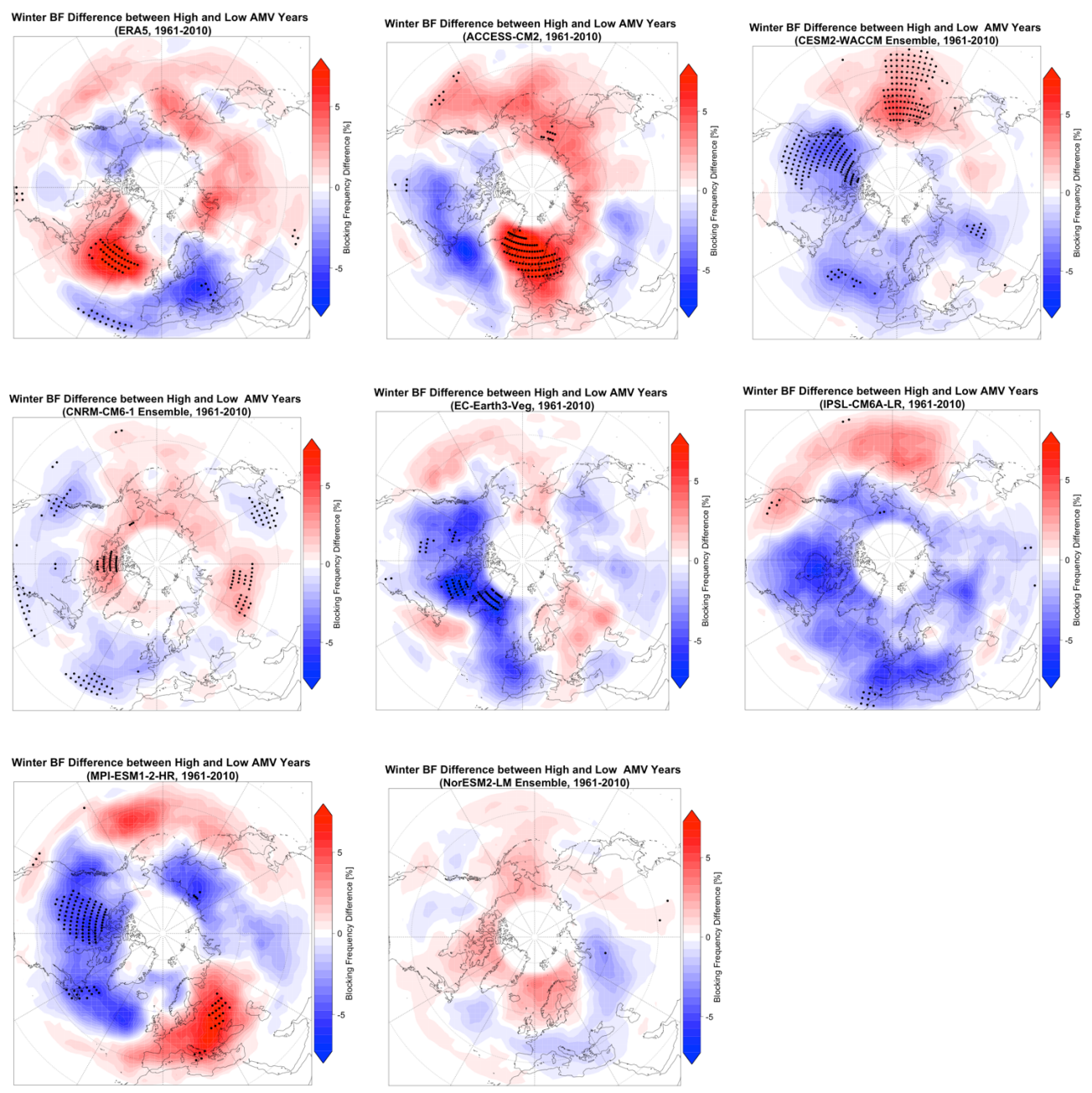
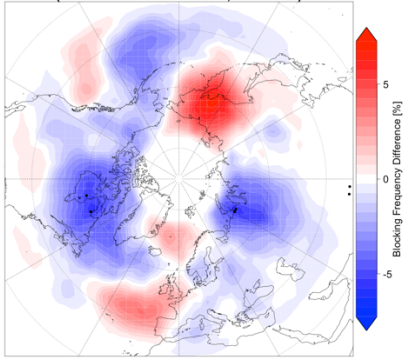


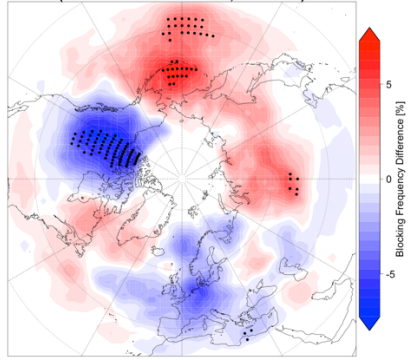
Abbildung 22: Differenz der Winter-blocking-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger AMV (1961-2010) in ERA5 und ausgewählten CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Modelle mit mehreren Realisierungen:

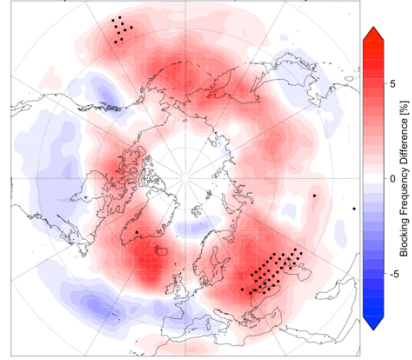
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CESM2-WACCM Member 1, 1961-2010)



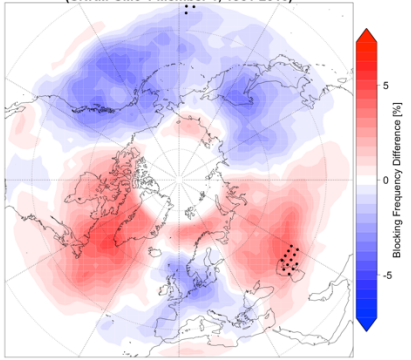
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CESM2-WACCM Member 2, 1961-2010)



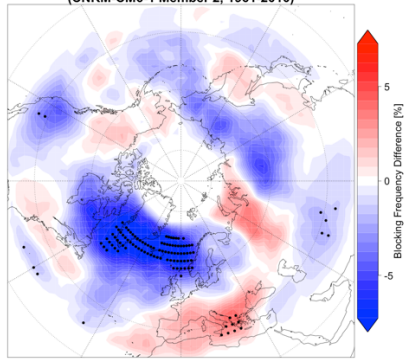
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CESM2-WACCM Member 3, 1961-2010)



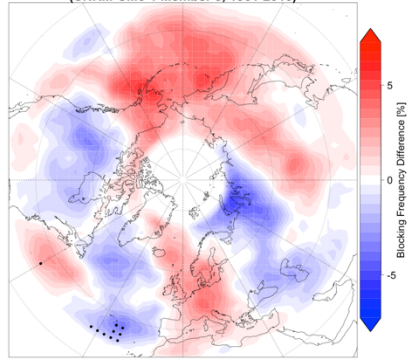
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CNRM-CM6-1 Member 1, 1961-2010)



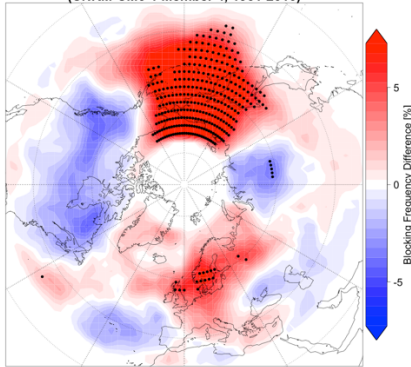
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CNRM-CM6-1 Member 2, 1961-2010)



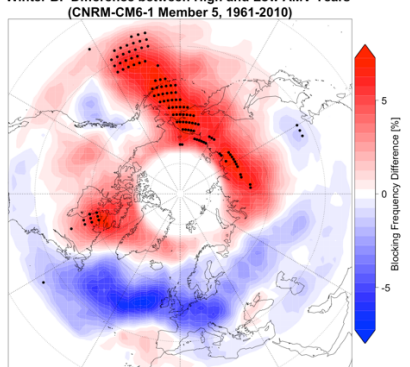
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CNRM-CM6-1 Member 3, 1961-2010)



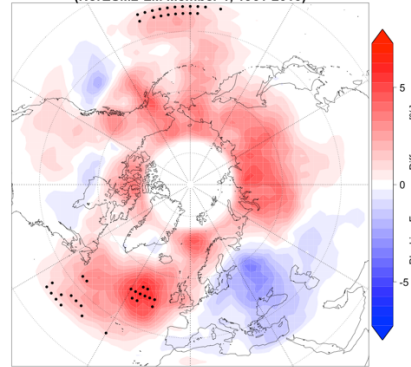
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CNRM-CM6-1 Member 4, 1961-2010)



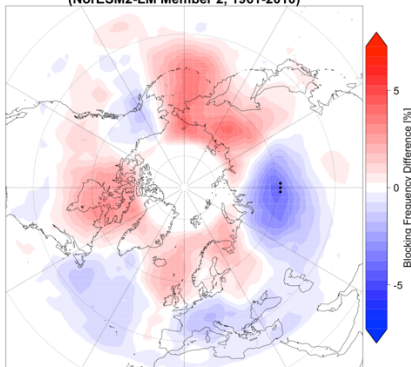
Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(CNRM-CM6-1 Member 5, 1961-2010)



Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(NorESM2-LM Member 1, 1961-2010)



Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(NorESM2-LM Member 2, 1961-2010)



Winter BF Difference between High and Low AMV Years
(NorESM2-LM Member 3, 1961-2010)

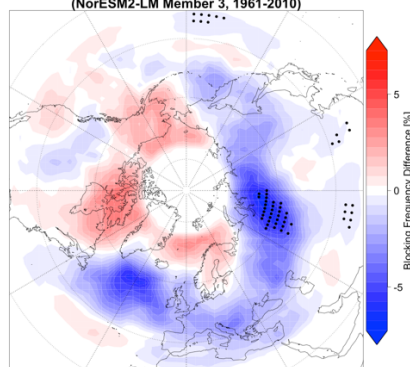


Abbildung 23: Differenz der Winter-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger AMV (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Tabelle 3: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der *blocking*-Frequenz im Winter in Abhängigkeit der AMV-Phase zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.

Rang	Modell	Korrelation
1	CNRM-CM6-1	0,12 (0,59; -0,43; -0,36; -0,10; 0,14)
2	NorESM2-LM	0,002 (0,54; 0,04; -0,21)
3	IPSL-CM6A-LR	-0,17
4	ACCESS-CM2	-0,20
5	EC-Earth3-Veg	-0,24
6	CESM2-WACCM	-0,39 (-0,40; 0,43; 0,27)
7	MPI-ESM1-2-HR	-0,70

AMV – Winter-blocking (2051-2100, SSP5-8.5):

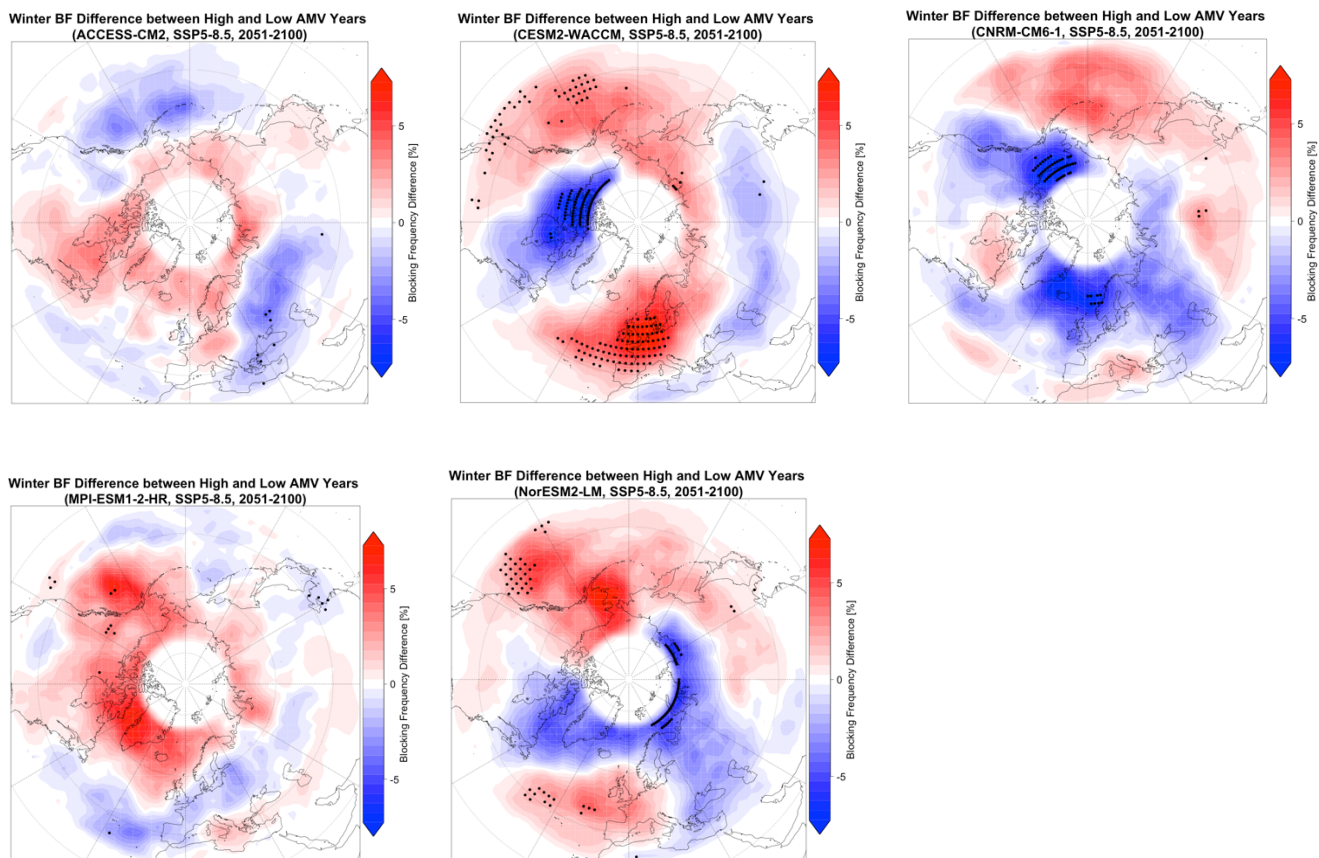
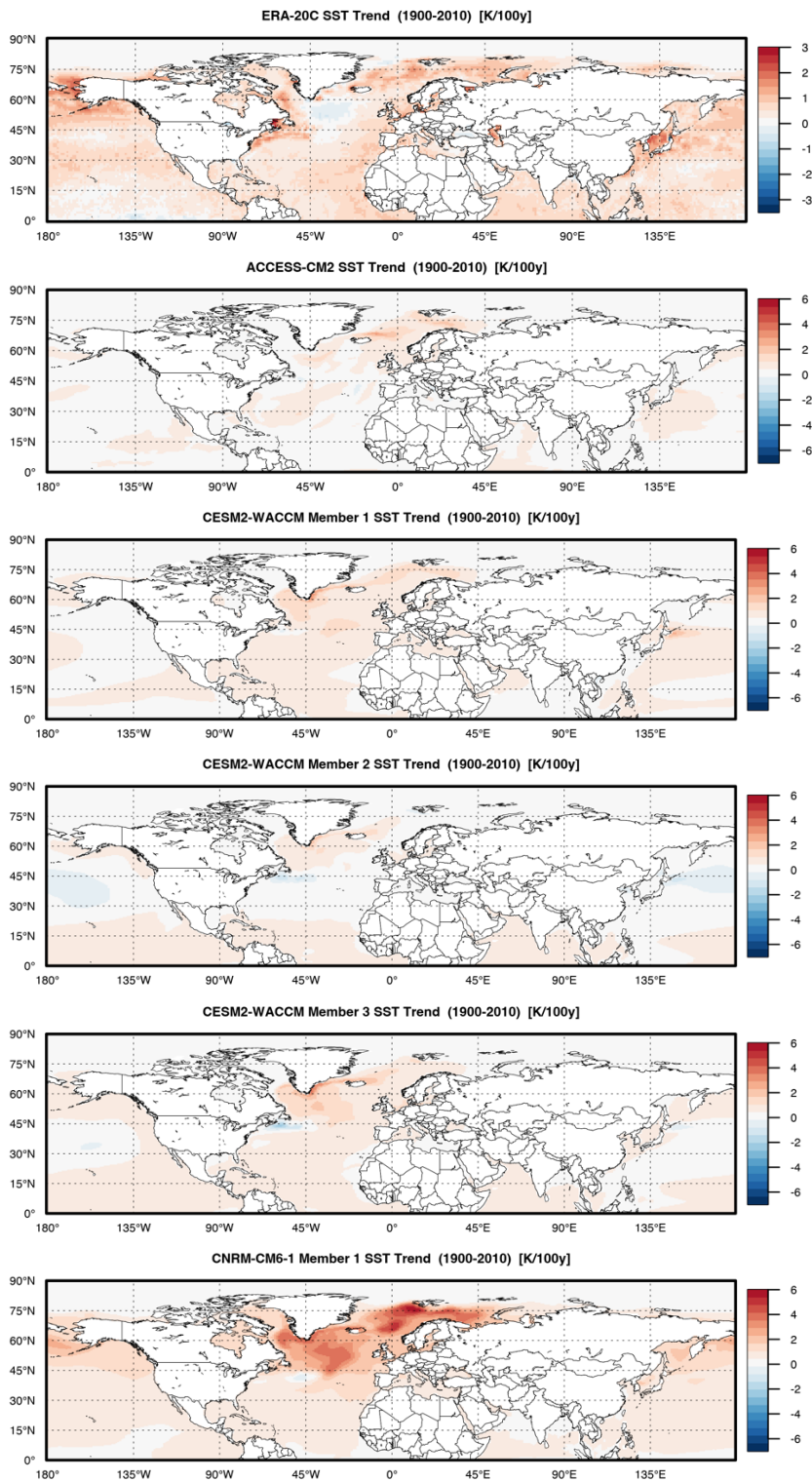
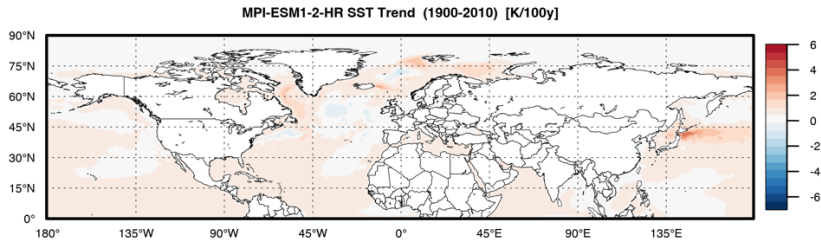
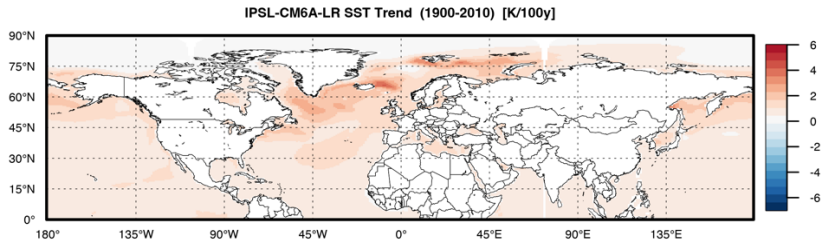
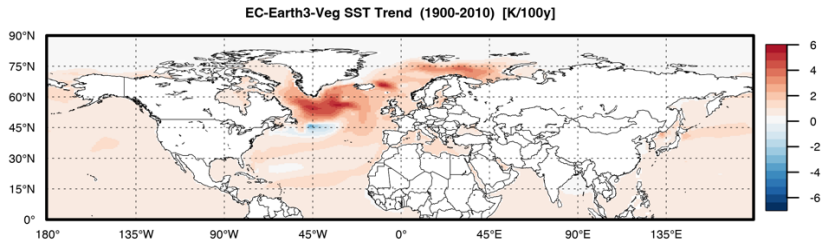
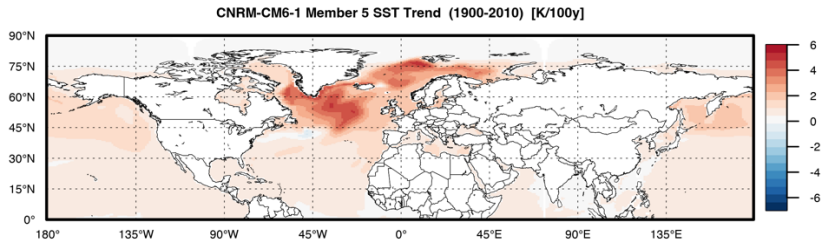
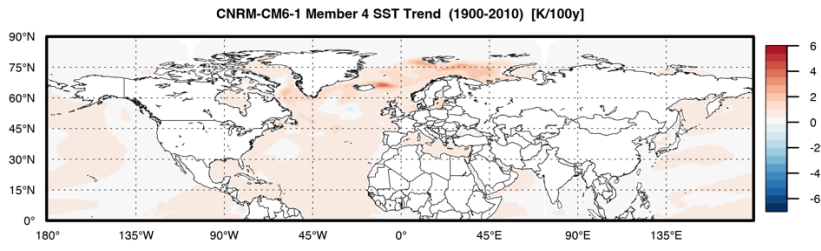
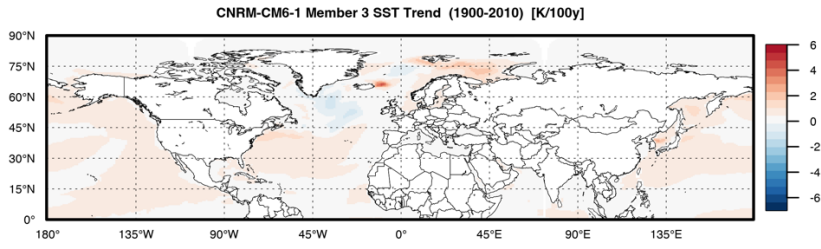
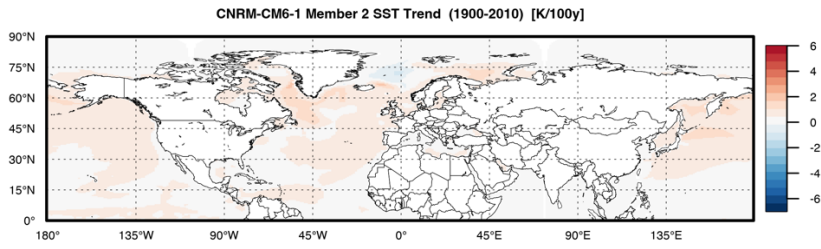


Abbildung 24: Differenz der Winter-blocking-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger AMV (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

b SST-Anomalien im Atlantischen Erwärmungsloch und blockierende Wetterlagen

SST-Trends (1900-2010):





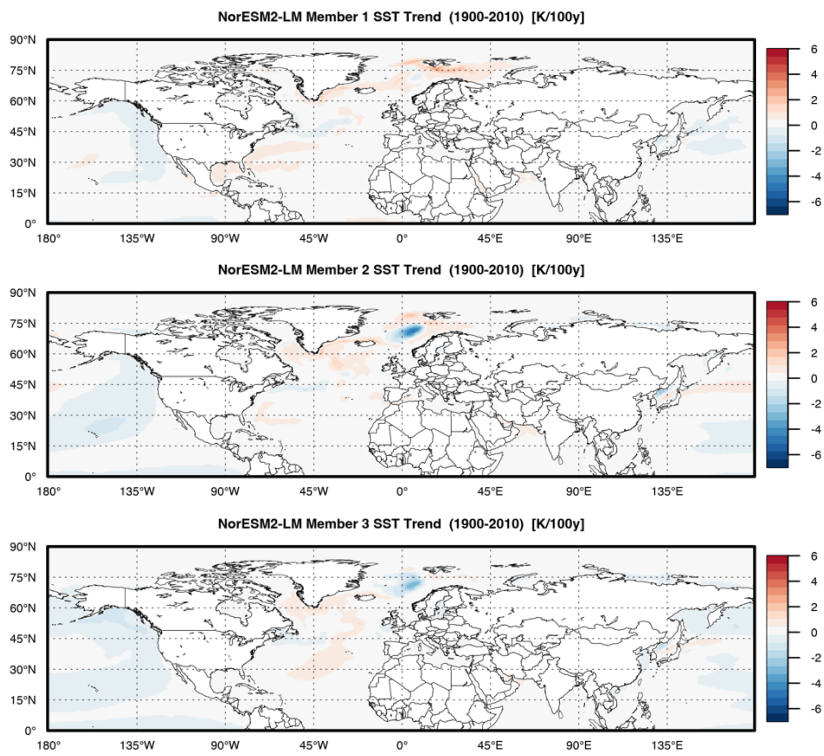


Abbildung 25: SST-Trends in Nordhemisphäre (1900-2010) in ERA-20C und ausgewählten CMIP6-Simulationen.

Dezember SST-Anomalien – Winter-blocking (1961-2010):

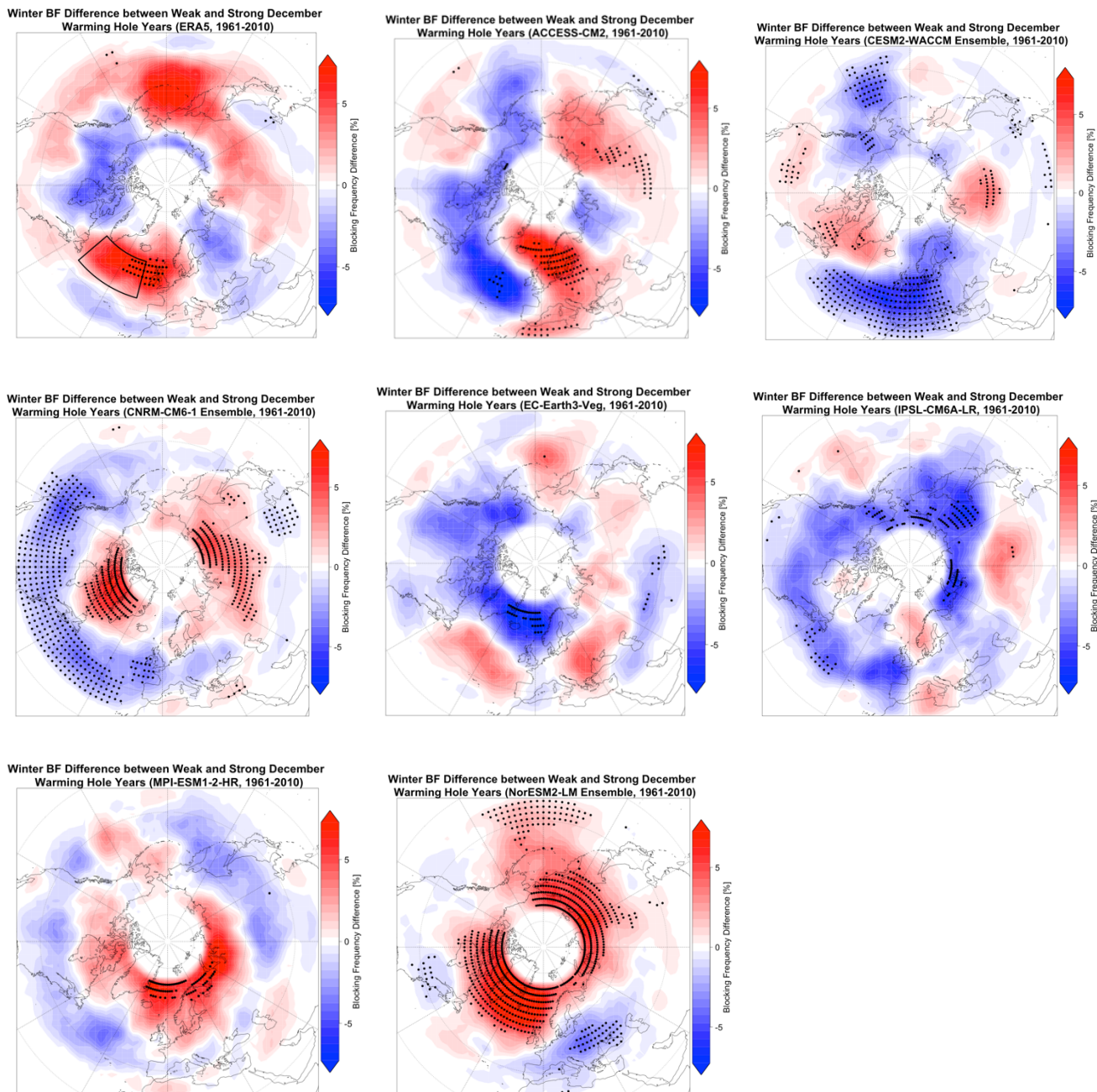
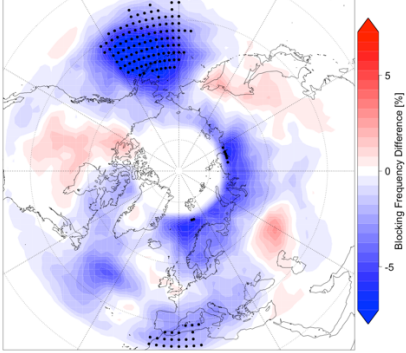


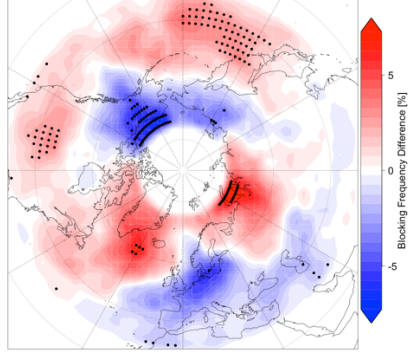
Abbildung 26: Differenz der Winter-blocking-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs (gekennzeichnet durch die Box in der linken oberen Abbildung) im Dezember (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Modelle mit mehreren Realisierungen:

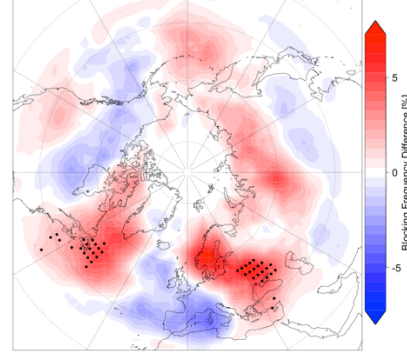
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CESM2-WACCM Member 1, 1961-2010)



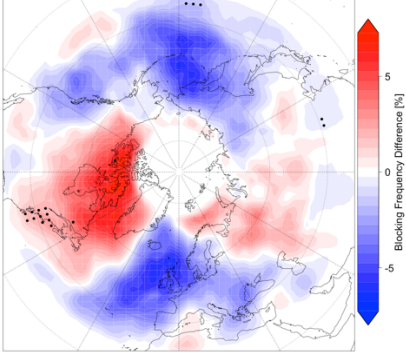
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CESM2-WACCM Member 2, 1961-2010)



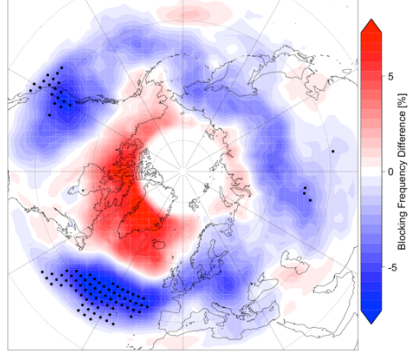
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CESM2-WACCM Member 3, 1961-2010)



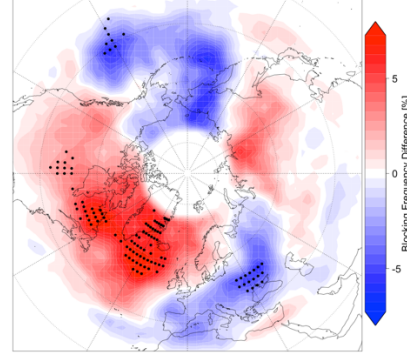
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CNRM-CM6-1 Member 1, 1961-2010)



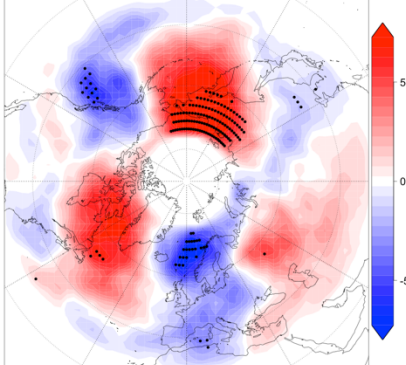
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CNRM-CM6-1 Member 2, 1961-2010)



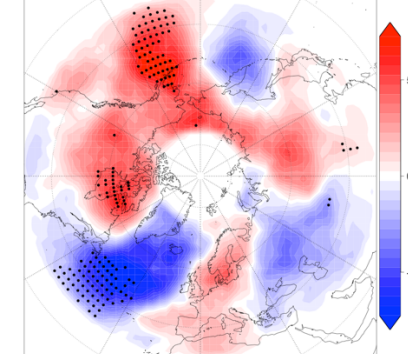
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CNRM-CM6-1 Member 3, 1961-2010)



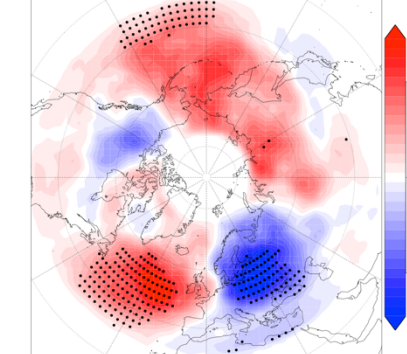
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CNRM-CM6-1 Member 4, 1961-2010)



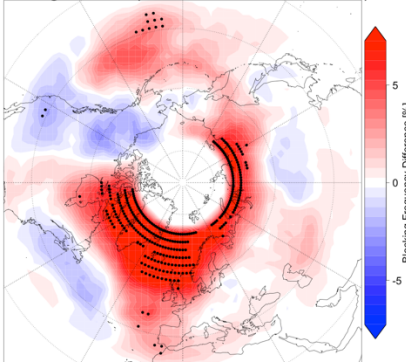
Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (CNRM-CM6-1 Member 5, 1961-2010)



Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (NorESM2-LM Member 1, 1961-2010)



Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (NorESM2-LM Member 2, 1961-2010)



Winter BF Difference between Weak and Strong December Warming Hole Years (NorESM2-LM Member 3, 1961-2010)

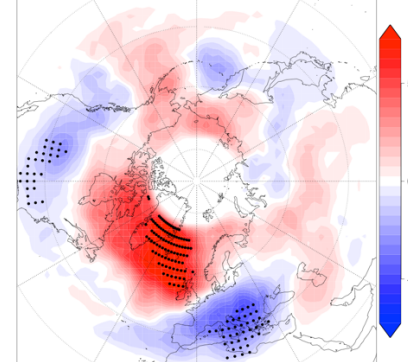


Abbildung 27: Differenz der Winter-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Dezember (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Tabelle 4: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der *blocking*-Frequenz im Winter in Abhängigkeit der SST-Anomalien im Erwärmungsloch zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.

Rang	Modell	Korrelation
1	NorESM2-LM	0,20 (0,52; 0,15; 0,25)
2	IPSL-CM6A-LR	0,04
3	ACCESS-CM2	0,02
4	EC-Earth3-Veg	0,01
5	MPI-ESM1-2-HR	-0,16
6	CESM2-WACCM	-0,17 (-0,02; 0,02; -0,01)
7	CNRM-CM6-1	-0,29 (-0,53; -0,1; 0,29; -0,19; -0,43)

März SST-Anomalien – Frühlings-*blocking* (1961-2010):

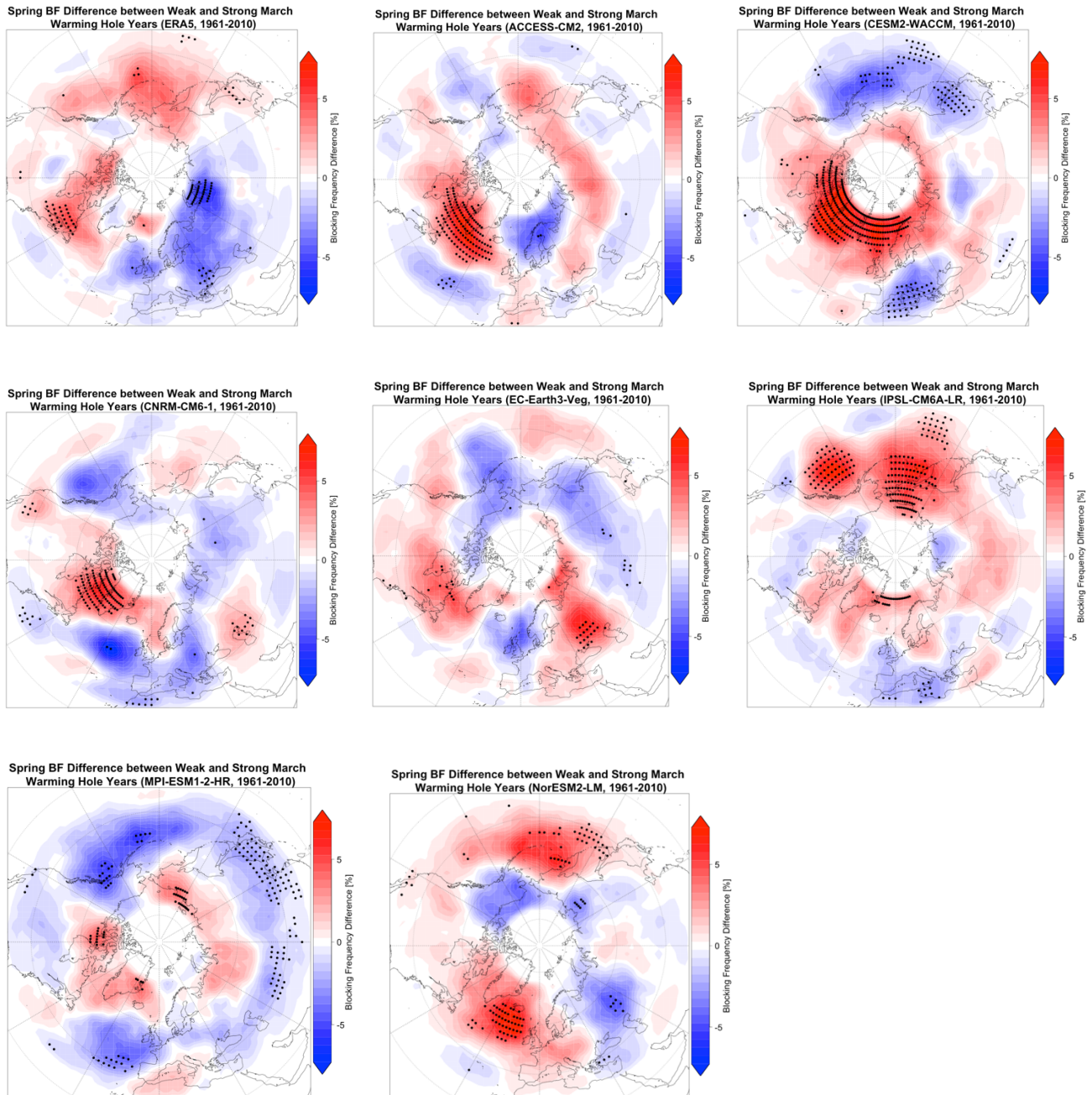


Abbildung 28: Differenz der Frühlings-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im März (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Juni SST-Anomalien – Sommer-*blocking* (1961-2010):

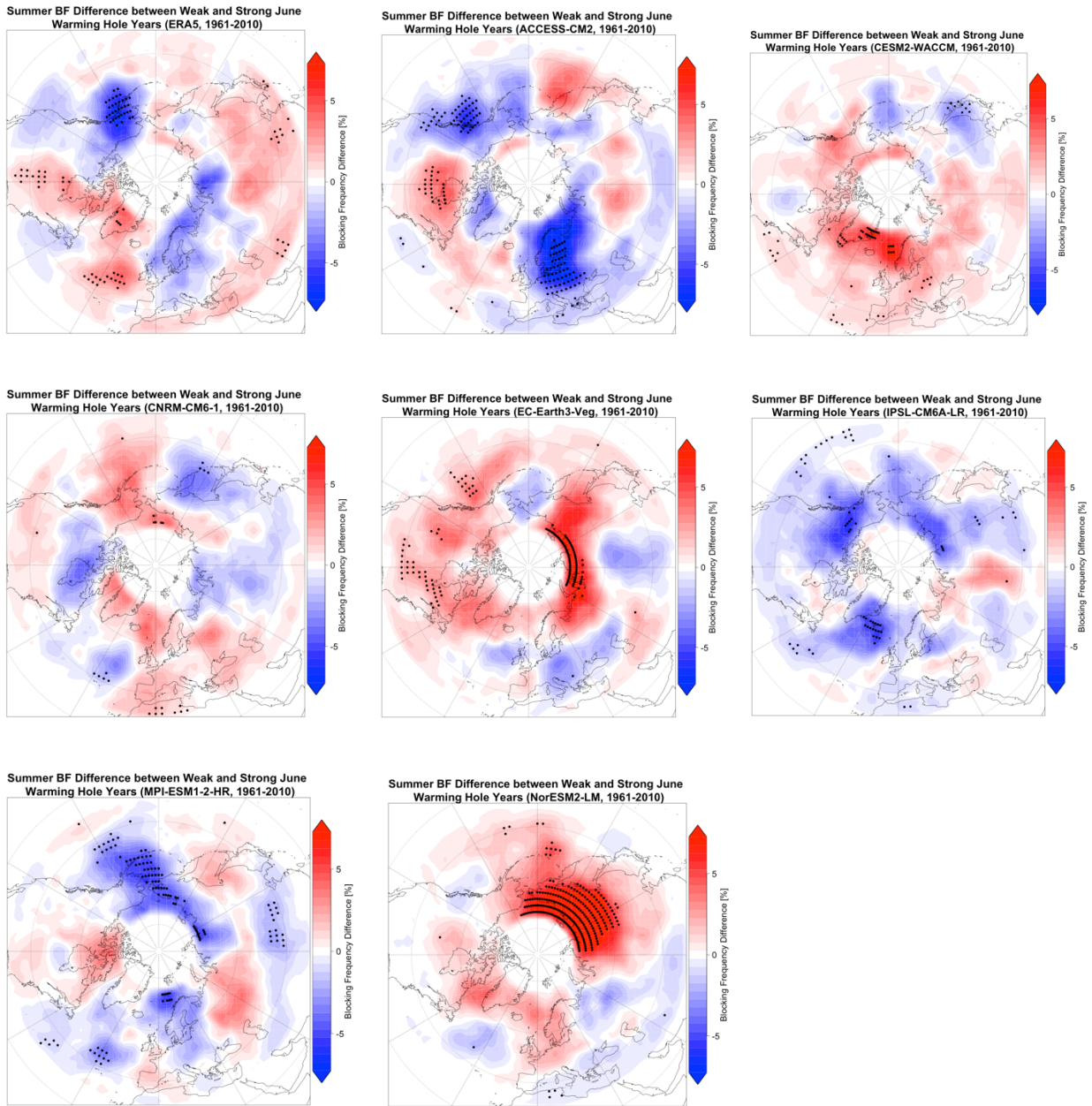


Abbildung 29: Differenz der Sommer-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Juni (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

SST-Trends (2015-2100):

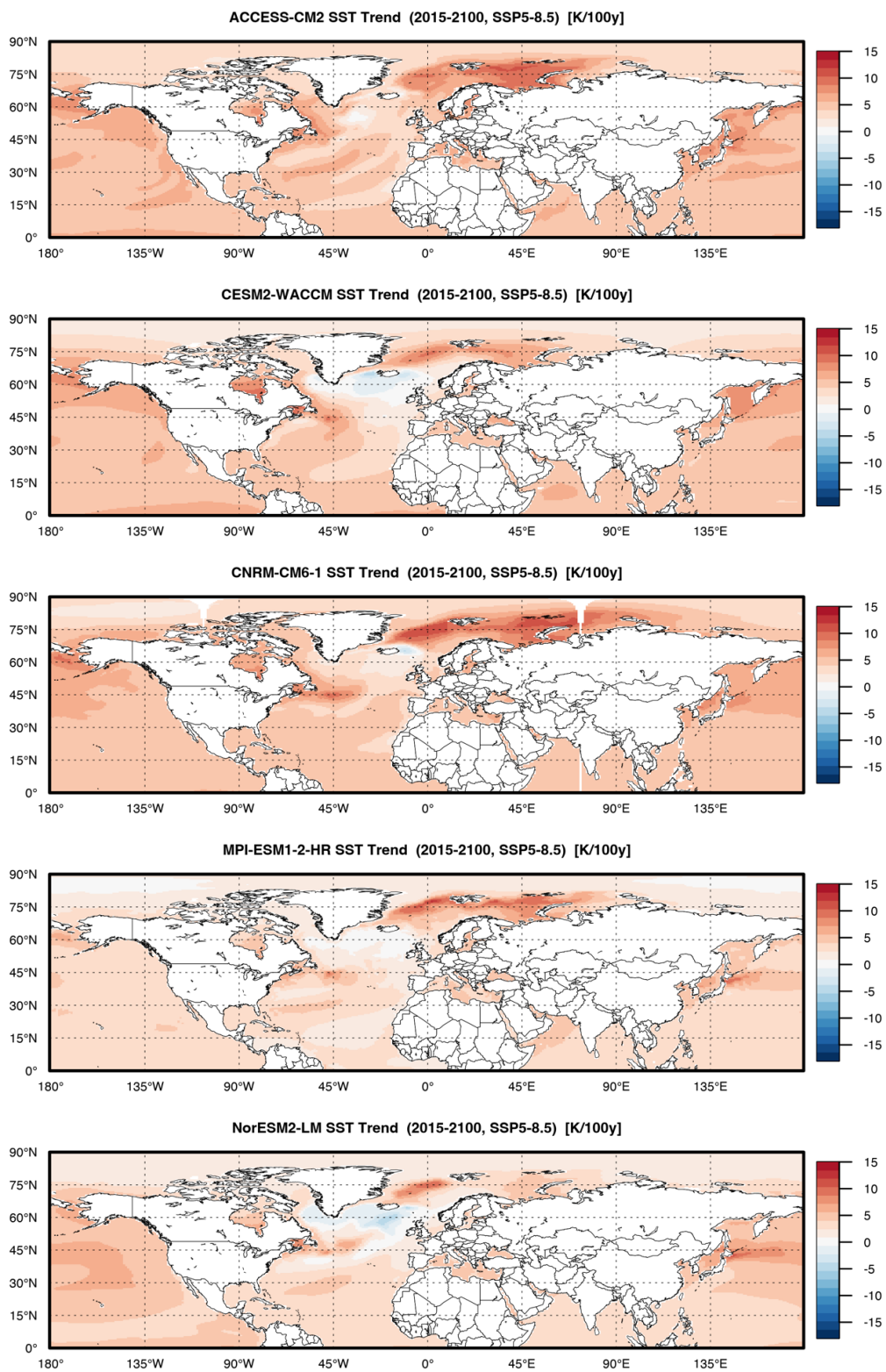


Abbildung 30: SST-Trends in Nordhemisphäre (2015-2100), hochgerechnet auf 100 Jahre im SSP5-8.5-Szenario in ausgewählten CMIP6-Simulationen.

Dezember SST-Anomalien – Winter-blocking (2051-2100, SSP5-8.5):

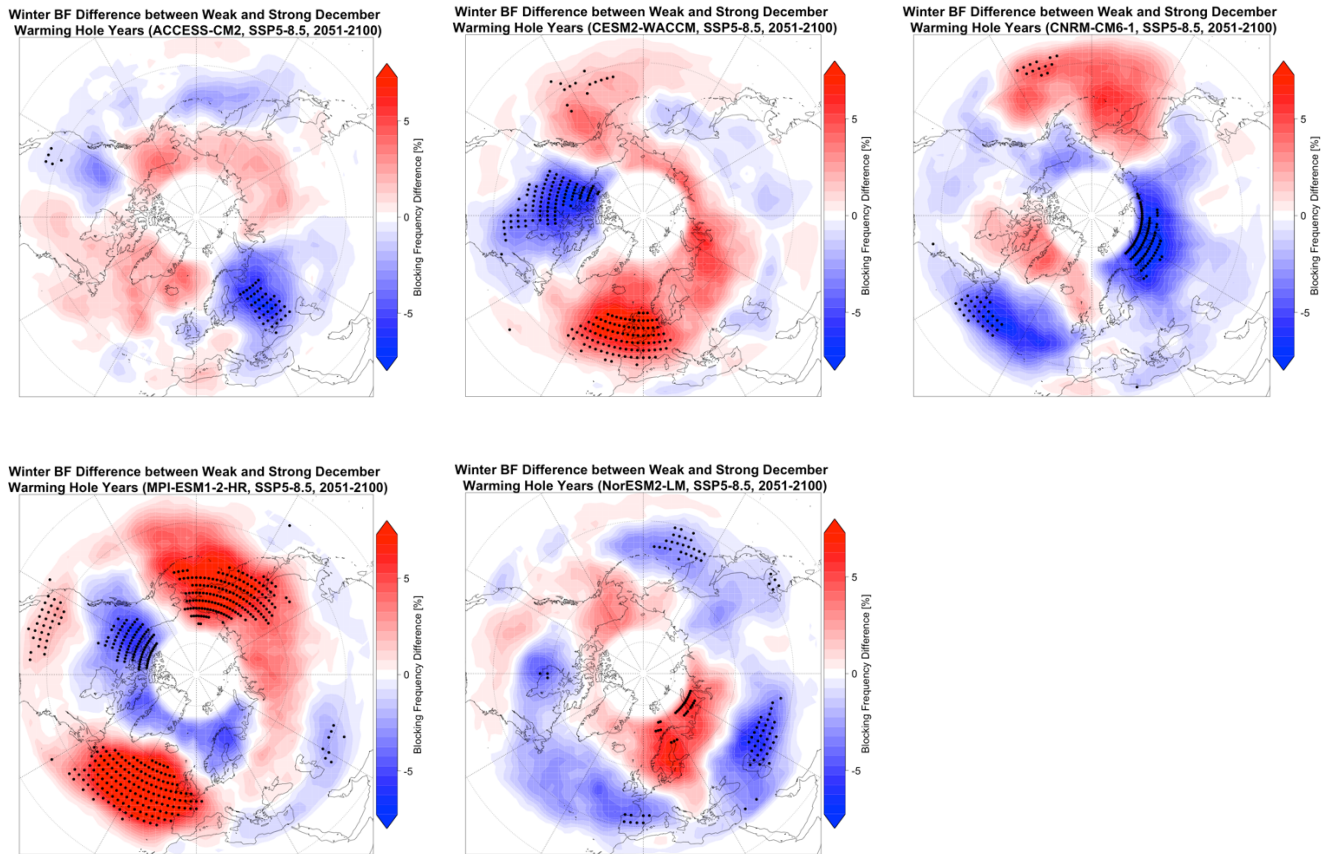


Abbildung 31: Differenz der Winter-blocking-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Dezember (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

März SST-Anomalien – Frühlings-*blocking* (2051-2100, SSP5-8.5):

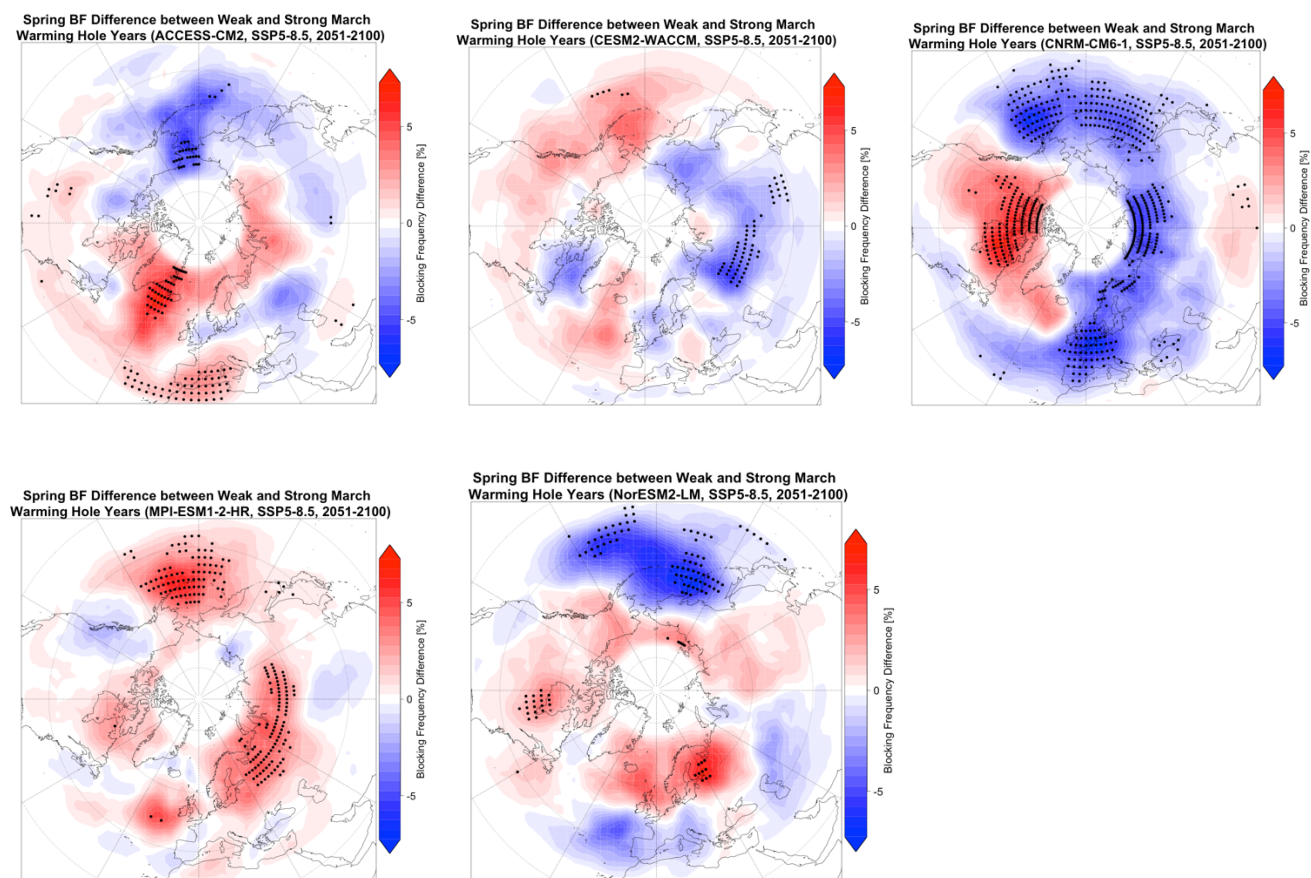


Abbildung 32: Differenz der Frühlings-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im März (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Juni SST-Anomalien – Sommer-*blocking* (2051-2100, SSP5-8.5):

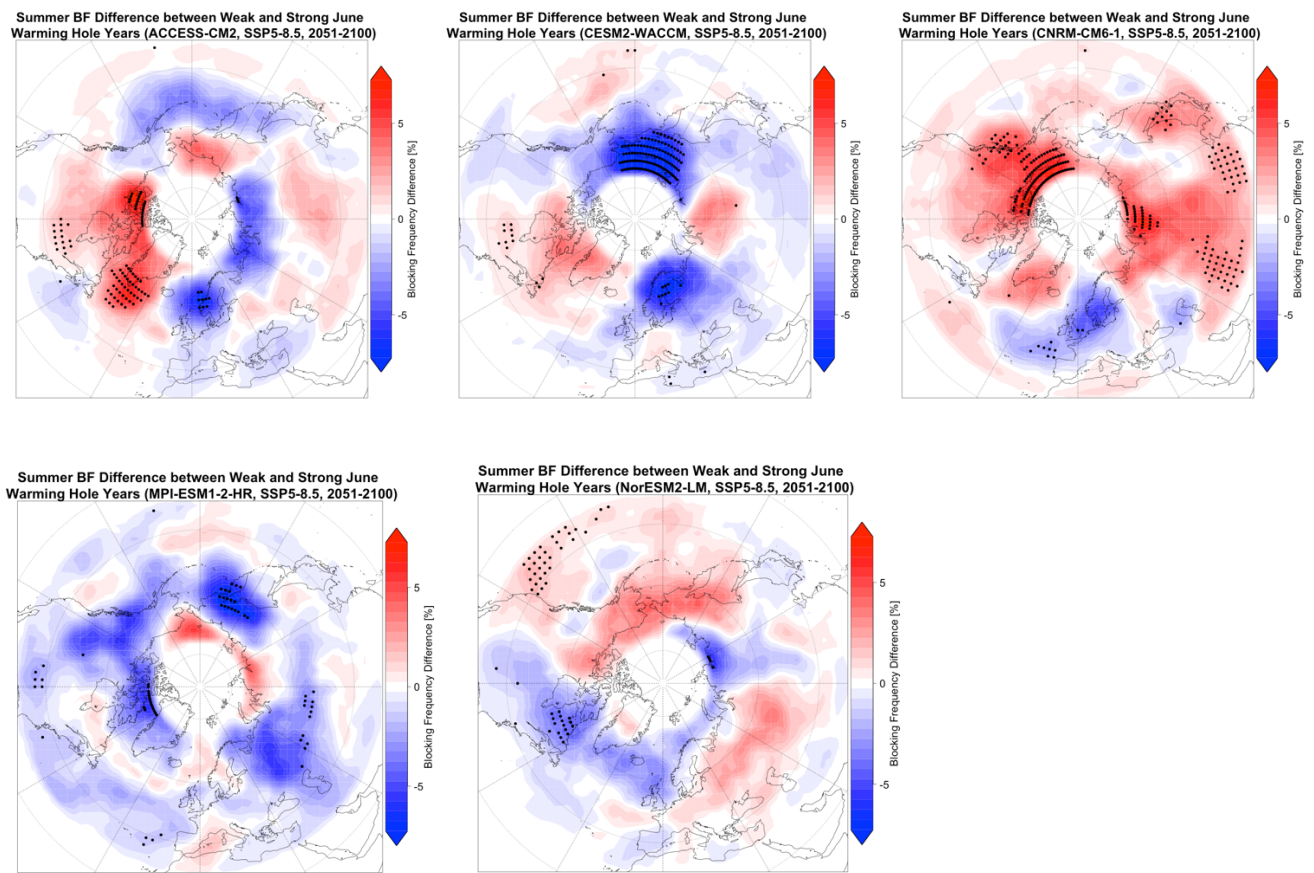


Abbildung 33: Differenz der Sommer-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit positiven und negativen SST-Anomalien im Bereich des Erwärmungslochs im Juni (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

c Saisonale Schnee- und Eisbedeckung und blockierende Wetterlagen

Schneebedeckung März – Frühlings-*blocking* (1961-2010):

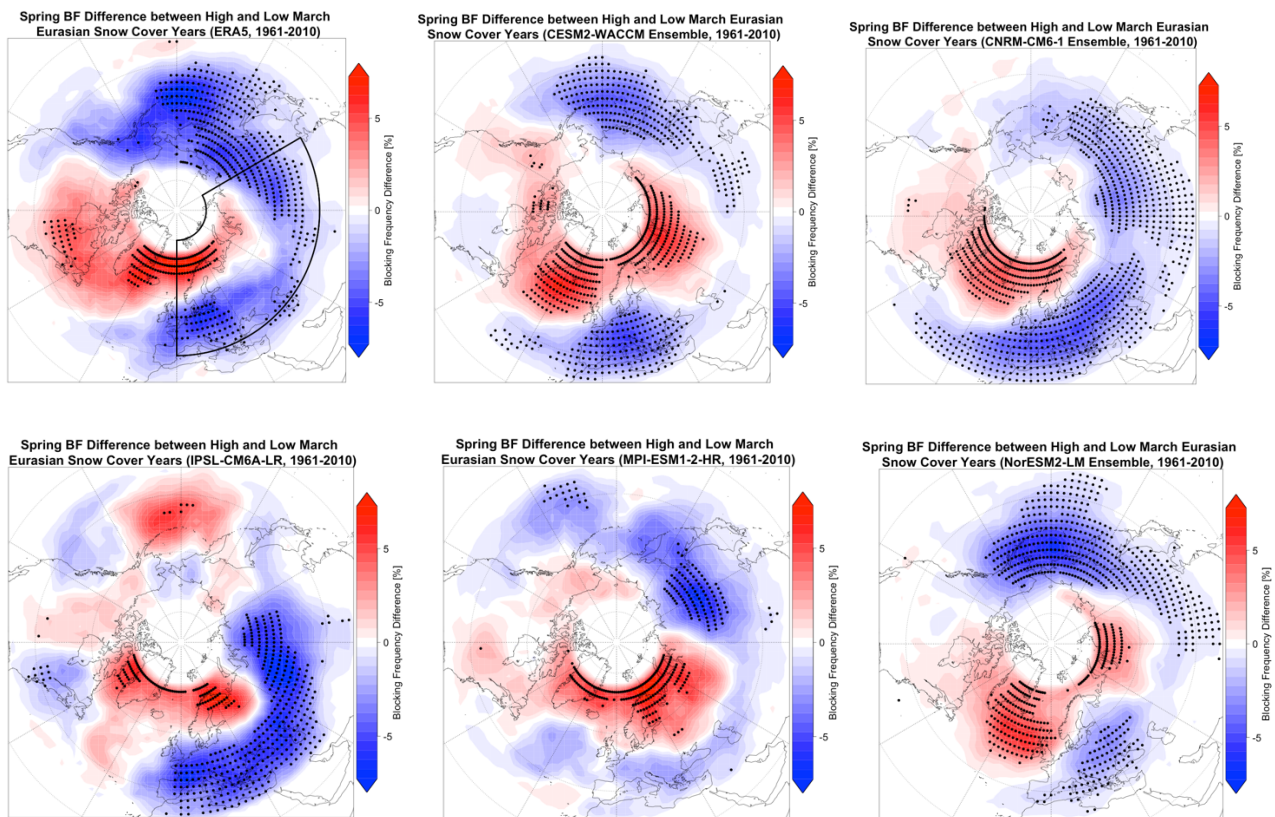
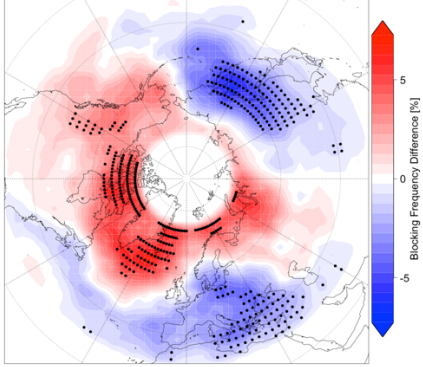


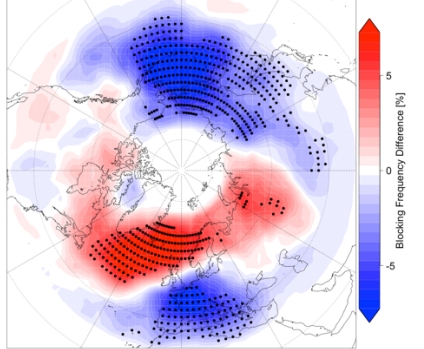
Abbildung 34: Differenz der Frühlings-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Schneebedeckung in Eurasien (40°-80°N, 0°-120°O, gekennzeichnet durch die Box in der linken oberen Abbildung) im März (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Modelle mit mehreren Realisierungen:

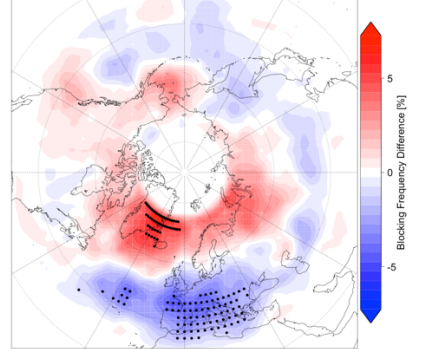
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CESM2-WACCM Member 1, 1961-2010)



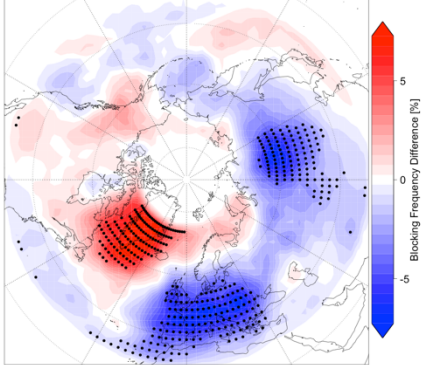
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CESM2-WACCM Member 2, 1961-2010)



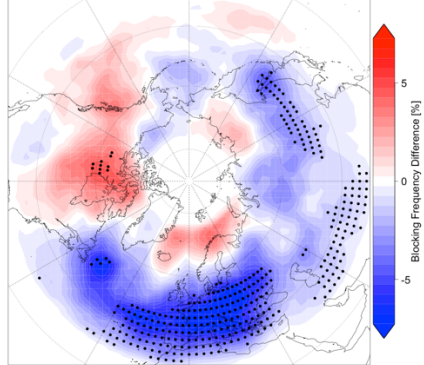
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CESM2-WACCM Member 3, 1961-2010)



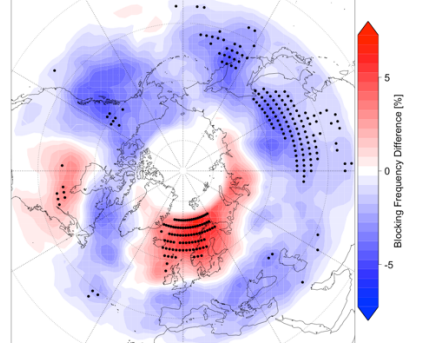
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 1, 1961-2010)



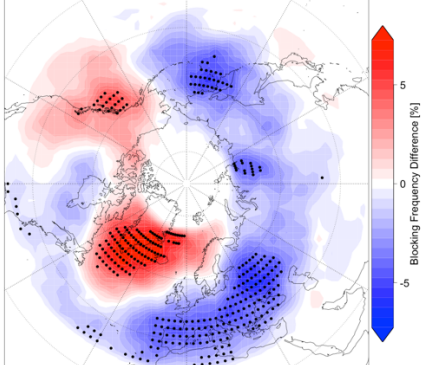
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 2, 1961-2010)



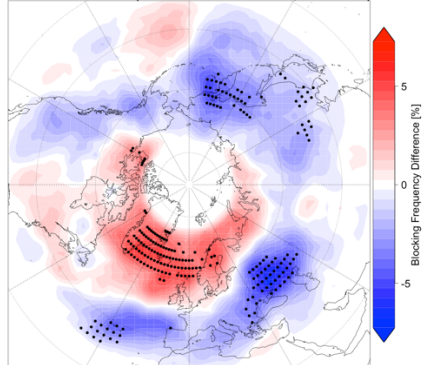
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 3, 1961-2010)



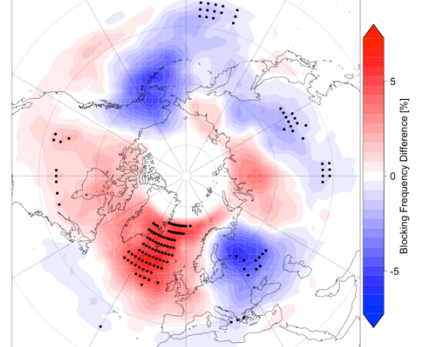
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 4, 1961-2010)



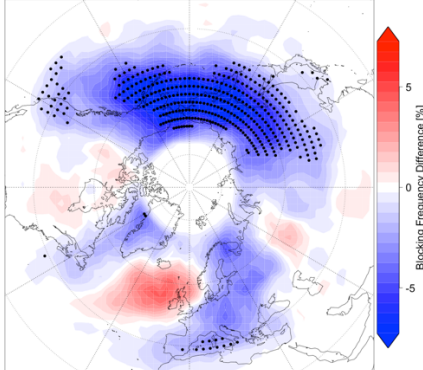
Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 5, 1961-2010)



Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (NorESM2-LM Member 1, 1961-2010)



Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (NorESM2-LM Member 2, 1961-2010)



Spring BF Difference between High and Low March Eurasian Snow Cover Years (NorESM2-LM Member 3, 1961-2010)

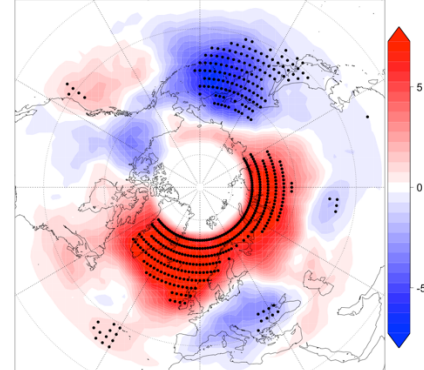


Abbildung 35: Differenz der Frühlings-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Schneebedeckung in Eurasien im März (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Tabelle 5: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der *blocking*-Frequenz im Frühling in Abhängigkeit der Eurasischen Schneebedeckung im März zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.

Rang	Modell	Korrelation
1	CNRM-CM6-1	0,89 (0,79; 0,67; 0,52; 0,76; 0,71)
2	IPSL-CM6A-LR	0,68
3	NorESM2-LM	0,67 (0,65; 0,04; 0,66)
3	CESM2-WACCM	0,67 (0,74; 0,64; 0,75)
5	MPI-ESM1-2-HR	0,55

Schneebedeckung März – Frühlings-*blocking* (2051-2100; SSP5-8.5):

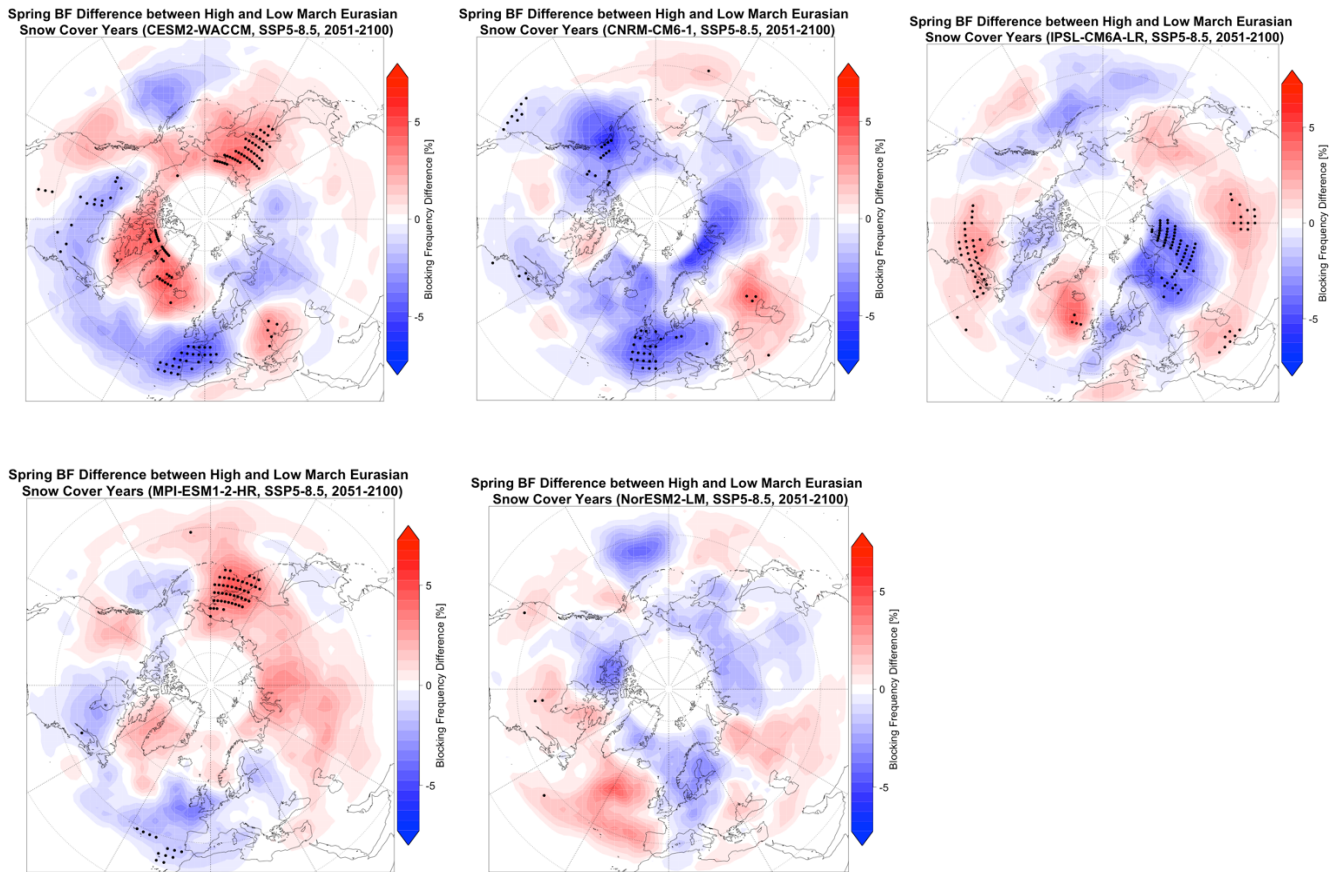


Abbildung 36: Differenz der Frühlings-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Schneebedeckung in Eurasien im März (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Differenz der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals im November – *blocking* im Zeitraum Januar bis März (1961-2010):

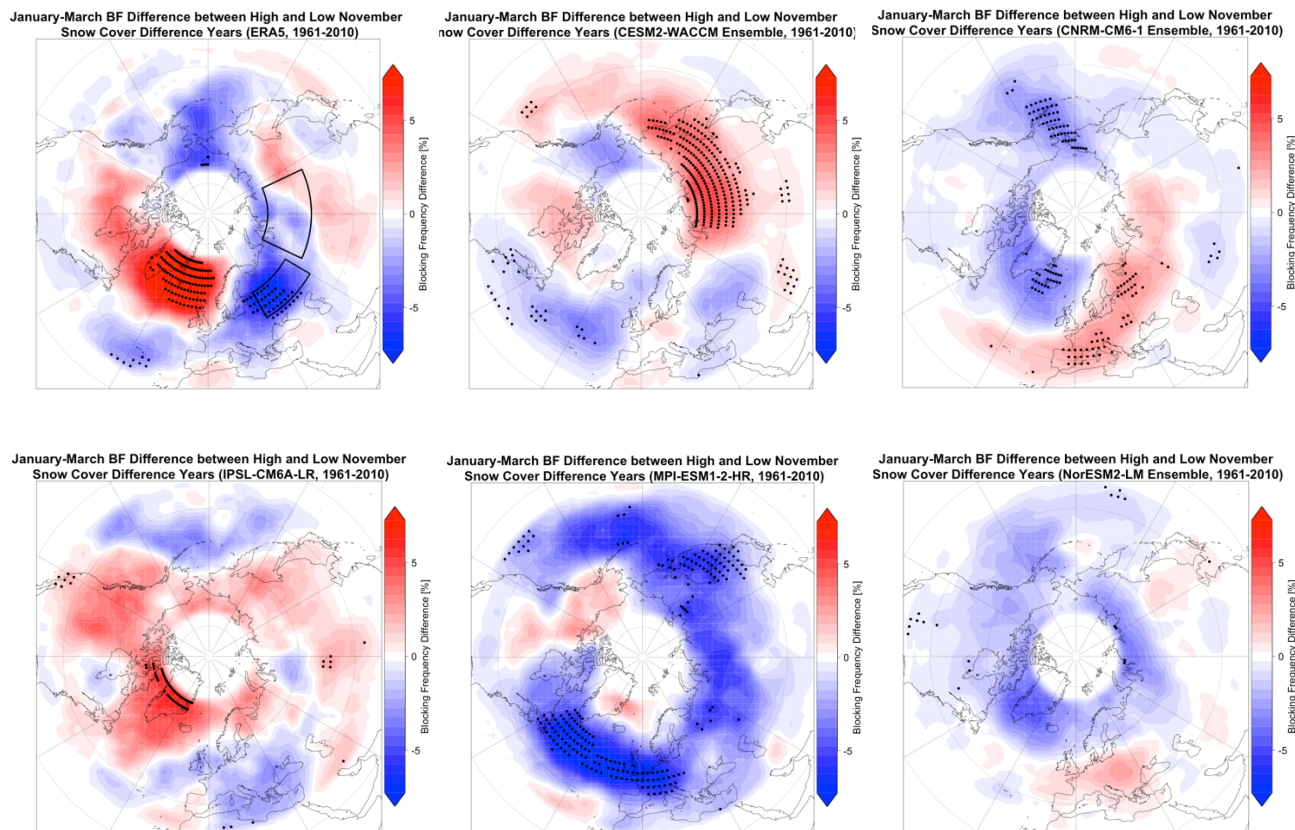
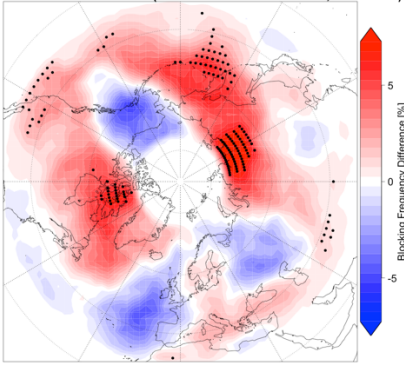


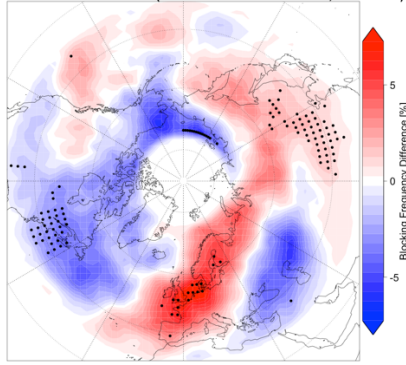
Abbildung 37: Differenz der *blocking*-Frequenz der Monate Januar bis März zwischen Jahren mit großen und kleinen Unterschieden der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals (55°-70°N, 65°-115°O - 50°-60°N, 30°-60°O, gekennzeichnet durch die beiden Boxen in der linken oberen Abbildung) im November (1961-2010) in ERA5-Reanalyse und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Modelle mit mehreren Realisierungen:

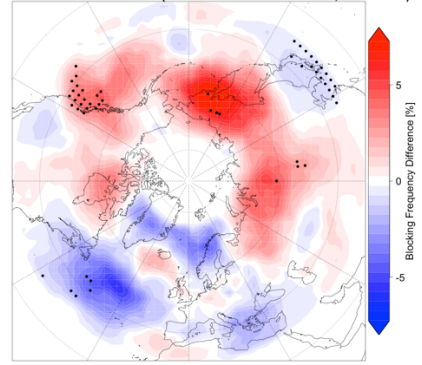
January-March BF Difference between High and Low November now Cover Difference Years (CESM2-WACCM Member 1, 1961-2010)



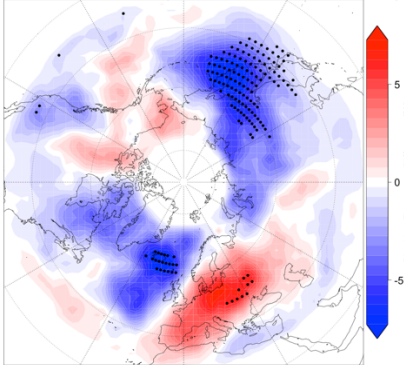
January-March BF Difference between High and Low November now Cover Difference Years (CESM2-WACCM Member 2, 1961-2010)



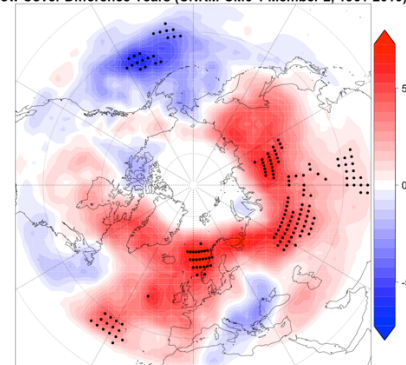
January-March BF Difference between High and Low November now Cover Difference Years (CESM2-WACCM Member 3, 1961-2010)



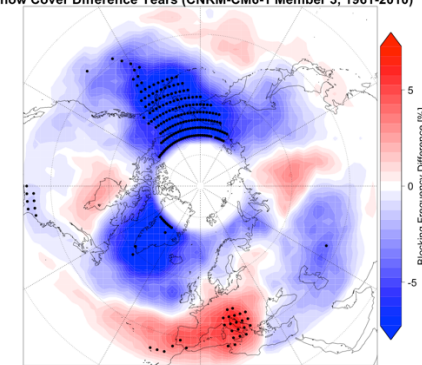
January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (CNRM-CM6-1 Member 1, 1961-2010)



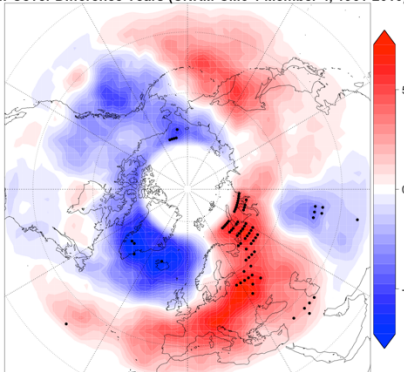
January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (CNRM-CM6-1 Member 2, 1961-2010)



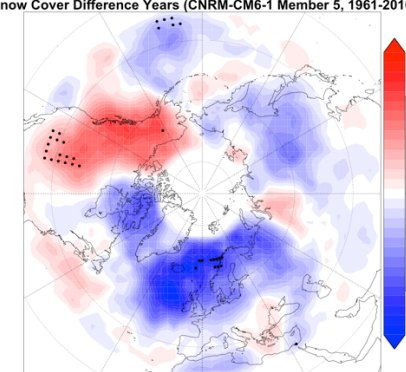
January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (CNRM-CM6-1 Member 3, 1961-2010)



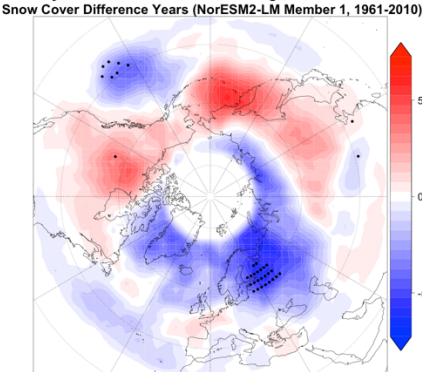
January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (CNRM-CM6-1 Member 4, 1961-2010)



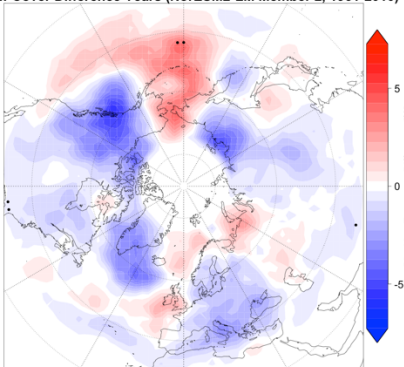
January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (CNRM-CM6-1 Member 5, 1961-2010)



January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (NorESM2-LM Member 1, 1961-2010)



January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (NorESM2-LM Member 2, 1961-2010)



January-March BF Difference between High and Low November Snow Cover Difference Years (NorESM2-LM Member 3, 1961-2010)

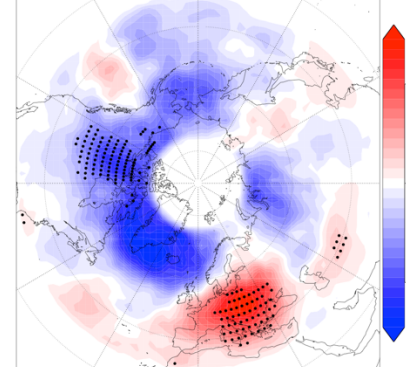


Abbildung 38: Differenz der *blocking*-Frequenz der Monate Januar bis März zwischen Jahren mit großen und kleinen Unterschieden der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals (55°-70°N, 65°-115°O - 50°-60°N, 30°-60°O) im November (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Tabelle 6: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der *blocking*-Frequenz im Winter in Abhängigkeit der November-Schneebedeckung westlich und östlich des Urals zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.

Rang	Modell	Korrelation
1	IPSL-CM6A-LR	0,60
2	MPI-ESM1-2-HR	0,14
3	CESM2-WACCM	0,12 (0,37; -0,31; 0,06)
3	CNRM-CM6-1	-0,60 (-0,66; 0,20; -0,68; -0,52; -0,21)
5	NorESM2-LM	-0,61 (-0,13; -0,09; -0,71)

Differenz der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals im November – *blocking* im Zeitraum Januar bis März (2051-2100, SSP5-8.5):

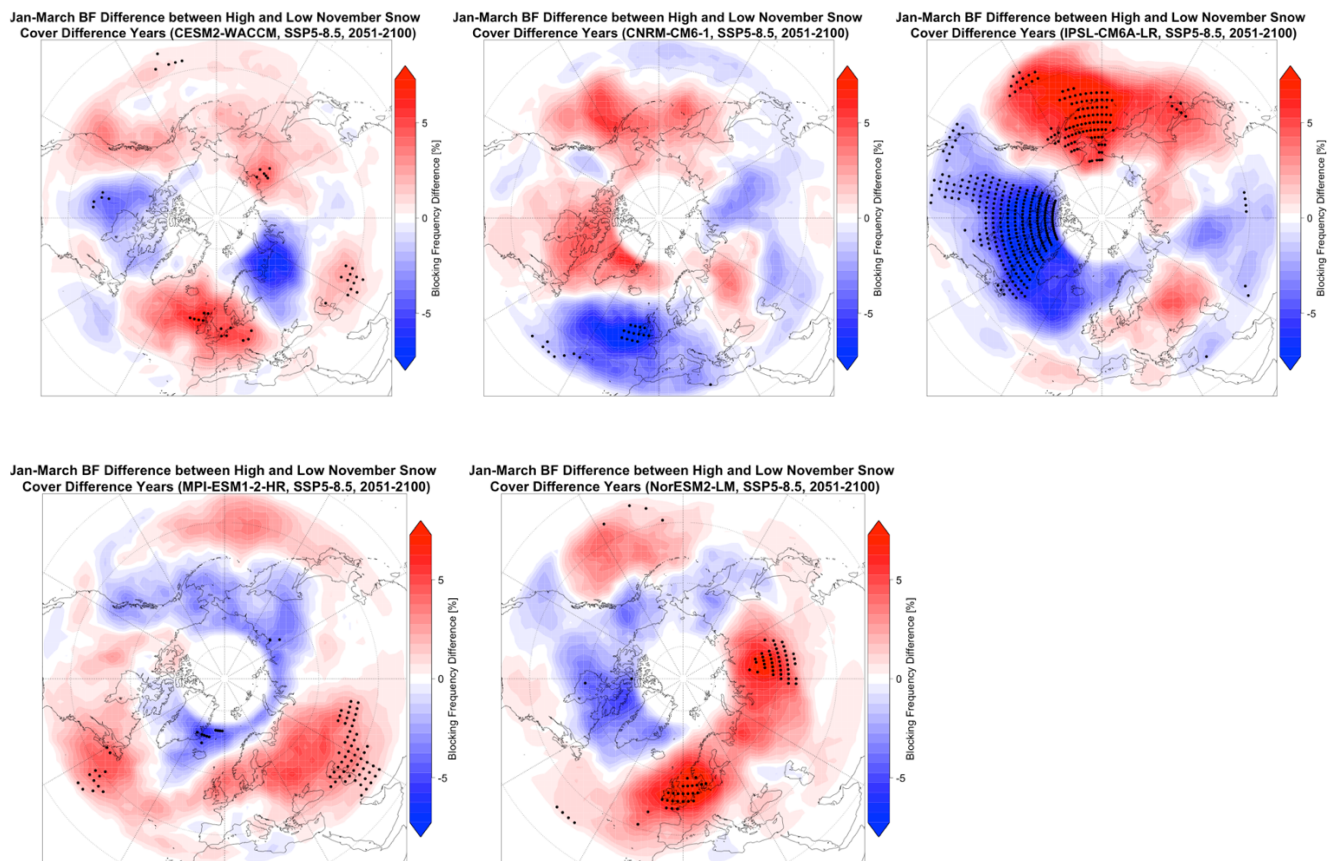


Abbildung 39: Differenz der *blocking*-Frequenz der Monate Januar bis März zwischen Jahren mit großen und kleinen Unterschieden der Schneebedeckung westlich und östlich des Urals (55°-70°N, 65°-115°O - 50°-60°N, 30°-60°O) im November (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Frühlings-Meereisbedeckung – Sommer-*blocking* (1961-2010):

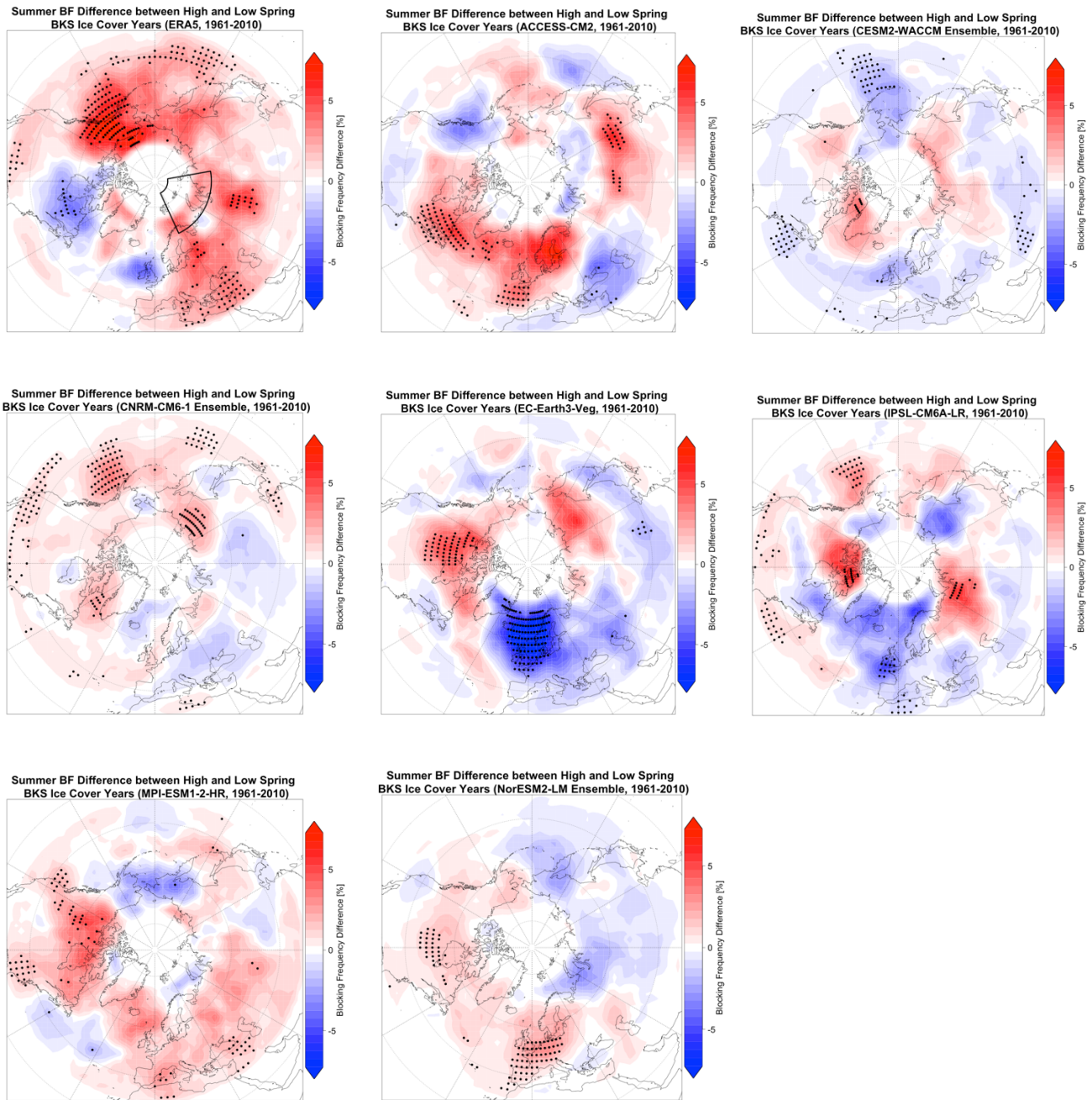
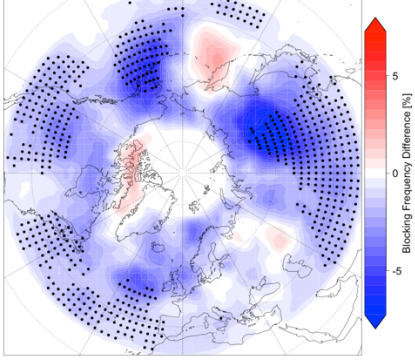


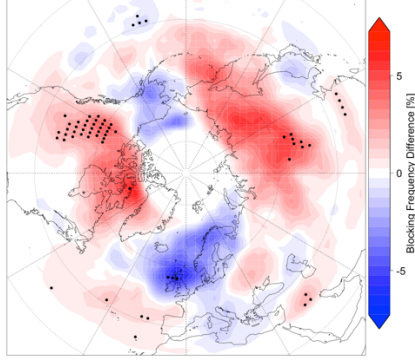
Abbildung 40: Differenz der Sommer-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Eisbedeckung in der Barents-Karasee (68°-85°N, 25°-100°O, gekennzeichnet durch Box in der linken oberen Abbildung) in den Monaten März bis Mai (1961-2010) in ERA5 und CMIP6-Simulationen. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Modelle mit mehreren Realisierungen:

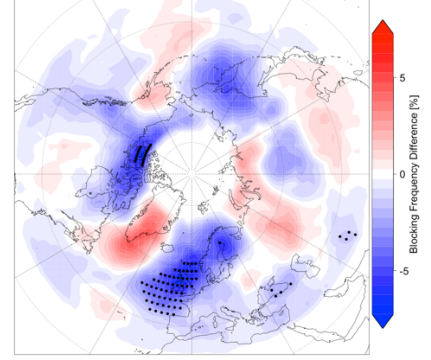
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CESM2-WACCM Member 1, 1961-2010)



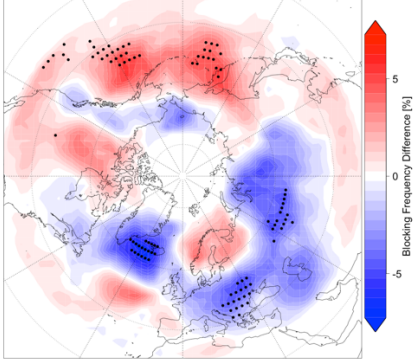
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CESM2-WACCM Member 2, 1961-2010)



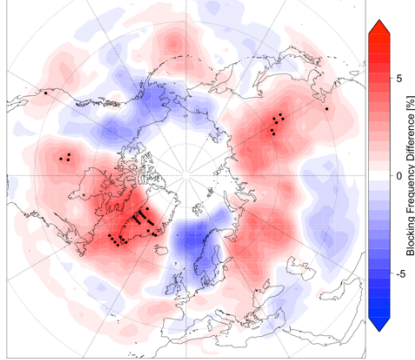
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CESM2-WACCM Member 3, 1961-2010)



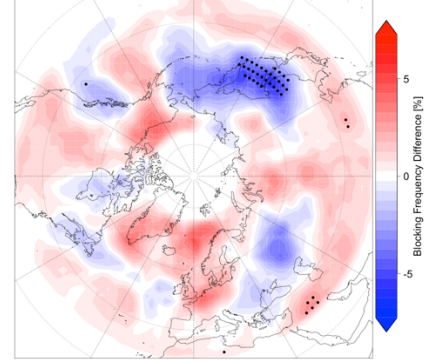
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 1, 1961-2010)



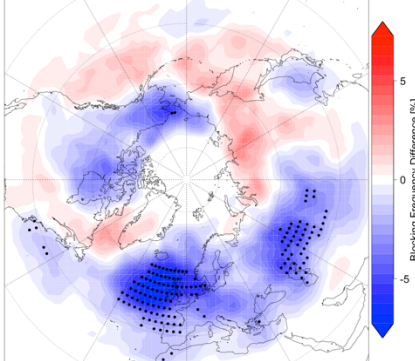
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 2, 1961-2010)



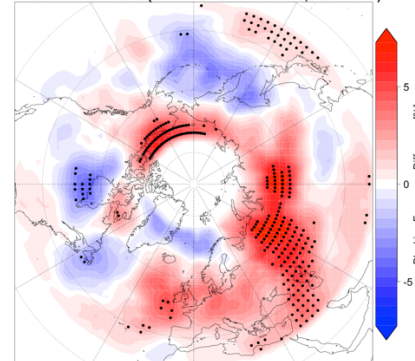
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 3, 1961-2010)



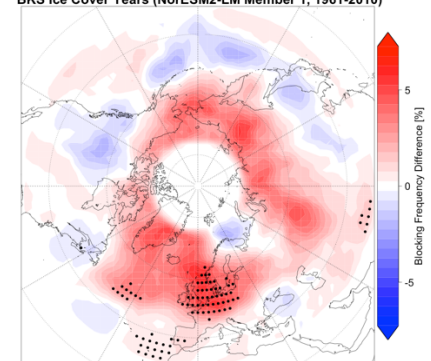
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 4, 1961-2010)



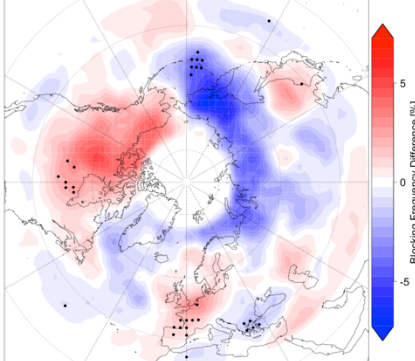
Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (CNRM-CM6-1 Member 5, 1961-2010)



Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (NorESM2-LM Member 1, 1961-2010)



Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (NorESM2-LM Member 2, 1961-2010)



Summer BF Difference between High and Low Spring
BKS Ice Cover Years (NorESM2-LM Member 3, 1961-2010)

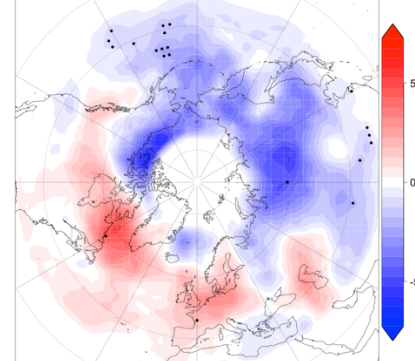


Abbildung 41: Differenz der Sommer-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Eisbedeckung in der Barents-Karasee (68°-85°N, 25°-100°O) in den Monaten März bis Mai (1961-2010) in CMIP6-Simulationen mit mehreren Realisierungen (CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, NorESM2-LM). Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

Tabelle 7: Ranking nach räumlicher Korrelation der Differenzen der *blocking*-Frequenz im Sommer in Abhängigkeit der Frühlings-Eisbedeckung in der Barents-Karasee zwischen ERA5 und CMIP6-Simulationen zwischen 90°W und 90°O. Bei Modellen mit mehreren Realisierungen wird zunächst die Korrelation des Komposits aller Realisierungen angegeben, in Klammern dann die des Komposits der einzelnen Realisierungen. Es ist zu beachten, dass sich das Ranking ändern könnte, wenn mehrere Realisierungen bei allen aufgeführten Modellen betrachtet würden.

Rang	Modell	Korrelation
1	CESM2-WACCM	0,25 (0,25; 0,07; 0,24)
2	IPSL-CM6A-LR	0,16
3	EC-Earth3-Veg	-0,15
4	MPI-ESM1-2-HR	-0,18
5	ACCESS-CM2	-0,33
6	NorESM2-LM	-0,38 (0,07; -0,40; -0,44)
7	CNRM-CM6-1	-0,39 (-0,25; -0,04; 0,04; 0,05; 0,31)

Frühlings-Meereisbedeckung – Sommer-*blocking* (2051-2100, SSP5-8.5):

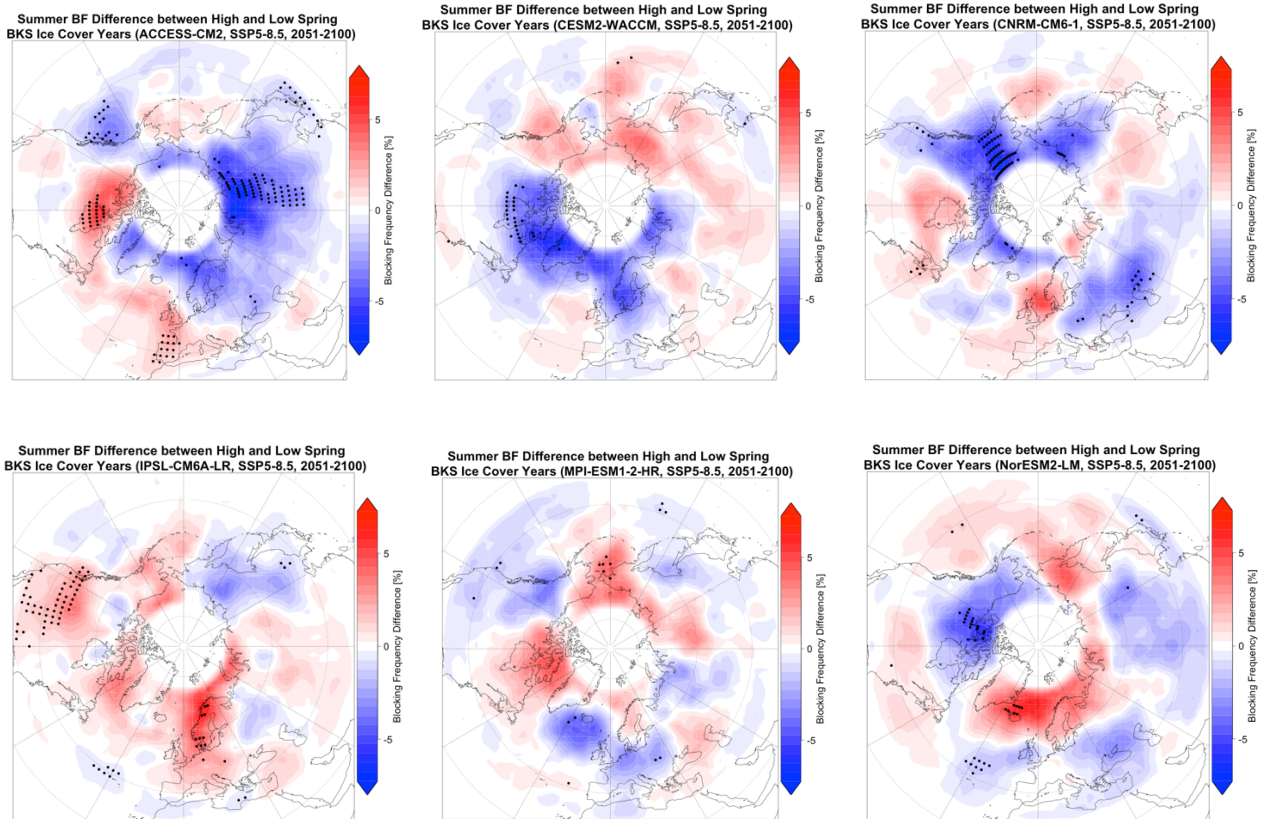


Abbildung 42: Differenz der Sommer-*blocking*-Frequenz zwischen Jahren mit hoher und niedriger Eisbedeckung in der Barents-Karasee (68°-85°N, 25°-100°O) in den Monaten März bis Mai (2051-2100) in CMIP6-Simulationen im SSP5-8.5-Szenario. Punkte kennzeichnen Signifikanz auf dem 5%-Niveau.

G Klimaextreme und blockierende Wetterlagen

In diesem Kapitel werden zusätzliche Informationen und Abbildungen zu den in Kapitel 7 und 8 im Hauptdokument beschriebenen Extremereignissen sowie deren Zusammenhang zu blockierenden Wetterlagen präsentiert.

a Kontingenztabelle und Heidke-Skill-Score

Um den Mehrwert von *blocking* als Prädiktor für Extremereignisse zu bewerten, wurde der *Heidke-Skill-Score* (HSS) berechnet (Heidke, 1926). Der HSS quantifiziert, um wie viel besser eine Vorhersage im Vergleich zu einer zufallsbasierten Vorhersage ist und wird wie folgt definiert:

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)}$$

Dabei kennzeichnen die vier Variablen a,b,c,d die vier Einträge in einer 2x2-Kontingenztabelle, die Auskunft darüber gibt, welche Anzahl eines bestimmten Ereignis z.B. korrekt vorhergesagt wird oder vorhergesagt wurde und nicht eingetreten ist oder nicht vorhergesagt wurde. In Tabelle 8 ist eine Kontingenztabelle schematisch dargestellt. Dabei lassen sich die vier Einträge folgendermaßen verstehen:

- a: Ereignis wird vorhergesagt und tritt ein (korrekt positiv)
- b: Ereignis wird vorhergesagt und tritt nicht ein (falsch positiv)
- c: Ereignis wird nicht vorhergesagt, tritt aber ein (falsch negativ)
- d: Ereignis wird nicht vorhergesagt und tritt nicht ein (korrekt negativ)

Liest und addiert man die Einträge einer Kontingenztabelle spaltenweise, erhält man die Summe der *beobachteten* Ja- und Nein-Ereignisse, führt man die Prozedur zeilenweise durch, erhält man die Summe der *vorhergesagten* Ja- und Nein-Ereignisse. Der HSS kann Werte zwischen $-\infty$ und 1 annehmen. Ein Wert < 0 bedeutet, dass die Vorhersage schlechter als eine zufallsbasierte Vorhersage ist, bei einem Wert von 1 ist die Vorhersage perfekt. Bei einem Wert zwischen 0 und 1 ist die Vorhersage nicht perfekt, aber besser als eine zufallsbasierte.

Tabelle 8: Schema einer Kontingenztabelle.

	Ereignis beobachtet	Ereignis nicht beobachtet	Summe vorhergesagter Ereignisse
Ereignis vorhergesagt	a	b	a+b
Ereignis nicht vorhergesagt	c	d	c+d
Summe beobachteter Ereignisse	a+c	b+d	a+b+c+d

Basierend auf der erstellten Kontingenztabelle können verschiedene bedingte Häufigkeiten berechnet werden. Nach Tabelle 8 lassen sich diese wie folgt berechnen:

- $P_{\text{block|HW}} = a/(a+c)$
- $P_{\text{HW|block}} = a/(a+b)$
- $P_{\text{HW|no block}} = c/(c+d)$

Als Beispiel für eine Kontingenztabelle wird die von ERA5 für Hitzewellen gezeigt (Tabelle 9). Dabei gilt nach dem Schema in Tabelle 8 ein Ereignis als vorhergesagt, wenn ein *block* auftritt und ein Ereignis als beobachtet, wenn eine Hitzewelle auftritt.

Tabelle 9: Kontingenztabelle für das Auftreten von *blocking* und Hitzewellen im Sommerhalbjahr (April-September, 1961-2010) in ERA5.

	Hitzewelle	keine Hitzewelle	Summe <i>block</i> / kein <i>block</i>
<i>block</i>	144	518	662
kein <i>block</i>	220	8268	8488
Summe Hitzewelle / keine Hitzewelle	364	8786	9150

b Temperaturextreme und blockierende Wetterlagen

Zur Quantifizierung der Stärke von Hitzewellen wurde jeder Hitzewelle eine Magnitude, die Dauer und Anomalie kombiniert, zugewiesen. Nach Russo et al. (2014) erfolgte die Berechnung der Magnitude in folgenden Schritten:

- Bestimmung des 90. Perzentils für jeden Kalendertag basierend auf der Referenzperiode 1981-2010. Um den Effekt von Ausreißern herauszurechnen, wird ein 31-tägiges gleitendes Mittel um den zu berechnenden Kalendertag gelegt.
- Identifikation von Hitzewellen als Überschreiten des 90. Perzentils für mindestens drei aufeinanderfolgende Tage.
- Unterteilung der Hitzewelle in Teilhitzewellen mit jeweils drei Tagen Länge. Ist die Länge der Hitzewelle kein Vielfaches von 3, werden die letzten ein oder zwei Tage mit den nachfolgenden Tagen auf eine dreitägige Teilhitzewelle ergänzt. D. h. bei einer zehntägigen Hitzewelle wird der zehnte Tag mit den beiden nachfolgenden Tagen, die nicht mehr das Hitzewellen-Kriterium erfüllen, ergänzt. Dementsprechend erhält man vier Teilhitzewellen mit jeweils drei Tagen Länge.
- Berechnung der Summe der drei Tageshöchsttemperaturen einer Teilhitzewelle.
- Der Summe der Tageshöchsttemperaturen wird eine Magnitude zwischen 0 und 1 zugewiesen. Die Magnitude basiert auf einer empirischen kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung. In diese Wahrscheinlichkeitsverteilung fließt das jährliche Maximum der summierten Tageshöchsttemperatur der Teilhitzewellen ein. Da die Referenzperiode 30 Jahre umfasst, werden 30 Werte zum Erstellen der kumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilung berücksichtigt.
- Die Magnituden aller Teilhitzewellen werden addiert. Die Summe definiert die Magnitude der Hitzewelle.

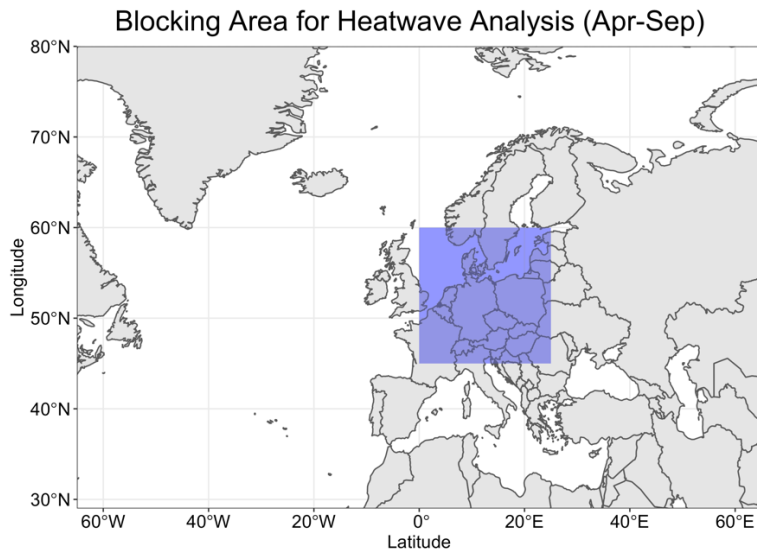


Abbildung 43: Ausschnitt, in dem untersucht wurde, ob bei Hitzewellen im Sommerhalbjahr *blocking* vorliegt.

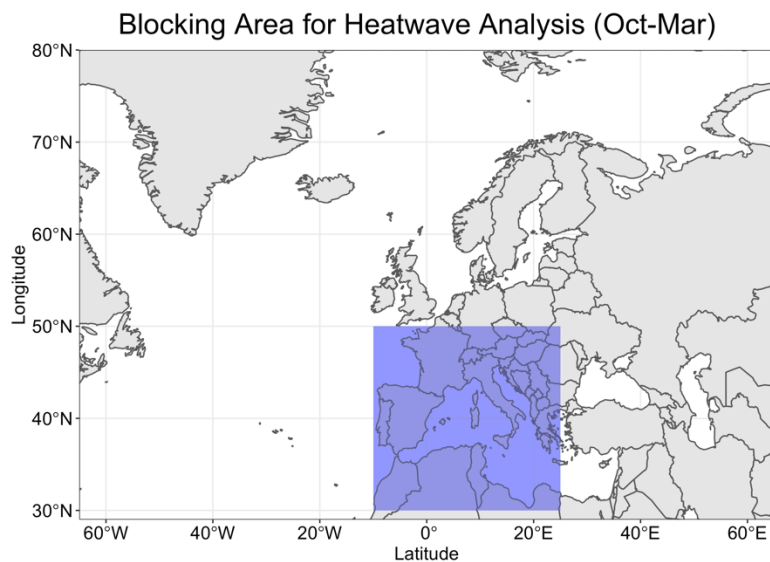
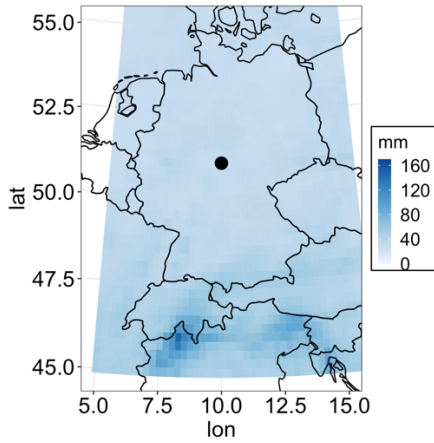


Abbildung 44: Ausschnitt, in dem untersucht wurde, ob bei Hitzewellen im Winterhalbjahr *blocking* vorliegt.

c Niederschlagsextreme und blockierende Wetterlagen

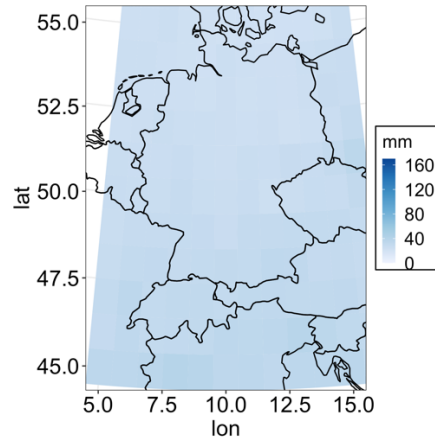
Abbildung 45 zeigt, dass insbesondere für die Darstellung des Niederschlags in den bergigen Regionen (Mittelgebirge und Alpen) eine hohe räumliche Auflösung notwendig ist. In ERA5 und CCLM-EC-Earth3-Veg sind die Niederschlagsmaxima der Staulagen in den Alpen, insbesondere auf der Alpensüdseite, gut zu erkennen (Abbildung 45a und d). So entspricht das 99,9. Perzentil einer täglichen Niederschlagsmenge von über 100 mm in Teilen Norditaliens sowie Teilen der Südschweiz. In Deutschland entspricht eine tägliche Niederschlagsmenge von 20-60 mm dem 99,9 Perzentil, wobei die höchsten Werte am Alpenrand sowie im Bereich der südlichen Mittelgebirge auftreten. Der Vergleich mit den niedriger aufgelösten Reanalysen ERA-20C und 20CR (Abbildung 45b und c) zeigt, dass diese die lokalen Maxima nicht darstellen können. Insbesondere die Maxima auf der Alpensüdseite werden nicht aufgelöst, sodass z.B. die Unterschiede zwischen den Alpen und Norddeutschland relativ klein sind.

99.9. Percentile of Daily Precipitation
(ERA5, 1981-2010)



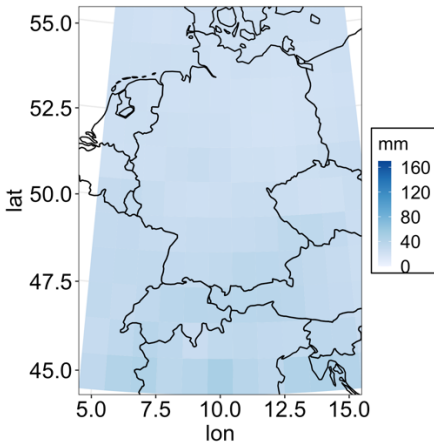
a)

99.9. Percentile of Daily Precipitation
(ERA-20C, 1981-2010)



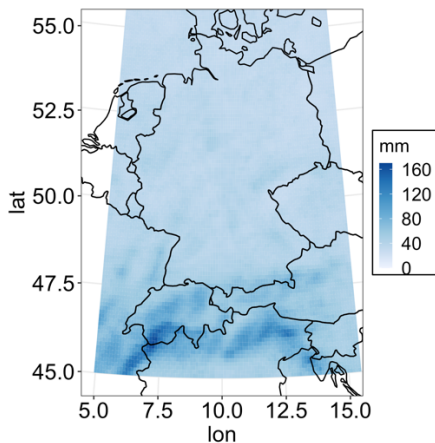
b)

99.9. Percentile of Daily Precipitation
(20CR, 1981-2010)



c)

99.9. Percentile of Daily Precipitation
(CCLM-EC-Earth3-Veg, 1981-2010)



d)

Abbildung 45: 99.9. Perzentil der täglichen Niederschlagsmenge in ERA5 (a), ERA-20C (b), 20CR (c) und CCLM-EC-Earth3-Veg (d). Der Punkt in a kennzeichnet den Ort, für den die zeitliche Entwicklung der Starkregen-Tage untersucht wurde.

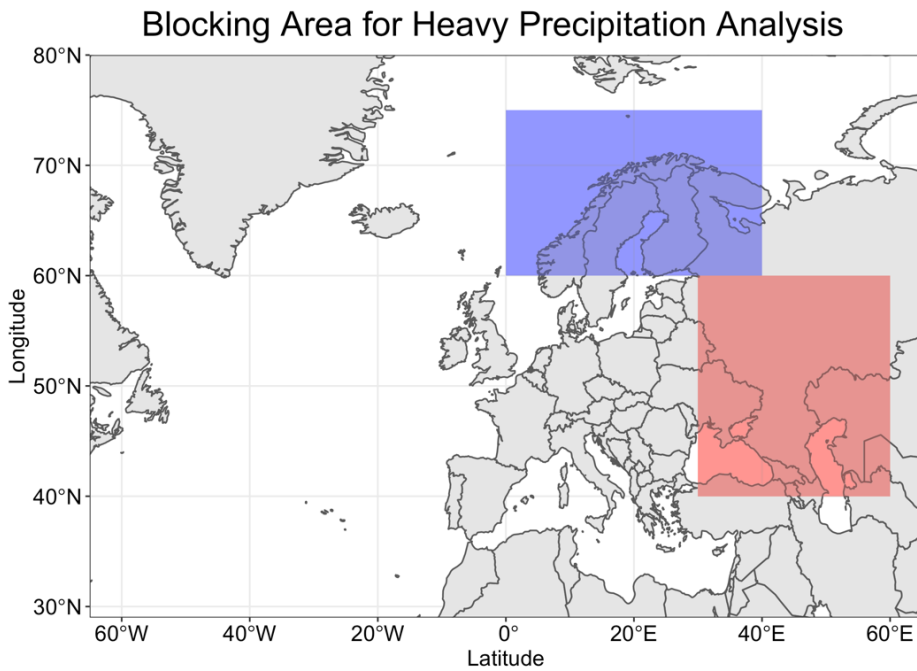


Abbildung 46: Ausschnitte, in denen untersucht wurde, ob bei Starkregen *blocking* vorliegt.

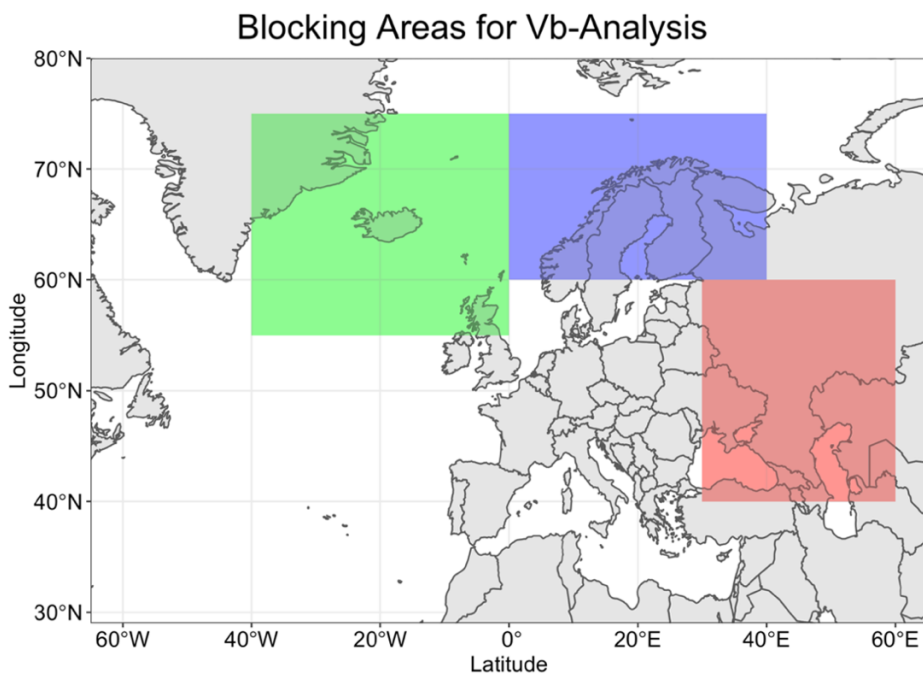


Abbildung 47: Ausschnitte, in denen untersucht wurde, ob bei Vb-Tiefs *blocking* vorliegt.

d Flauten und blockierende Wetterlagen

Der Wert des 5. Perzentils der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe liegt bei ca. 2 m/s in Mitteldeutschland, siehe Abbildung 48. Die Notwendigkeit für höher aufgelöste Simulationen für eine realistische Berechnung der Windgeschwindigkeit in der Grenzschicht zeigt sich beim Vergleich der Reanalysen und CCLM-EC-Earth3-Veg. Die höher aufgelösten Datensätze zeigen im Bereich der Mittelgebirge und Alpen besser die regionalen Unterschiede

zwischen höher und tiefer gelegenen Regionen. Es fällt auf, dass in ERA5 die Windgeschwindigkeiten verbreitet höher sind als in den anderen Datensätzen.

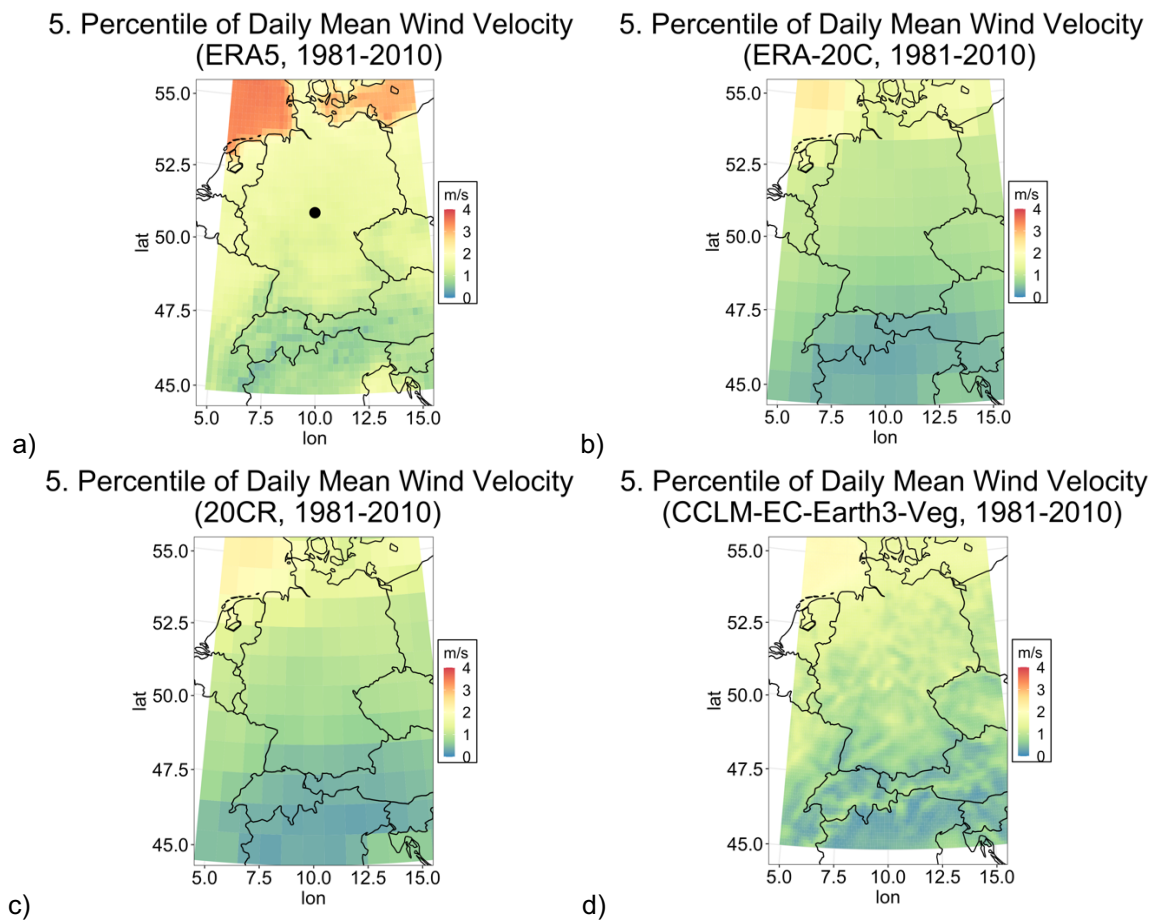


Abbildung 48: 5. Perzentil der Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe in ERA5 (a), ERA-20C (b), 20CR (c) und CCLM-EC-Earth3-Veg (d). Der Punkt in a kennzeichnet den Ort, für den die zeitliche Entwicklung der Flaute-Tage untersucht wurde.

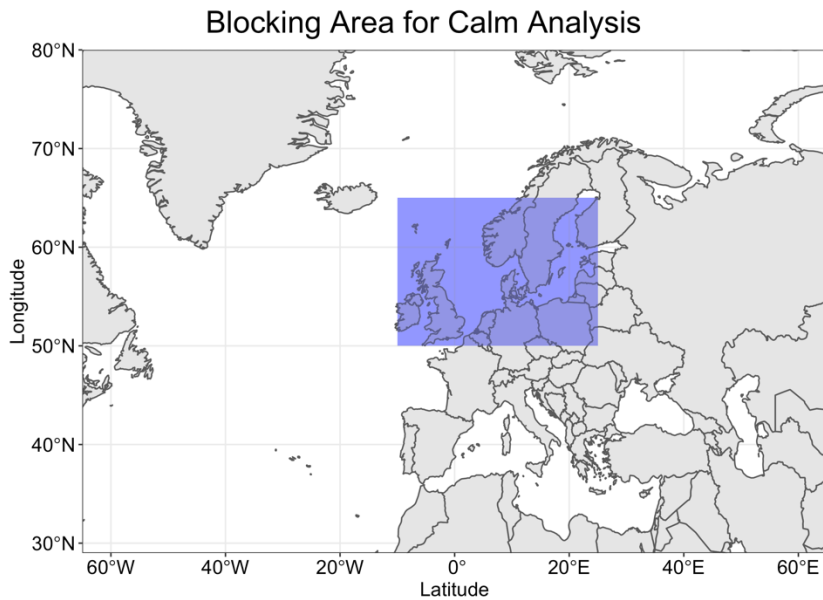


Abbildung 49: Ausschnitt, in dem untersucht wurde, ob bei Flauten *blocking* vorliegt.

Tabelle 10: Übersicht über die bedingten Häufigkeiten bei Flauten in der Mitte Deutschlands im CMIP6-Szenario SSP5-8.5 (2051-2100).

	ACCESS-CM2	CESM2-WACCM	CNRM-CM6-1	CCLM-EC-Earth3-Veg	EC-Earth3-Veg	IPSL-CM6A-LR	MPI-ESM1-2-HR	NorESM2-LM
$P_{\text{block Flaute}}$ [%]	13,3	15,8	20,0	8,7	9,6	7,4	15,7	13,9
$P_{\text{Flaute block}}$ [%]	7,1	9,9	9,3	5,7	7,4	4,5	8,9	9,9
$P_{\text{Flaute no block}}$ [%]	4,8	5,4	4,2	5,0	5,9	4,6	4,9	5,7
HSS [-]	0,03	0,05	0,07	0,01	0,02	-0,001	0,05	0,05