

Wie beeinflussen arktische Klimaänderungen das Wetter und Klima in mittleren Breiten?

Dörthe Handorf¹

Ralf Jaiser¹, Annette Rinke¹, Klaus Dethloff¹,
Judah Cohen², Tetsu Nakamura^{3,4}, Jinro Ukita⁵, Koji Yamazaki^{3,4}

¹Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung,
Forschungsstelle Potsdam

²Atmospheric and Environmental Research, Inc., Lexington, Massachusetts, USA

³National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

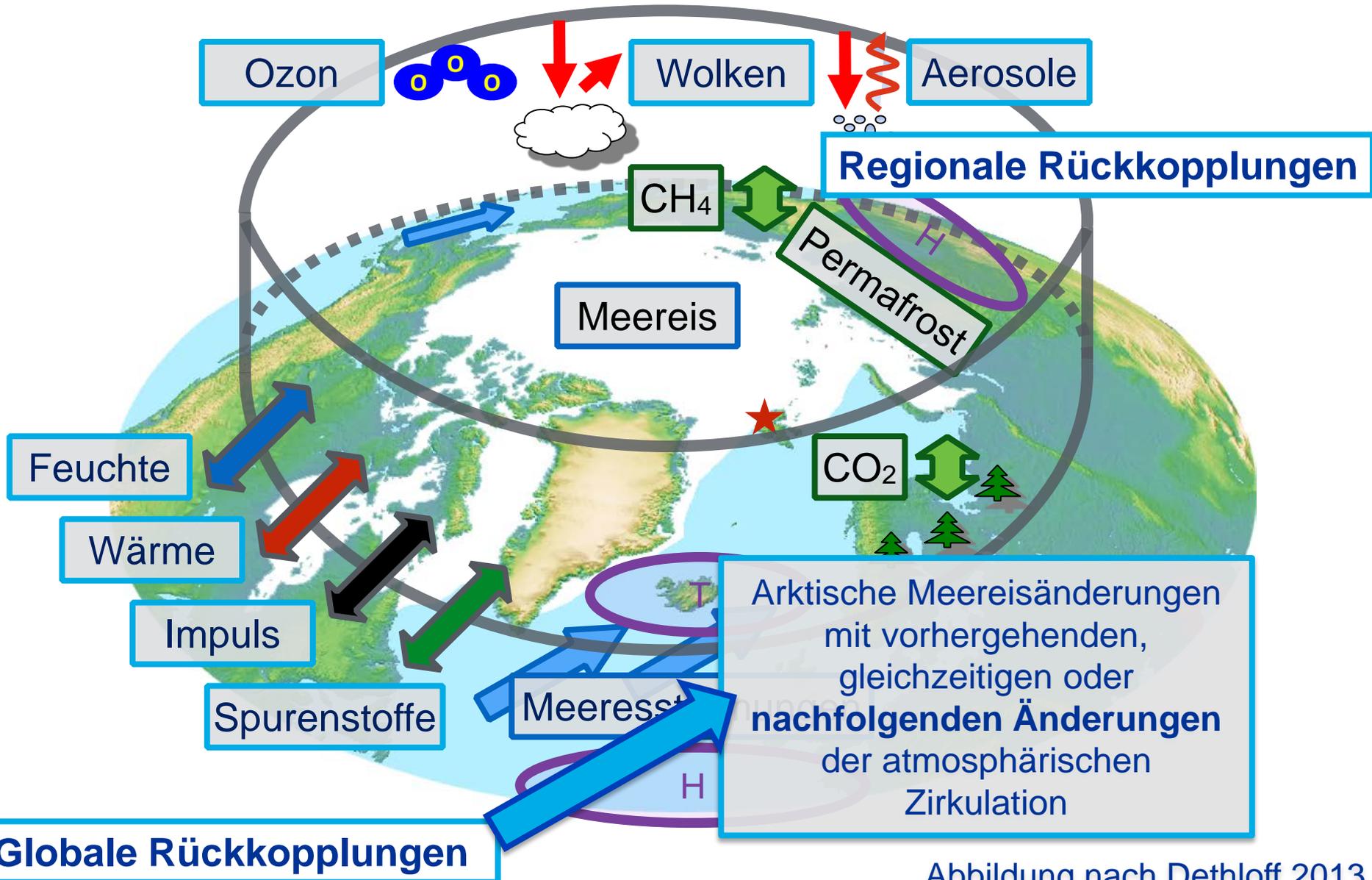
⁴Hokkaido University, Sapporo, Japan

⁵Niigata University, Niigata, Japan

 DACH
2016

DACH-Tagung, Berlin, 18. März 2016

Arktisches Meereis © AWI/Mario Hoppmann CC-BY 4.0



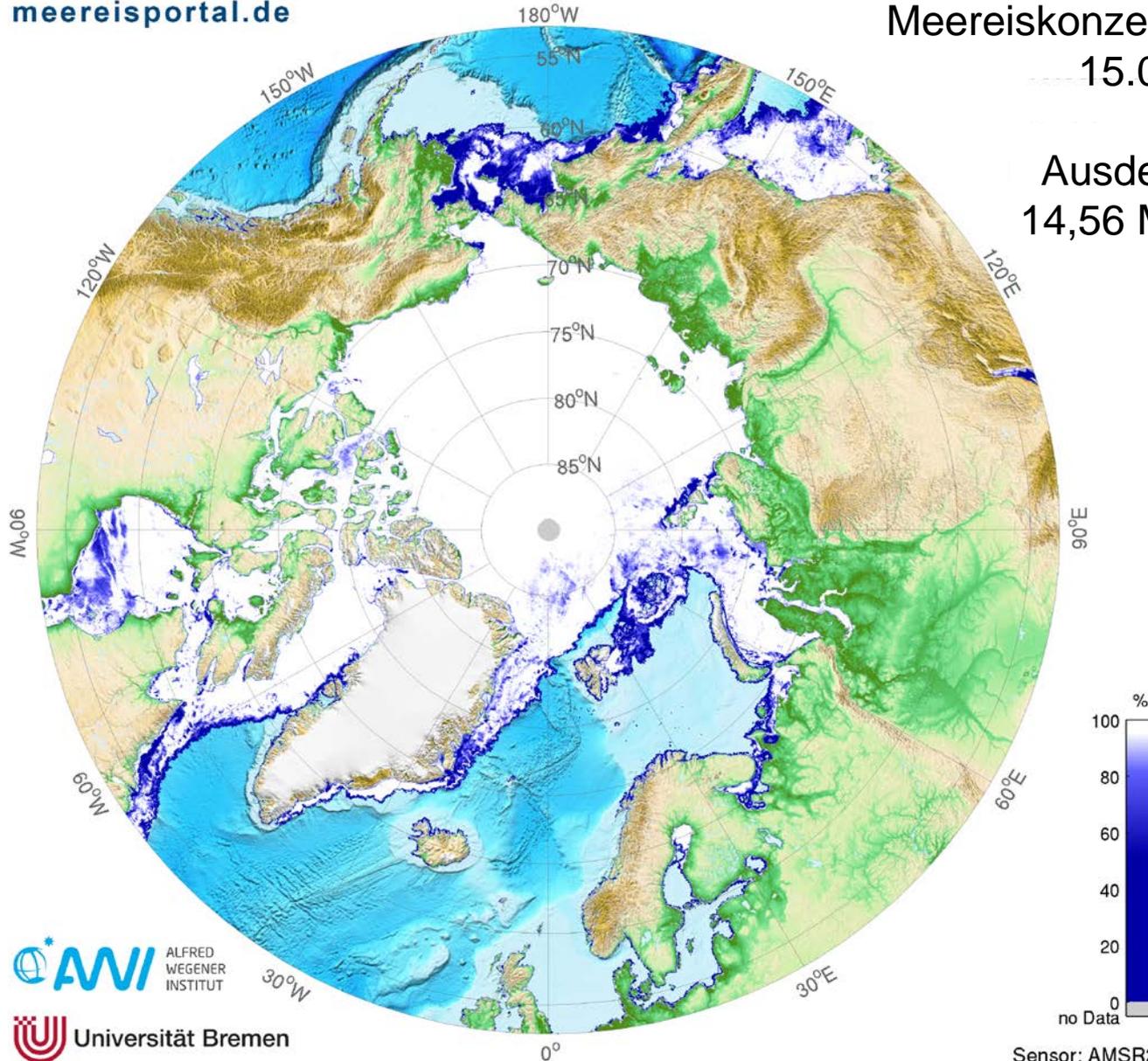
Die aktuelle Situation in der Arktis

meereisportal.de

Meereiskonzentration

15.03.2016

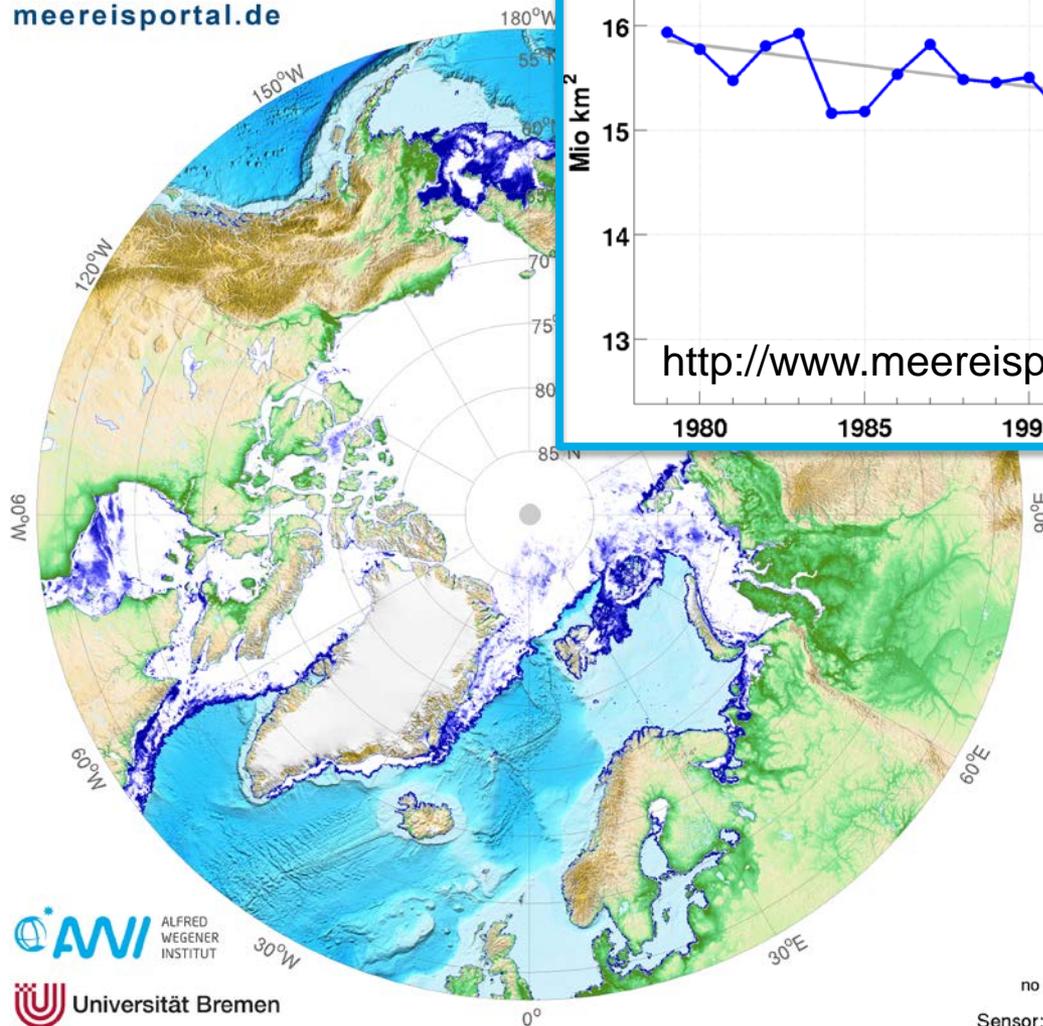
Ausdehnung:
14,56 Mio km²



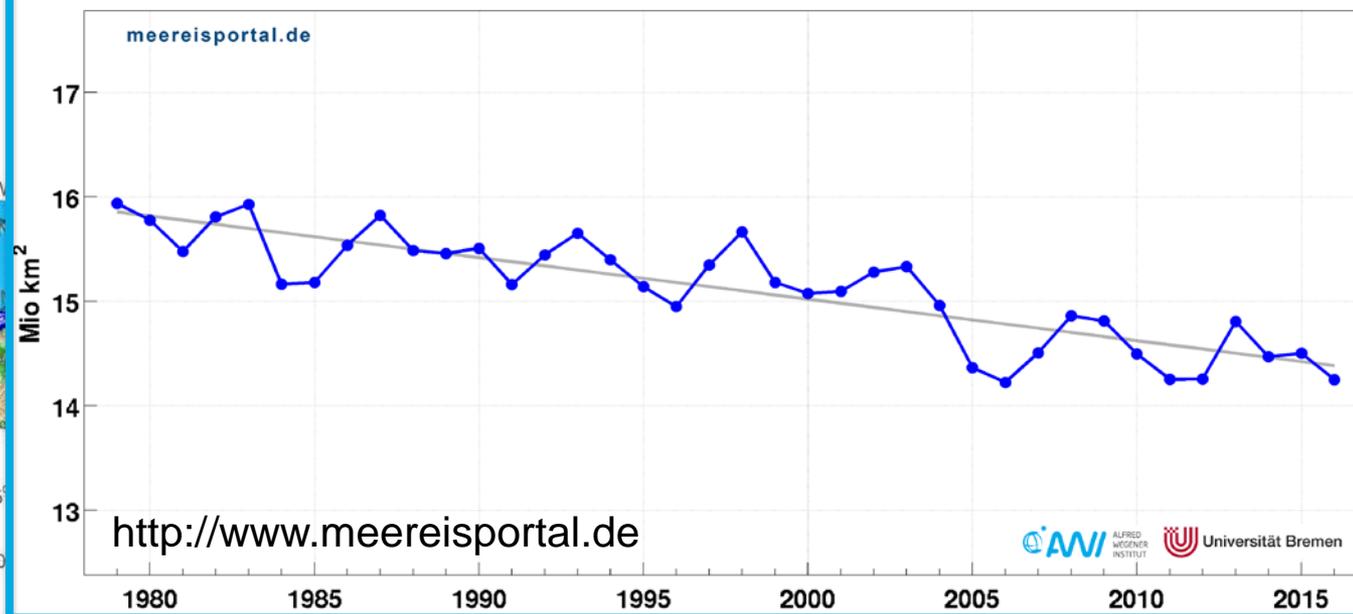
- Negative Anomalie in Meereisbedeckung vor allem über nördlicher Barents-See
- Verbunden mit positiven Temperaturanomalien

Sensor: AMSR2

meereisportal.de



Februar-Mittel der Meereisausdehnung in der Arktis von 1979-2016



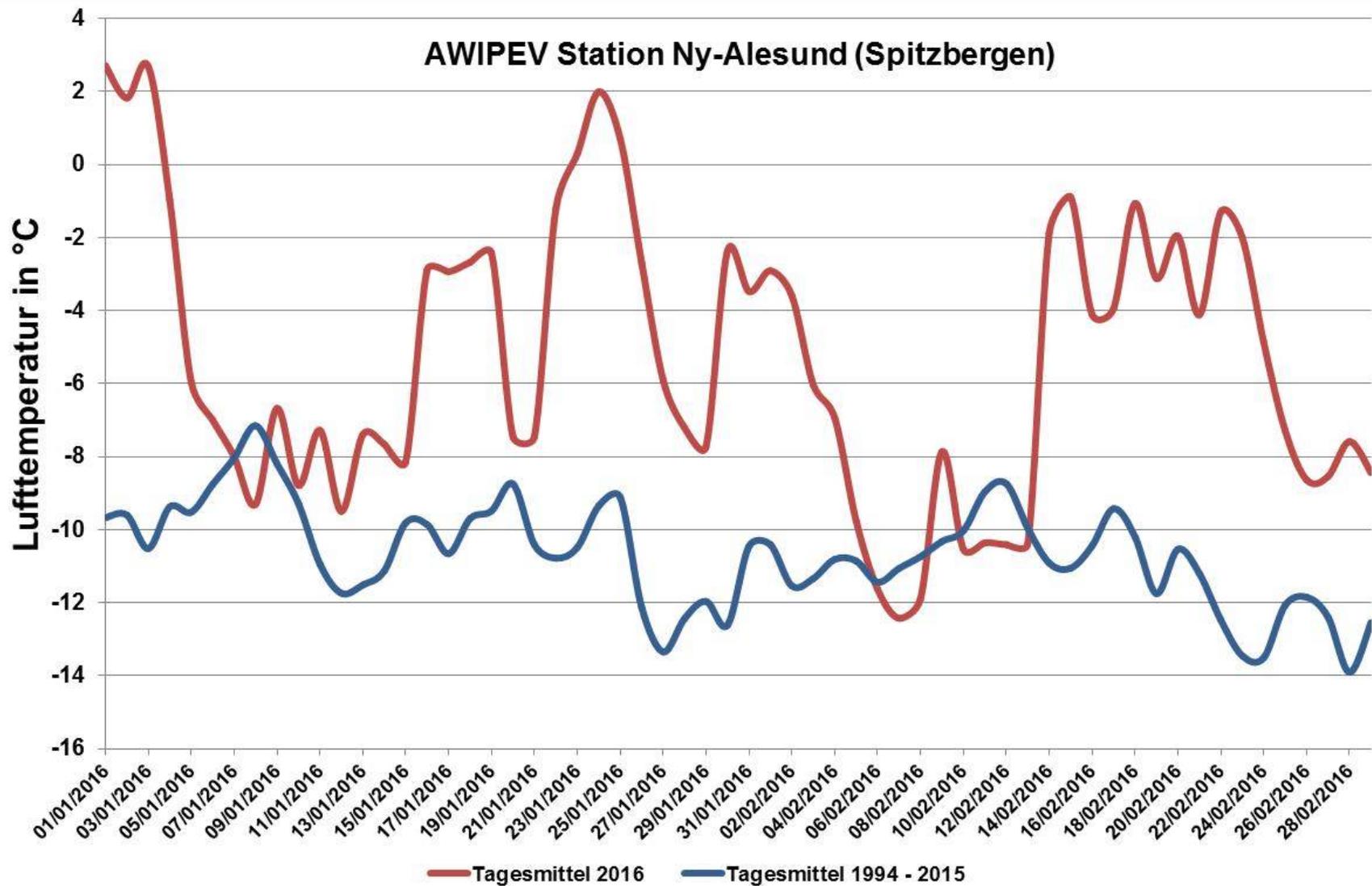
<http://www.meereisportal.de>

AWI ALFRED WEGENER INSTITUT Universität Bremen

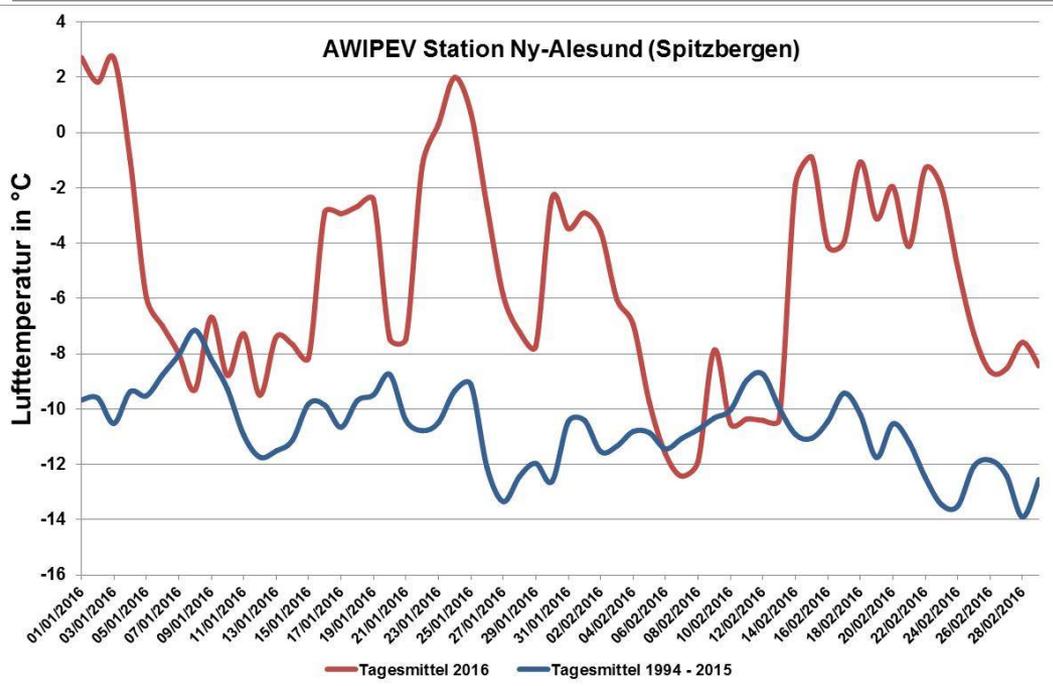
- Negative Anomalie in Meereisbedeckung vor allem über nördlicher Barents-See
- Verbunden mit positiven Temperaturanomalien

Sensor: AMSR2

Die aktuelle Situation in der Arktis



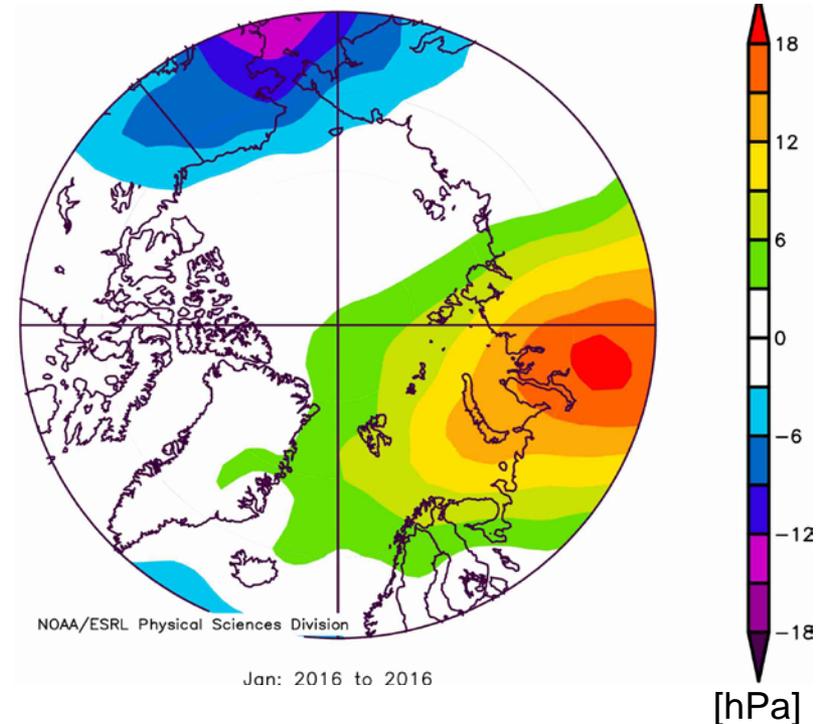
Die aktuelle Situation in der Arktis



<http://www.meereisportal.de>

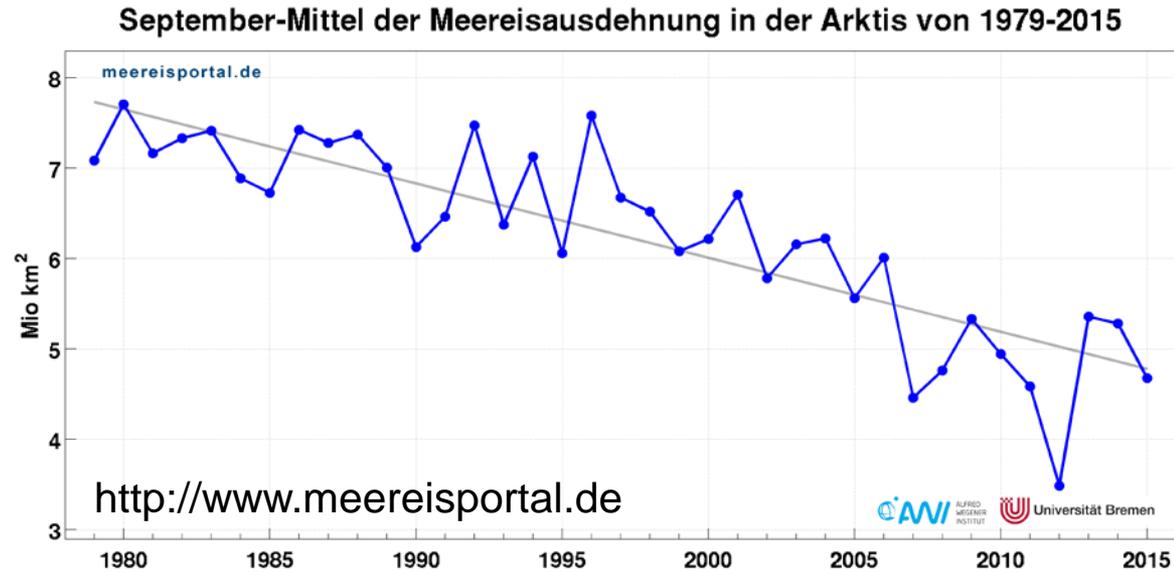
Atmosphärische Zirkulation im Januar
→ Arktische Oszillation überwiegend negativ

Januar 2016
Anomalien des Luftdrucks
zum Mittel 1981-2010

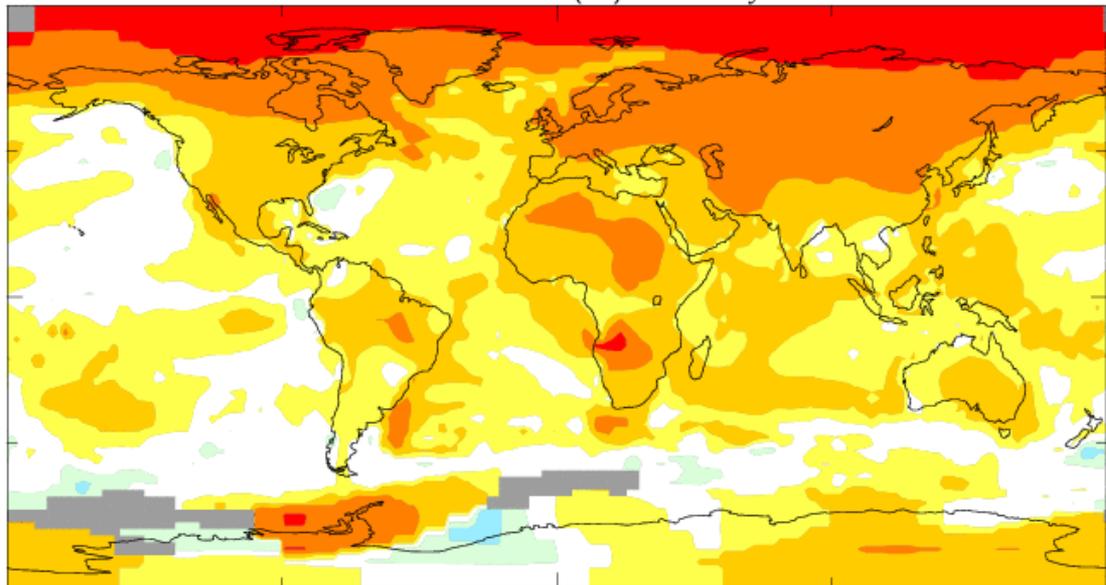


Arktische Verstärkung und Rückgang des arktischen Meereises

Rückgang der arktischen Meereisausdehnung im September, 1979-2015



Annual J-D 2005-2009 L-O TI(°C) Anomaly vs 1951-1980 .54



Arktische Verstärkung

Anomalien der Oberflächentemperatur 2005-2009 zum Mittel 1951-1980

Goddard Institute for Space Studies, 2014
<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>



Meereis in der Arktis und atmosphärische Zirkulationsänderungen – Historisches



Analyse von Beobachtungsdaten

- Brennecke (1904), Meinardus (1906)
lokale synoptische Situation ↔ Position der Eiskante

Wilhelm Brennecke (1875–1924), Ozeanograph,
2. deutsche Antarktisexpedition 1911/12

Wilhelm Meinardus (1867–1954), Geograph,
Nestor der deutschen Polarforschung

Meereis in der Arktis und atmosphärische Zirkulationsänderungen – Historisches



Analyse von Beobachtungsdaten

- Brennecke (1904), Meinardus (1906)
lokale synoptische Situation ↔ Position der Eiskante

- Hildebrandsson (1914)
Hypothese: Mittlere Winterbedingungen in
sind von der sommerlichen Eisbedeckung in der
Grönlandsee abhängig

- Wiese (1924)
Zusammenhänge zwischen:
 - (1) Luftdruckverteilung und Eisverhältnissen in der Barentssee (Eisvorhersage)
 - (2) Eisverhältnissen in Ost-Grönland-/Norwegischer See und Luftdruckverteilung
(inklusive Sturmhäufigkeit/Zyklonenzugbahnen über Nordatlantik)

Hugo Hildebrand Hildebrandsson (1838-1925)
Meteorologe, Entdecker der Southern Oscillation

Wladimir Juljewitsch Wiese (1886-1954)
Ozeanograph, Geograph, Meteorologe
und Polarforscher

Meereis in der Arktis und atmosphärische Zirkulationsänderungen – Historisches

Analyse von Beobachtungsdaten

- Wiese (1924)
Zusammenhänge zwischen:

(2) Eisverhältnissen in Ost-Grönland-/Norwegischer See und Luftdruckverteilung (inklusive Sturmhäufigkeit/Zyklonenzugbahnen über Nordatlantik)

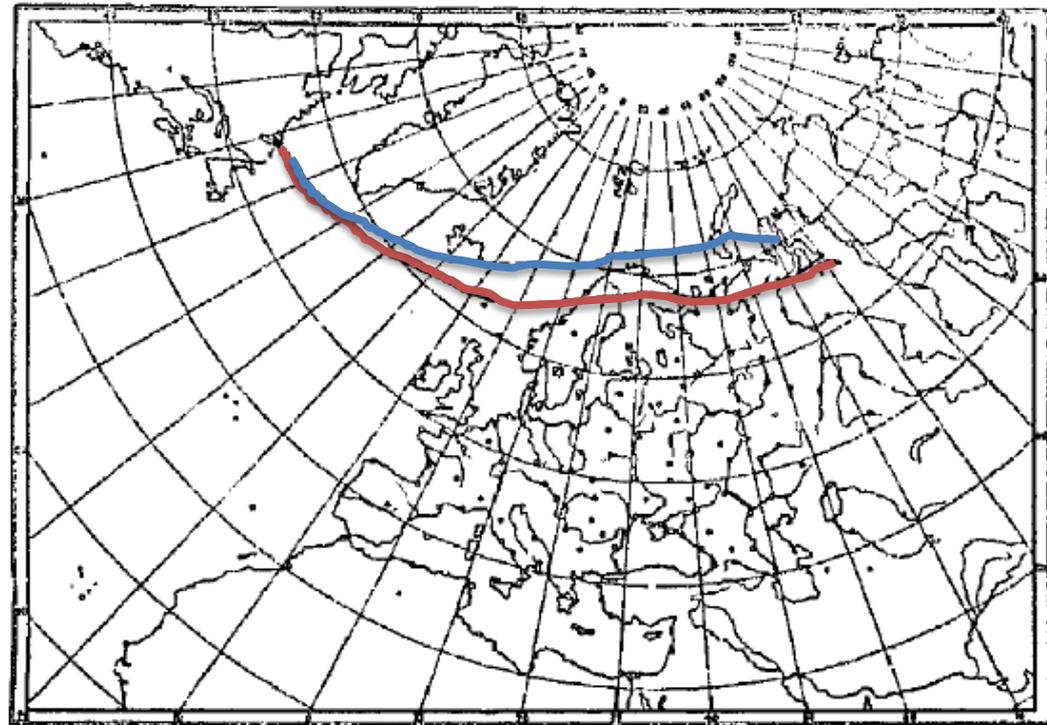


Fig. 10. Mittlere Bahnen nordatlantischer Zyklonen im Herbst.

- Schwere Eisverhältnisse im Grönländischen Meere im April—Juli.
- Leichte Eisverhältnisse im Grönländischen Meere im April—Juli.

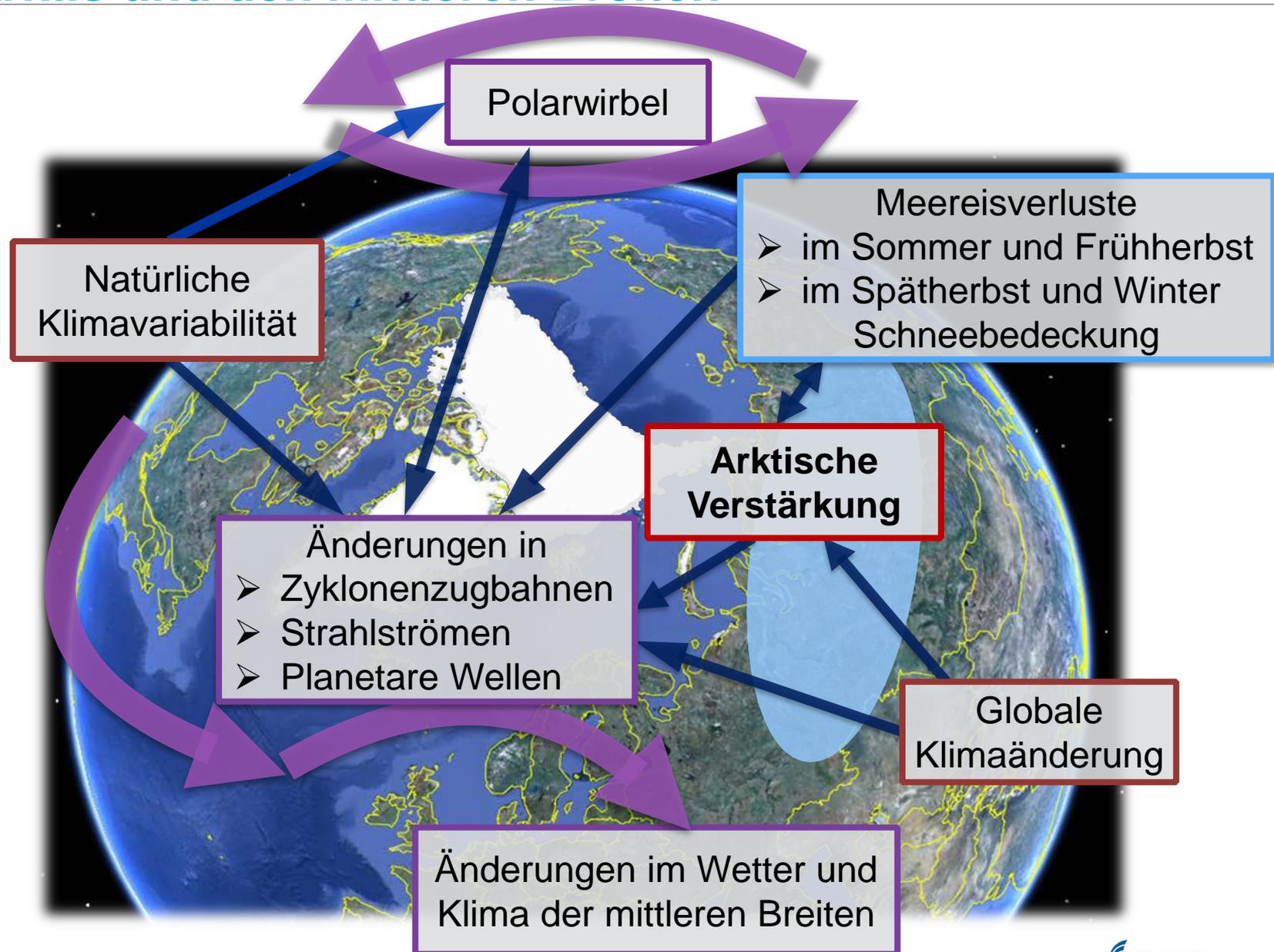
Analyse von Beobachtungsdaten

- Brennecke (1904), Meinardus (1906)
lokale synoptische Situation ↔ Position der Eiskante
- Hildebrandsson (1914)
Hypothese: Mittlere Winterbedingungen in
sind von der sommerlichen Eisbedeckung in der
Grönlandsee abhängig
- Wiese (1924)
Zusammenhänge zwischen:
(1) Luftdruckverteilung und Eisverhältnissen in der Barentssee (Eisvorhersage)
(2) Eisverhältnissen in Ost-Grönland-/Norwegischer See und Luftdruckverteilung
(inklusive Sturmhäufigkeit/Zyklonenzugbahnen über Nordatlantik)

Erste modellierende Arbeiten ab ca.1971

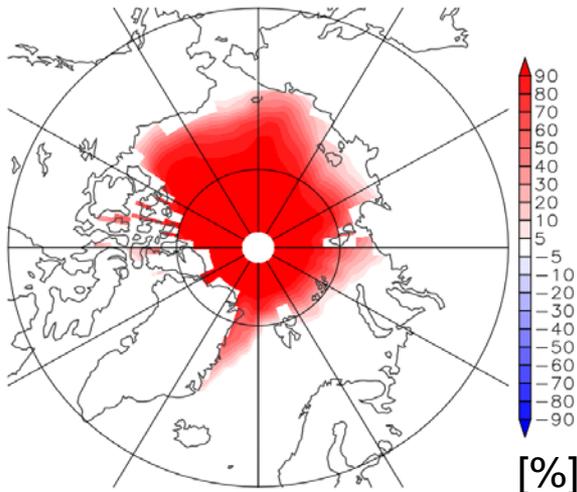
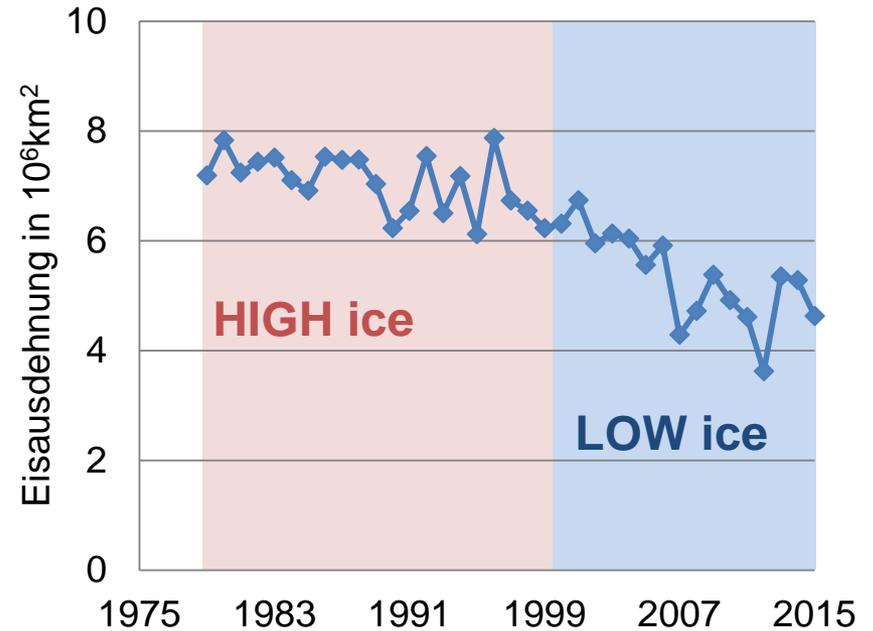
- Herman & Johnson (1978):
Modellexperiment mit atmosphärischem Allgemeinen Zirkulationsmodell: nur
Änderung der Eisausdehnung (beobachtete rezente min. und max. Eisausdehnung)
Ensemblesimulationen, Winterbedingungen
Globale Zirkulationsänderungen (Druck, Temperatur, Energieflüsse)

Dynamische Verbindungswege zwischen der Arktis und den mittleren Breiten

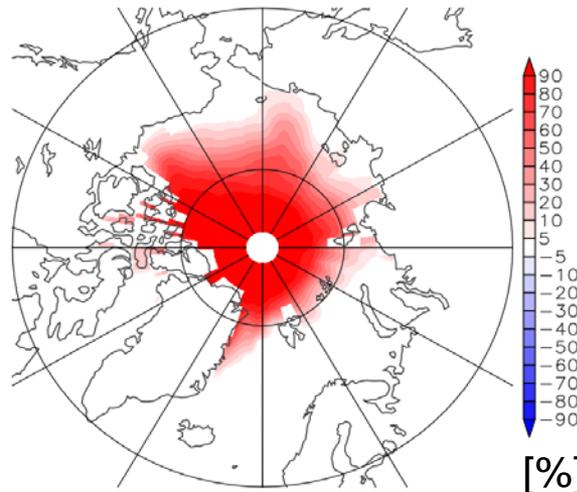


Meereisrückgang & nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen – ERA-Interim Daten

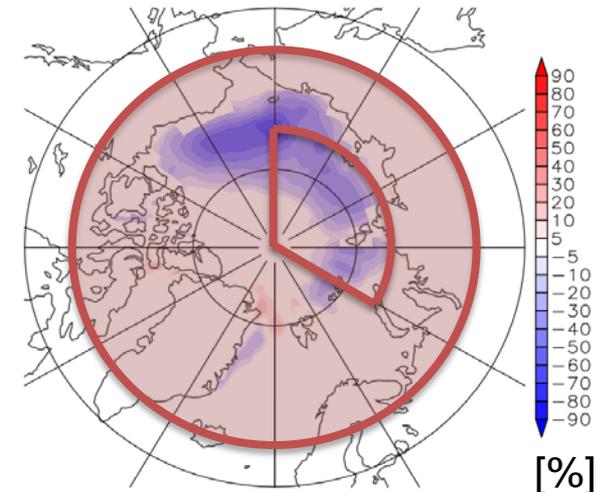
- ERA-Interim
- Reanalyse Datensatz
- Analysen für 1979-2014
- **September Eiskonzentration (%)**
- **Hohe Meereisausdehnung**
HIGH ice (1979/80-1999/00)
- **Geringe Meereisausdehnung**
LOW ice (2000/01-2013/14)



HIGH



LOW



LOW-HIGH

Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

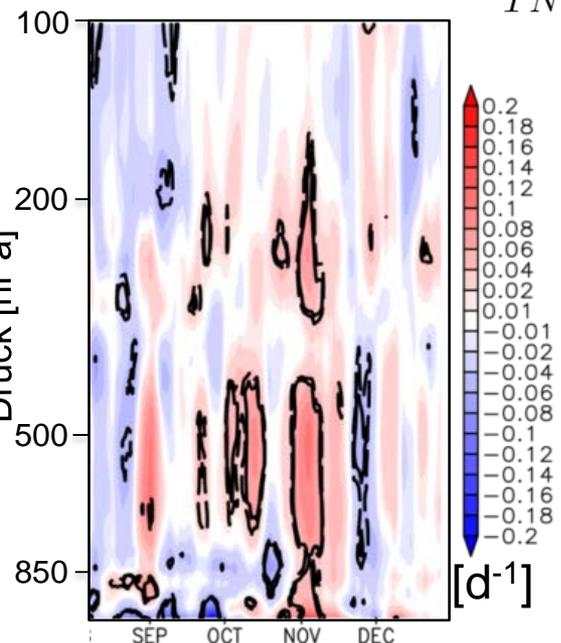
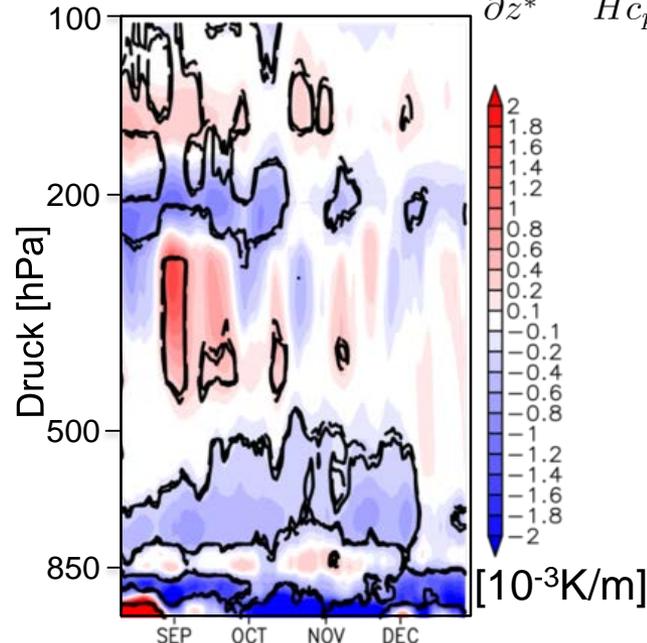
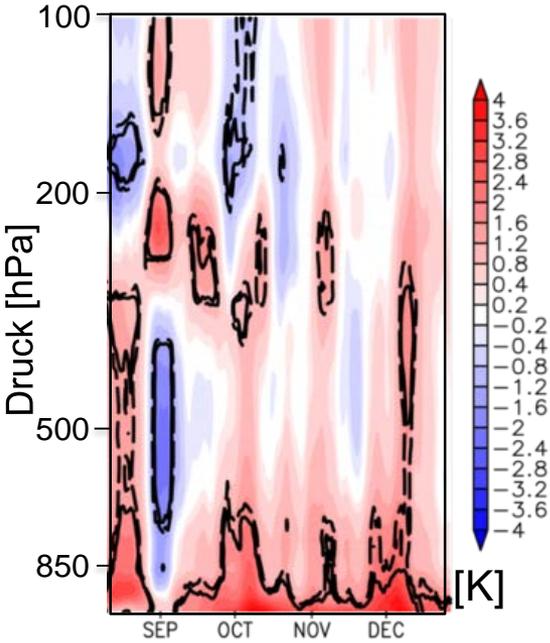


Barokline Reaktion in der Arktis im Herbst

low minus high ice Bedingungen in ERA-Interim, Gebietsmittel über sibirischen Arktischen Ozean

$$S = \frac{\partial T}{\partial z^*} + \frac{R}{Hc_p} T$$

$$\sigma_{EGR} = 0,3125 \frac{g}{TN} \left| \frac{\partial T}{\partial y} \right|$$



Temperatur
höhere Temperaturen in unterer Troposphäre



Stabilität
Geringere Stabilität in unterer/ mittlerer Troposphäre



Eady Wachstumsrate
Erhöhte Baroklinität in mittlerer Troposphäre
Intensivierung der Zyklonenentstehung

Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

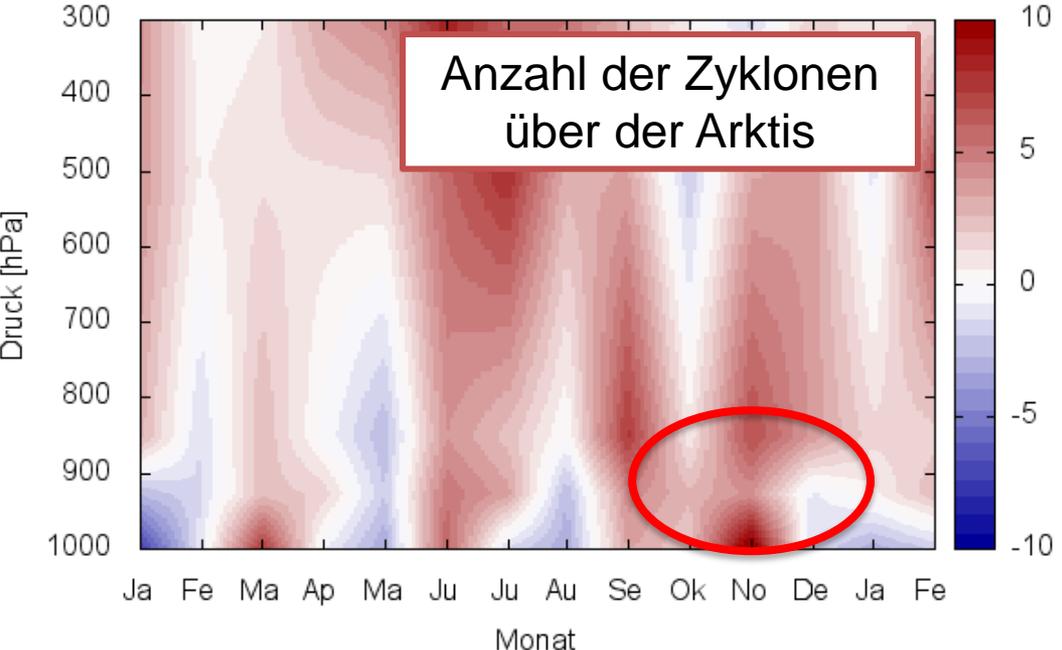
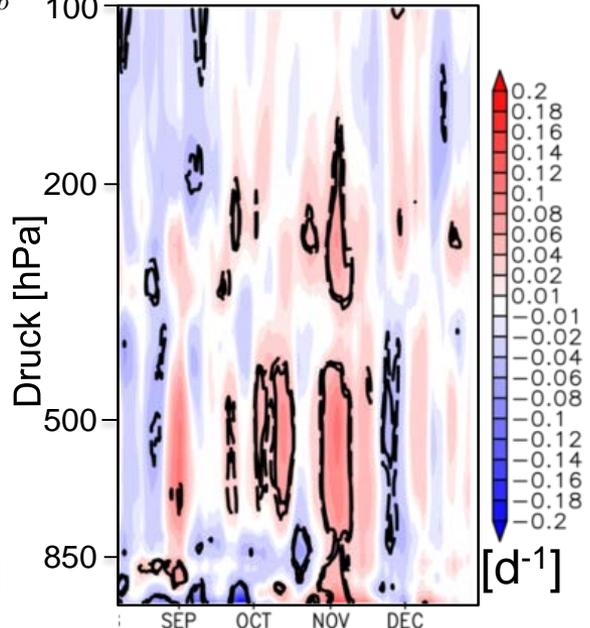
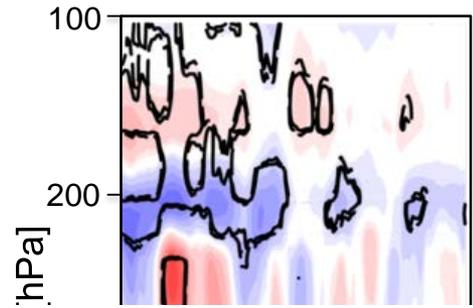
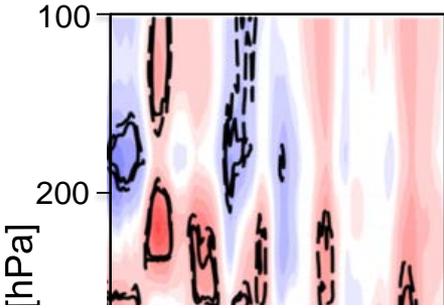


Barokline Reaktion in der Arktis im Herbst

low minus high ice Bedingungen in ERA-Interim, Gebietsmittel über sibirischen Arktischen Ozean

$$S = \frac{\partial T}{\partial z^*} + \frac{R}{Hc_p} T$$

$$\sigma_{EGR} = 0,3125 \frac{g}{TN} \left| \frac{\partial T}{\partial y} \right|$$

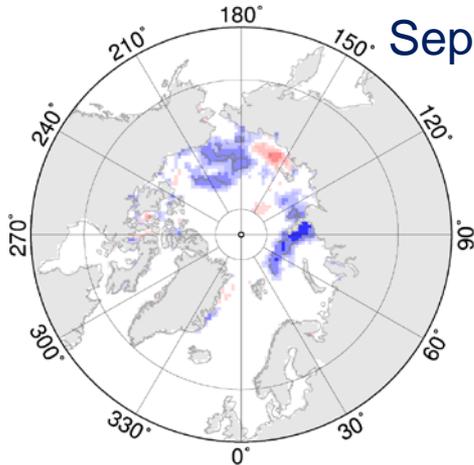


Anzahl der Zyklonen über der Arktis

Eady Wachstumsrate
 Erhöhte Baroklinität in mittlerer Troposphäre
 Intensivierung der Zyklonenentstehung

Meereiskonzentration

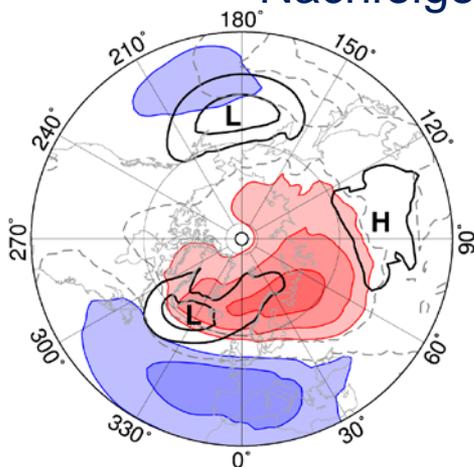
September (HadISST Daten)



-10 -6 -3 -2 -1 1 2 3 6 10 [%]

Bodenluftdruck

Nachfolgender Winter (ERA-Interim)



-6 -4 -3 -2 -1 1 2 3 4 6 [hPa]

Großskalige Reaktion im Winter Gekoppelte Muster 1979-2015

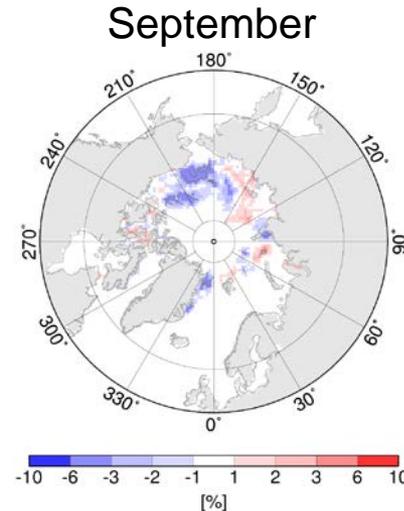
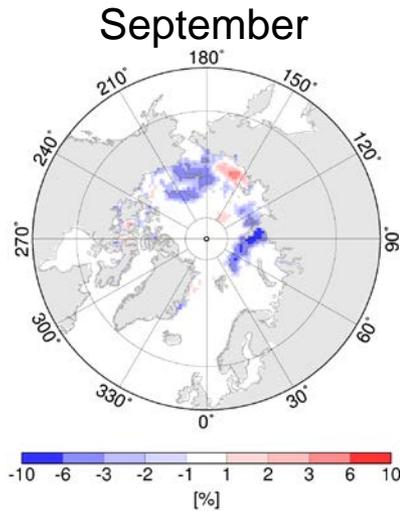
- Statistische Zusammenhänge zwischen Meereisabnahme und Änderungen der atmosphärischen Zirkulationsmuster
- Änderungen der Aktionszentren, negatives NAO-Muster

Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

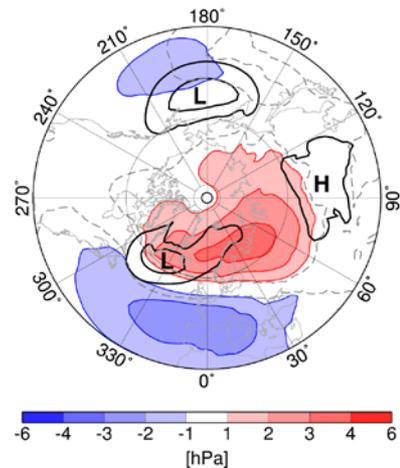
Großskalige Reaktion im Winter Gekoppelte Muster 1979-2015

- Statistische Zusammenhänge zwischen Meereisabnahme und Änderungen der atmosphärischen Zirkulationsmuster
- Änderungen der Aktionszentren, negatives NAO-Muster
- Beobachtete Änderungen in Troposphäre und Stratosphäre

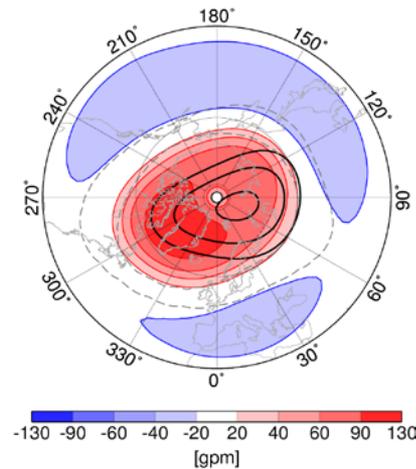
Meereiskonzentration



Atmosphärische Zirkulation



Winter
Bodenluftdruck
42% erklärte Kovarianz



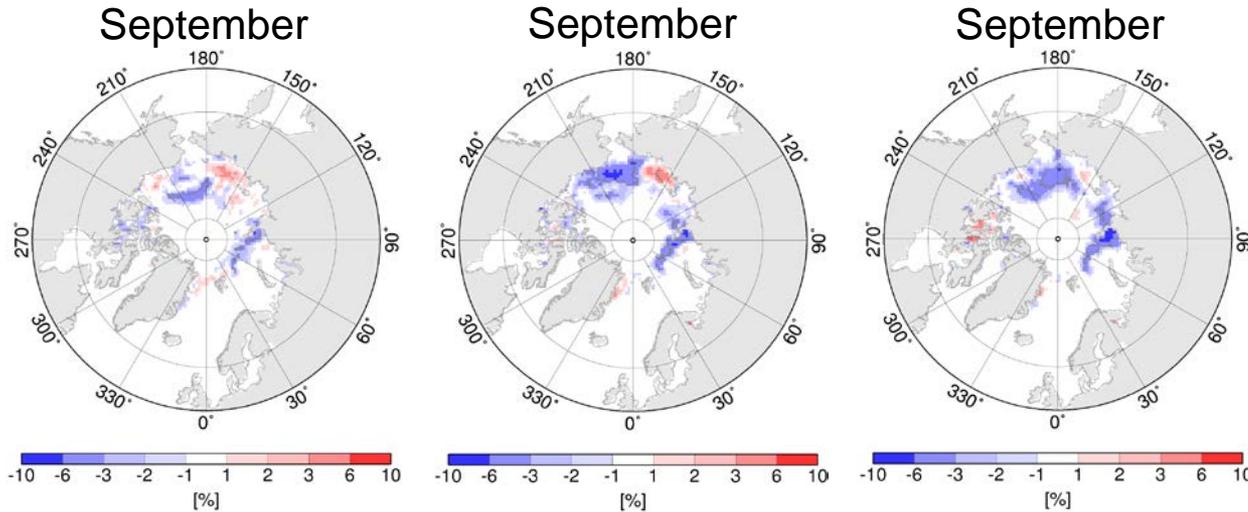
Winter
GPH 50hPa
53% erklärte Kovarianz

Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

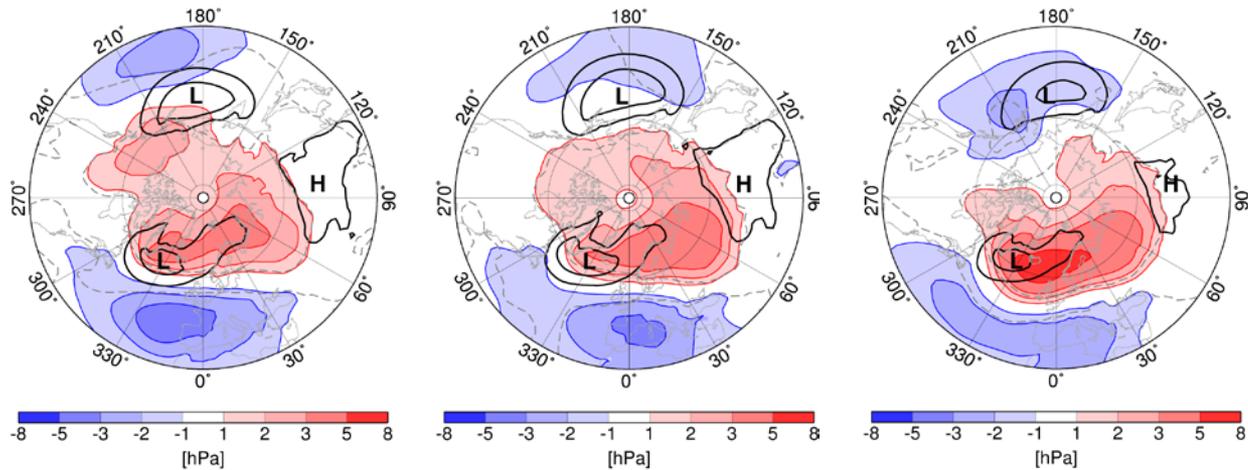
**Großskalige
Reaktion im Winter
Gekoppelte Muster
1979-2015
Bodenluftdruck
Monatliche
Auflösung**

- Verlagerung der Aktionszentren nach Westen über Nordatlantik

Meereiskonzentration



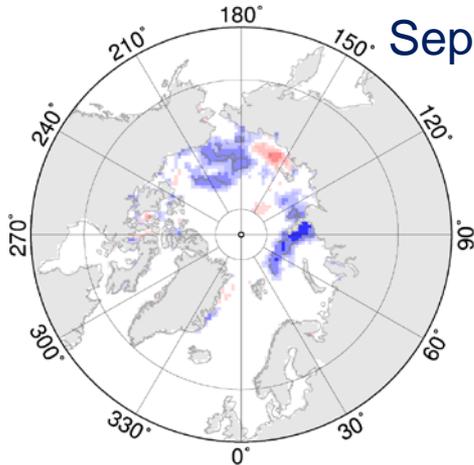
Atmosphärische Zirkulation



24% erkl. Kovarianz 31 % erkl. Kovarianz 36% erkl. Kovarianz

Meereiskonzentration

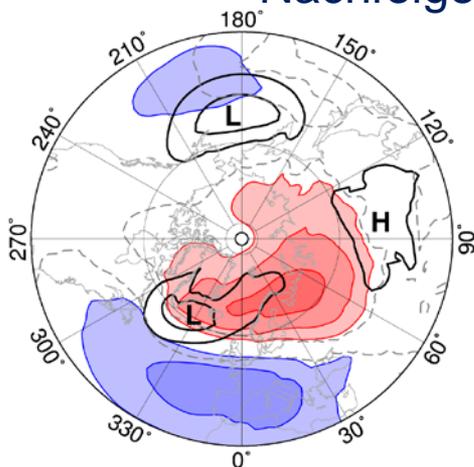
September (HadISST Daten)



-10 -6 -3 -2 -1 1 2 3 6 10 [%]

Bodenluftdruck

Nachfolgender Winter (ERA-Interim)



-6 -4 -3 -2 -1 1 2 3 4 6 [hPa]

Großskalige Reaktion im Winter Gekoppelte Muster 1979-2015

- Statistische Zusammenhänge zwischen Meereisabnahme und Änderungen der atmosphärischen Zirkulationsmuster
- Änderungen der Aktionszentren, negatives NAO-Muster
- Beobachtete Änderungen in Troposphäre und Stratosphäre
- **Herausforderungen:
Mechanismen?
Darstellung in Modellen?**

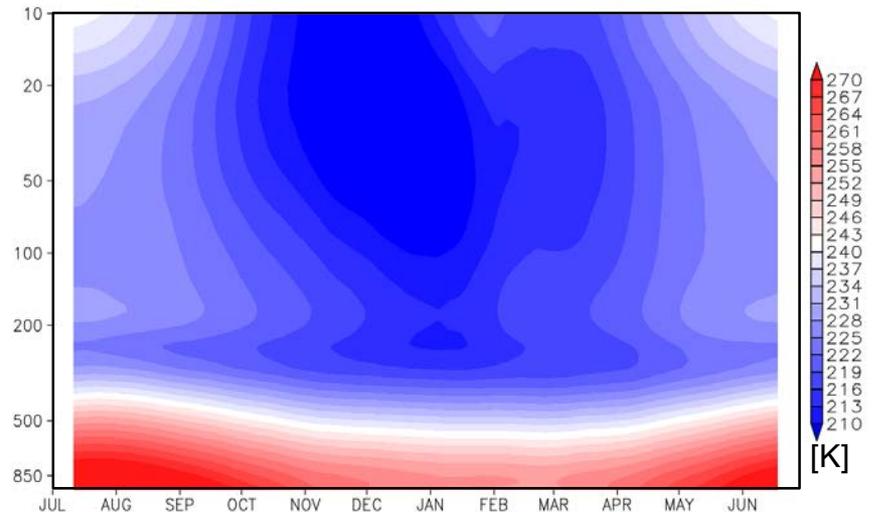
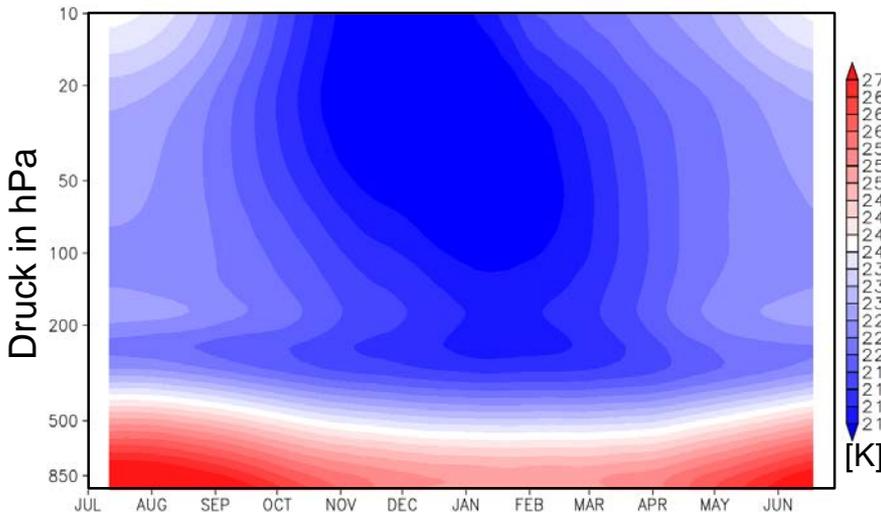
Jaiser et al. 2012, 2013, 2016 (submitted)
Handorf et al. 2015

Temperatur [K], Gebietsmittel über 65°N-85°N

Klimatologien der Temperatur über der Polarregion

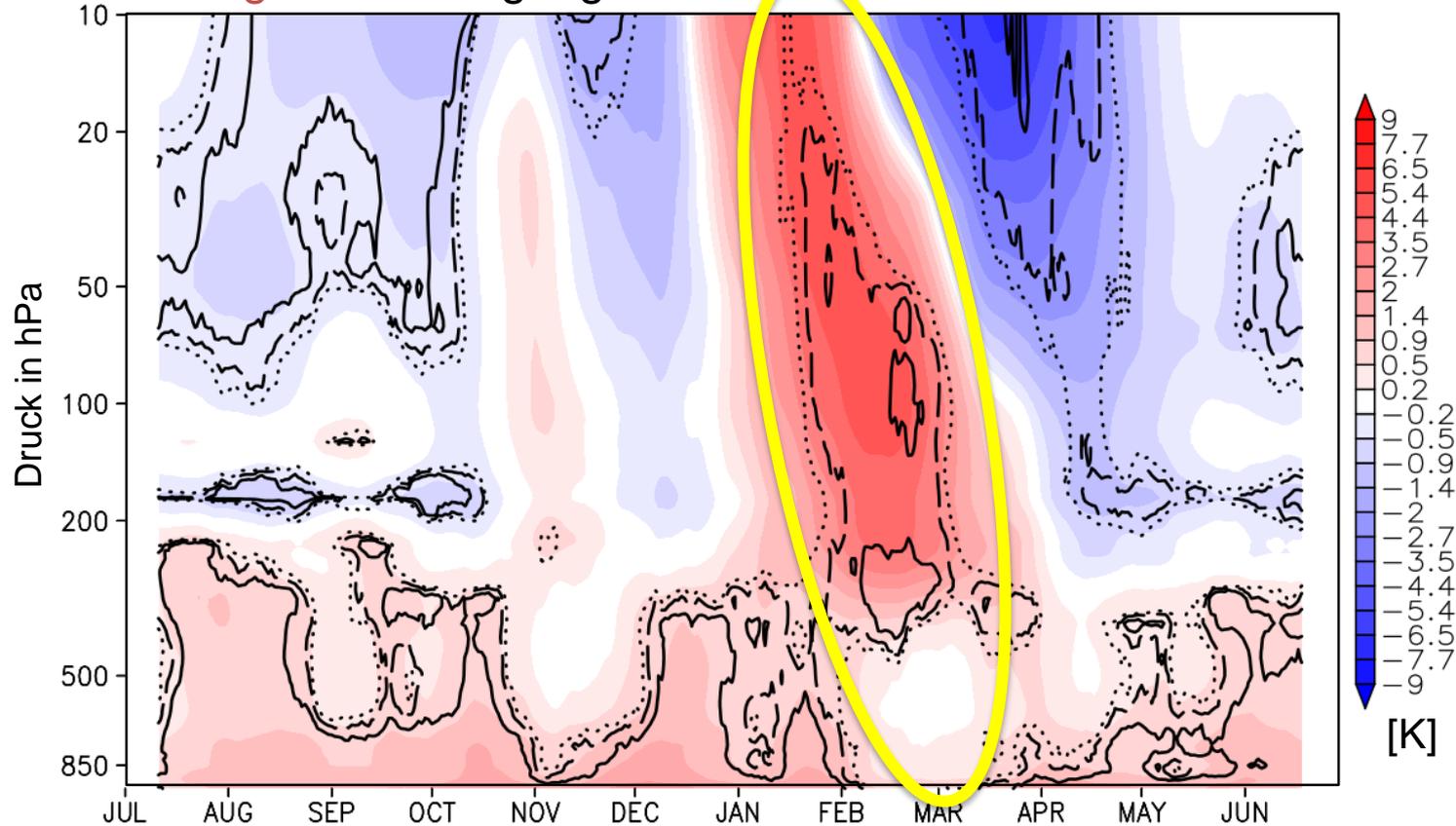
High ice 1979/80-1999/00

Low ice 2000/01-2013/14



- Ganzjährig höhere troposphärische Temperaturen
 - Globale Erwärmung
 - Arktische Verstärkung
- Starke signifikante Erwärmung der polaren Stratosphäre im Spätwinter
 - Störung/Zusammenbruch des Polarwirbels?

Temperatur [K], Gebietsmittel über 65°N-85°N
für low minus high ice Bedingungen in ERA-Interim



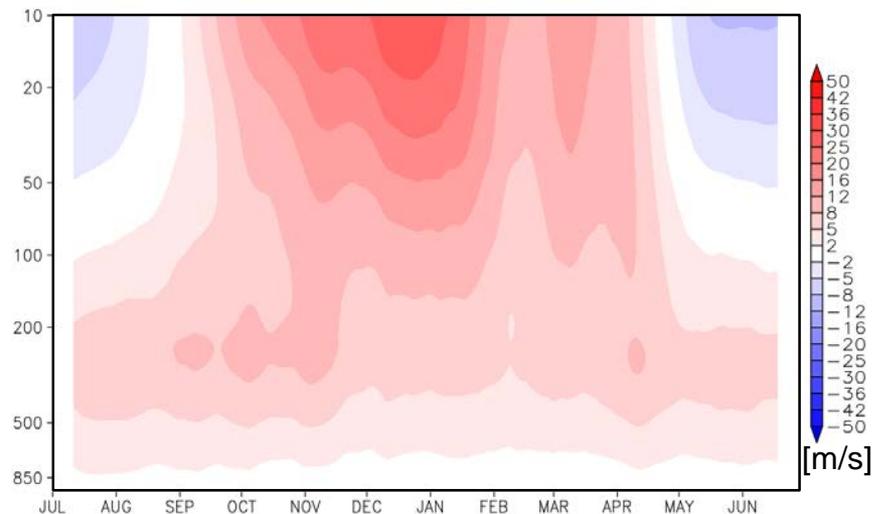
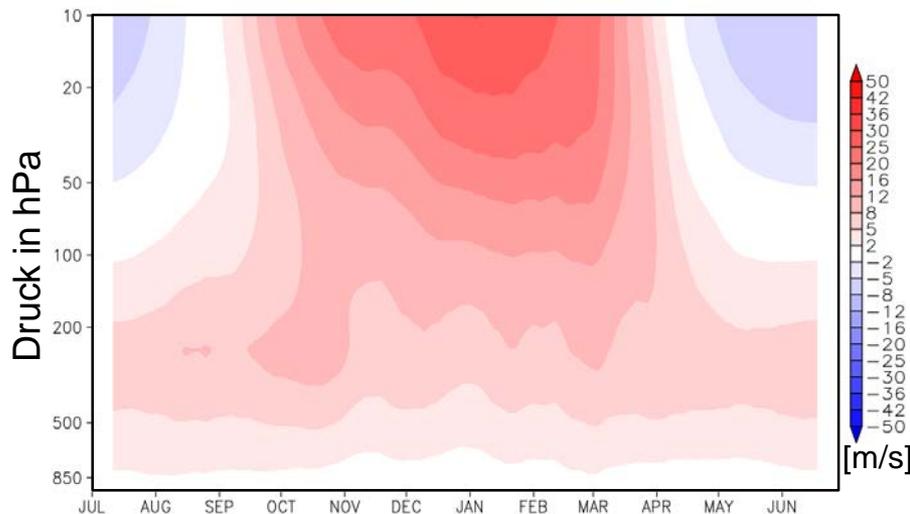
- Ganzjährig höhere troposphärische Temperaturen
 - Globale Erwärmung
 - Arktische Verstärkung
- Starke signifikante Erwärmung der polaren Stratosphäre im Spätwinter
 - Störung/Zusammenbruch des Polarwirbels?

Zonalwind [m/s] Gebietsmittel über 65°N-85°N

Klimatologien des Zonalwindes über der Polarregion (Westwind)

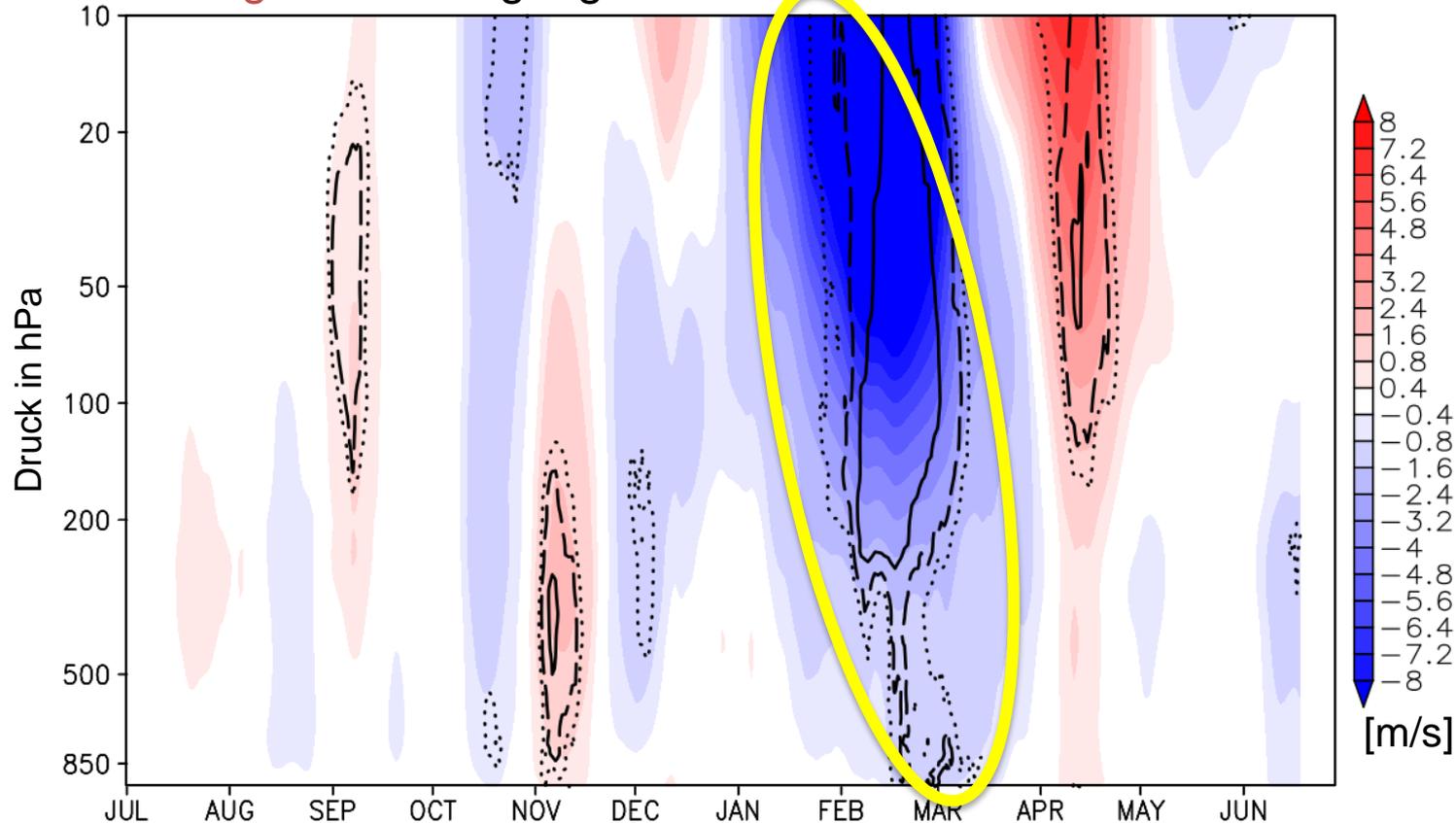
High ice 1979/80-1999/00

Low ice 2000/01-2013/14



- Indikation für Zusammenbruch des stratosphärischen Wirbels im Februar
 - Westwinde in der Stratosphäre sind deutlich reduziert
 - Signal erreicht die Troposphäre

Zonalwind [m/s] Gebietsmittel über 65°N-85°N
für low minus high ice Bedingungen in ERA-Interim



- Indikation für Zusammenbruch des stratosphärischen Wirbels im Februar
 - Westwinde in der Stratosphäre sind deutlich reduziert
 - Signal erreicht die Troposphäre

Kopplung von Troposphäre und Stratosphäre durch planetare Wellen

- **Lokaler Eliassen-Palm Fluss (EP-Fluss, Trenberth 1986)**
- Wechselwirkung zwischen Wellen und mittlerer Strömung
- Beschreibt die Kopplung zwischen Troposphäre und Stratosphäre durch Wellen

$$\frac{\overline{Du}}{Dt} - fv^* = \nabla \cdot \vec{E}_u \quad \text{Divergenz des EP-Flusses}$$

$$\vec{E}_u = \left[\frac{1}{2} (\overline{v'^2} - \overline{u'^2}), -\overline{u'v'}, f \frac{\overline{v'T'}}{S} \right] \quad \text{3D EP-Flussvektor}$$

- **Divergenz** des EP-Flussvektors beschreibt **Zonalwindantrieb** durch transiente Wirbel
- **Vektor** beschreibt **die Richtung** der Wellenausbreitung
- **Betrag** des EP-Flussvektors ist qualitatives Maß der **transienten Wirbelaktivität**
- Skalenseparation zwischen **synoptischen** und **planetaren Skalen**

Wir betrachten hier

Planetar-skalige vertikale Komponente des EP-Flussvektors

Wie stark breiten sich planetare Wellen vertikal aus (in die Stratosphäre)?

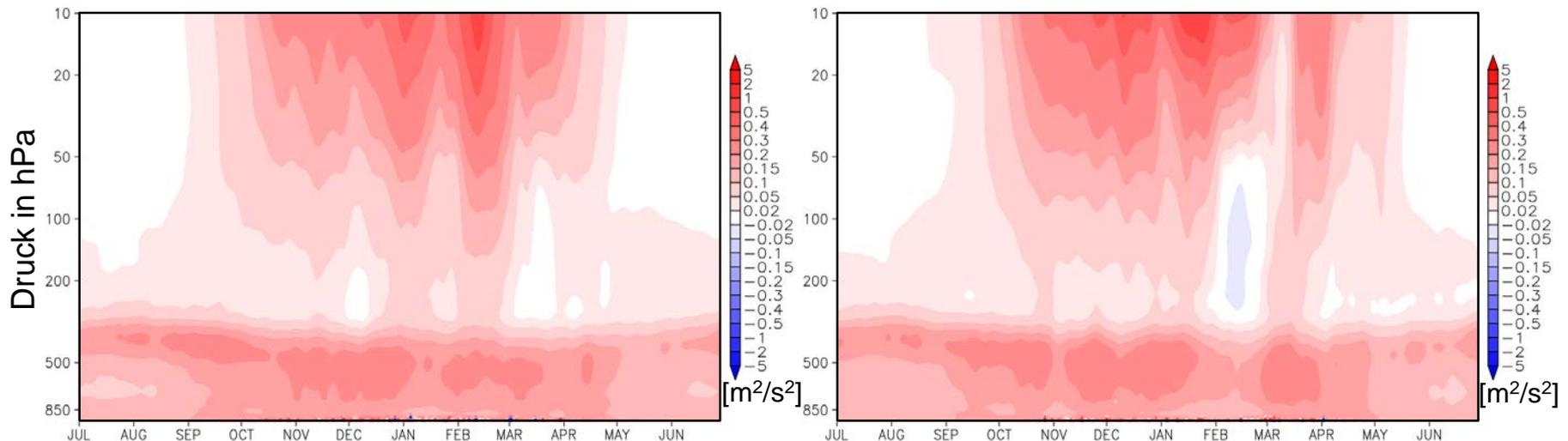
Änderungen der vertikalen Ausbreitung planetarer Wellen über der Polarregion

Vertikalkomponente Eliassen-Palm Flussvektor [m^2/s^2] Gebietsmittel über 65°N - 85°N

Klimatologien Vertikalkomponente des EP-Flussvektors über der Polarregion

High ice 1979/80-1999/00

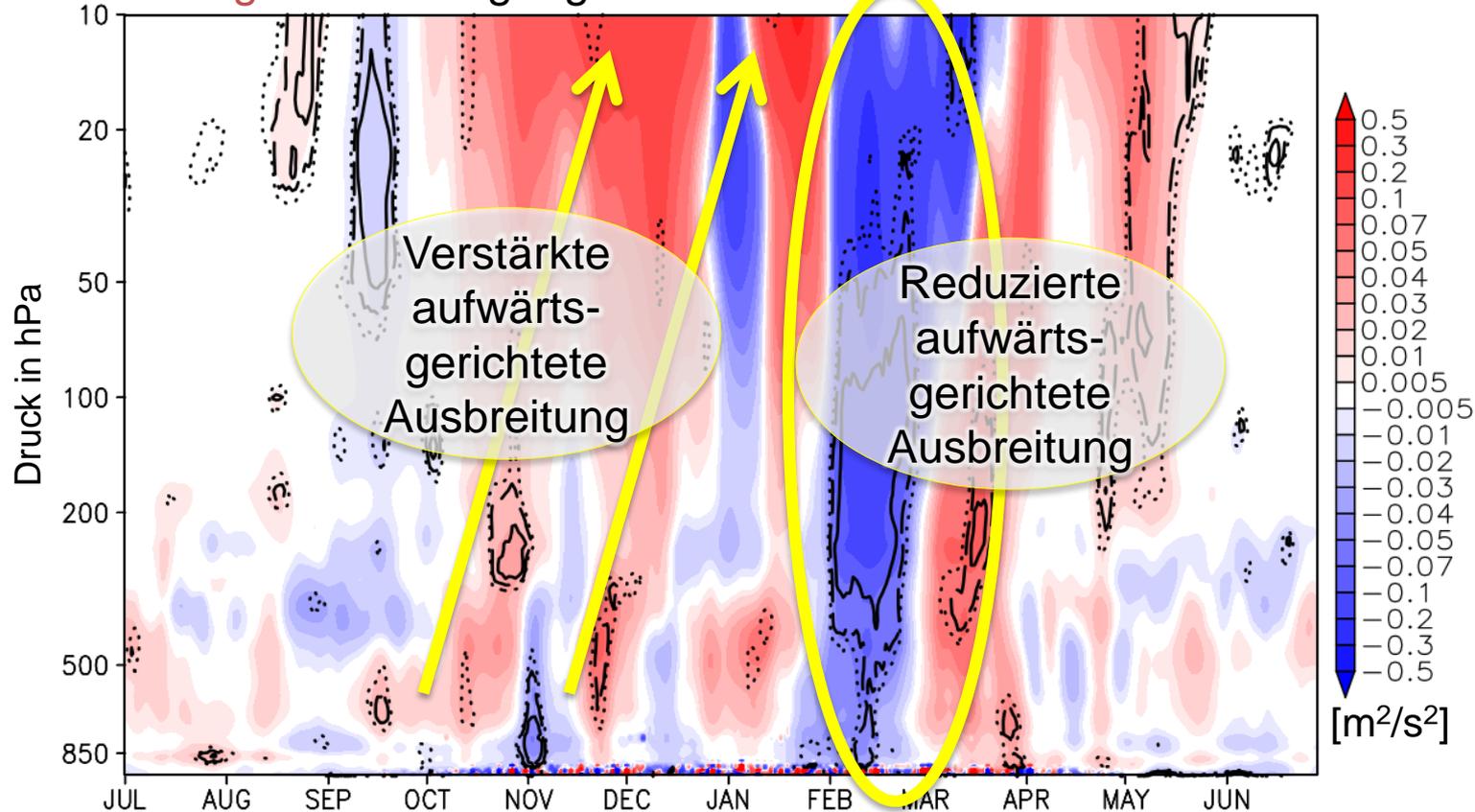
Low ice 2000/01-2013/14



- Verstärkte aufwärtsgerichtete Ausbreitung planetarer Wellen im Herbst/Frühwinter
 - Störung des Polarwirbels → Zusammenbruch des Wirbels
- Vertikale Wellenausbreitung ist im Februar abgeschwächt aufgrund des Zusammenbruch des Wirbels

Änderungen der vertikalen Ausbreitung planetarer Wellen über der Polarregion

Vertikalkomponente Eliassen-Palm Flussvektor [m^2/s^2] Gebietsmittel über 65°N - 85°N für low minus high ice Bedingungen in ERA-Interim



- Verstärkte aufwärtsgerichtete Ausbreitung planetarer Wellen im Herbst/Frühwinter
 - Störung des Polarwirbels → Zusammenbruch des Wirbels
- Vertikale Wellenausbreitung ist im Februar abgeschwächt aufgrund des Zusammenbruch des Wirbels

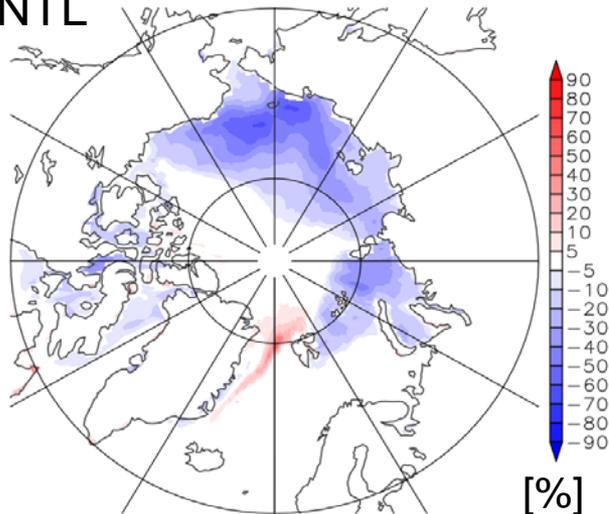
Darstellung des Einflusses des Meereisrückgangs in Klimamodellen



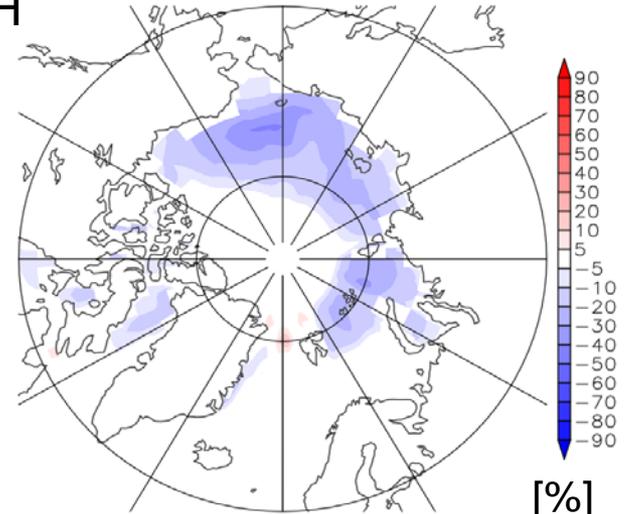
- Modell: AFES (Atmospheric general circulation model For Earth Simulator)
- 2 Modellsimulationen, je 60 Jahre Zeitscheibenexperimente
 - CNTL: High ice Bedingungen, Beobachtungen von 1979 bis 1983
 - NICE: Low ice Bedingungen, Beobachtungen von 2005 bis 2009
 - **Nur Meereis ist zwischen den Simulationen unterschiedlich**
- Verbesserte Darstellung der Wärmeflüsse durch das Meereis
- Nakamura et al. (2015, JGR); Jaiser et al. (2016, submitted)

Eiskonzentrationskarten im Herbst (SON) für low minus high ice Bedingungen

AFES
NICE-CNTL



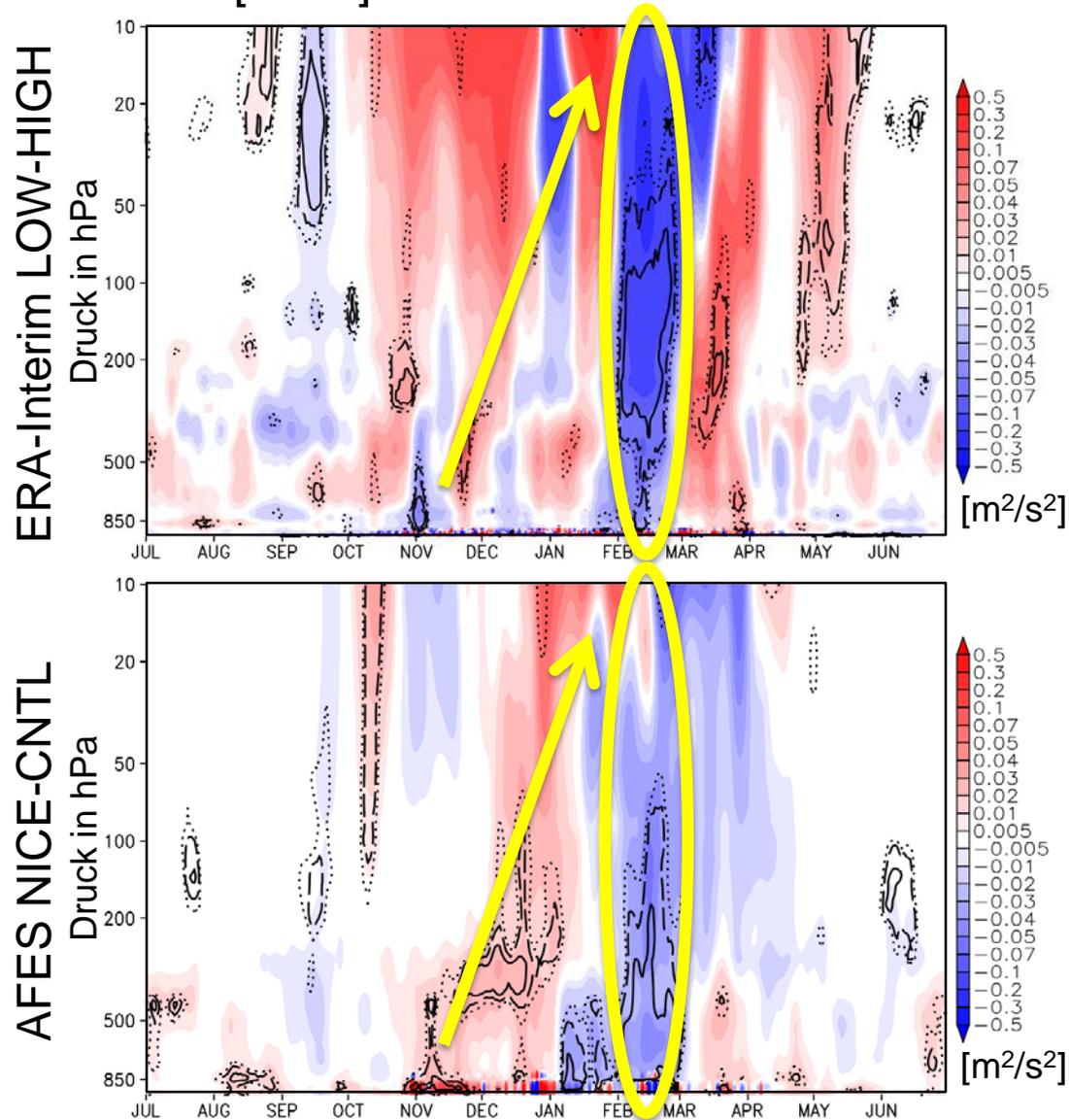
ERA-Interim
LOW-HIGH



Änderungen der vertikalen Ausbreitung planetarer Wellen über der Polarregion

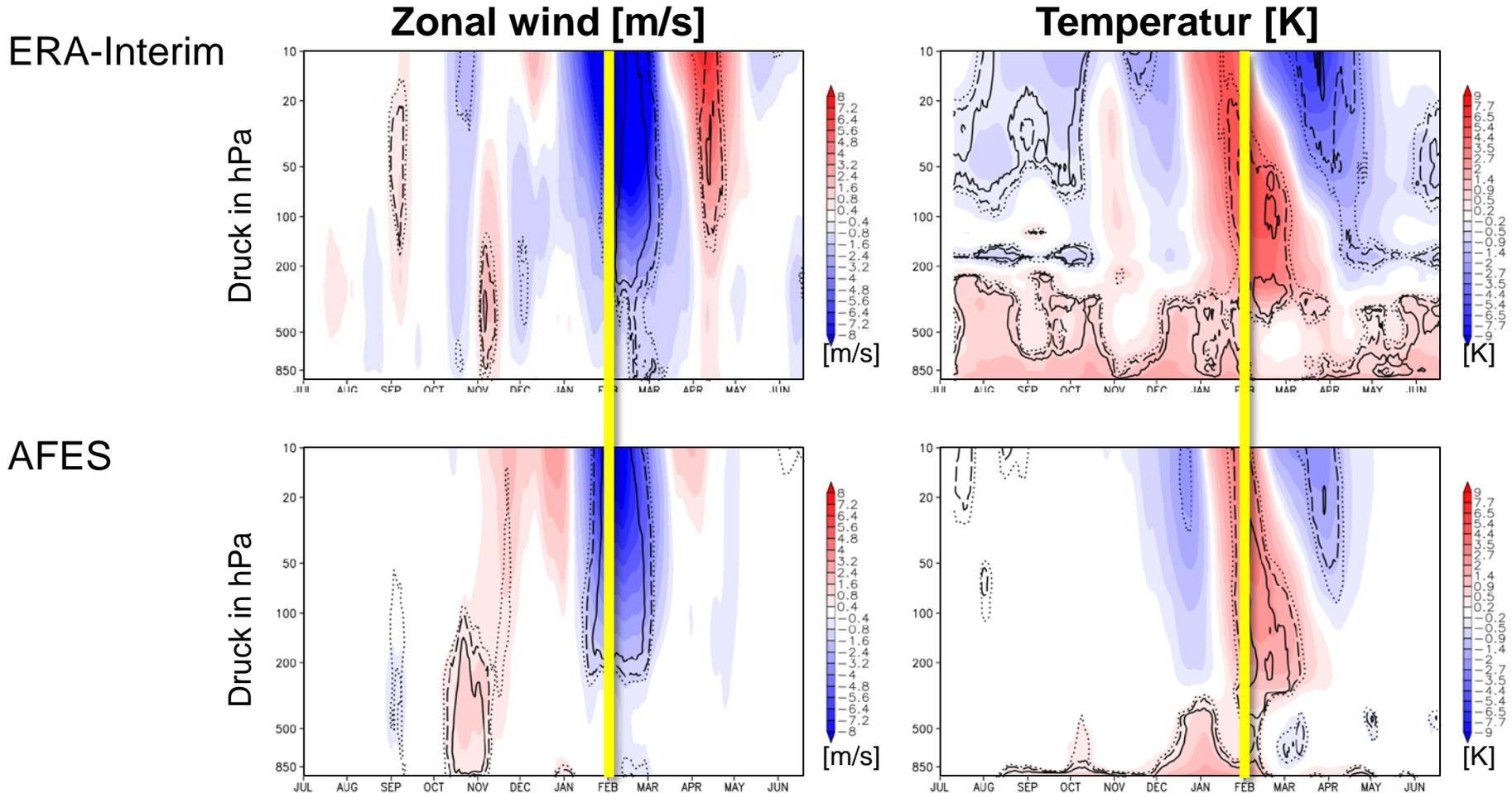
Vertikalkomponente Eliassen-Palm Flussvektor [m^2/s^2] Gebietsmittel über 65°N - 85°N für low minus high ice Bedingungen

- Ähnliche Anomalien im Winter
- Reduzierter vertikaler Fluss im Februar ist hochsignifikant in beiden Datensätzen
- **Diese Übereinstimmung zeigt den deutlichen Einfluss von Meereisänderungen auf atmosphärische Zirkulationsänderungen**
- ERA-Interim ist im Frühwinter deutlich gestörter
- Einfluss zusätzlicher Prozesse



Temperatur- und Windänderungen über der Polarregion

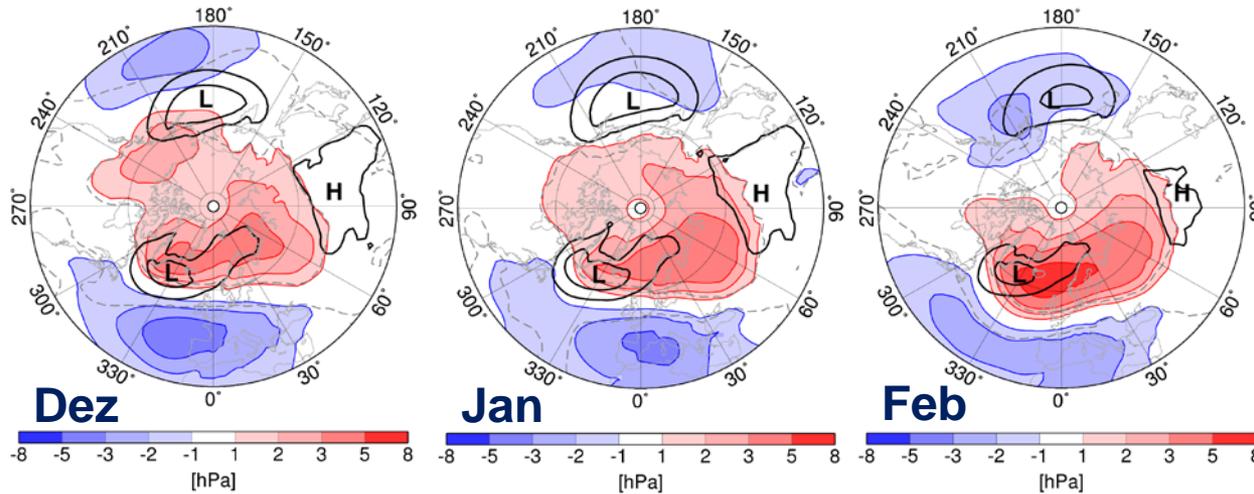
Gebietsmittel über 65°N-85°N für low minus high ice Bedingungen



- Sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Reanalyse im Winter (und Herbst)
- ERA-Interim zeigt generelles Signal der globalen Erwärmung
- AFES bodennahe Erwärmung allein durch Meereisrückgang

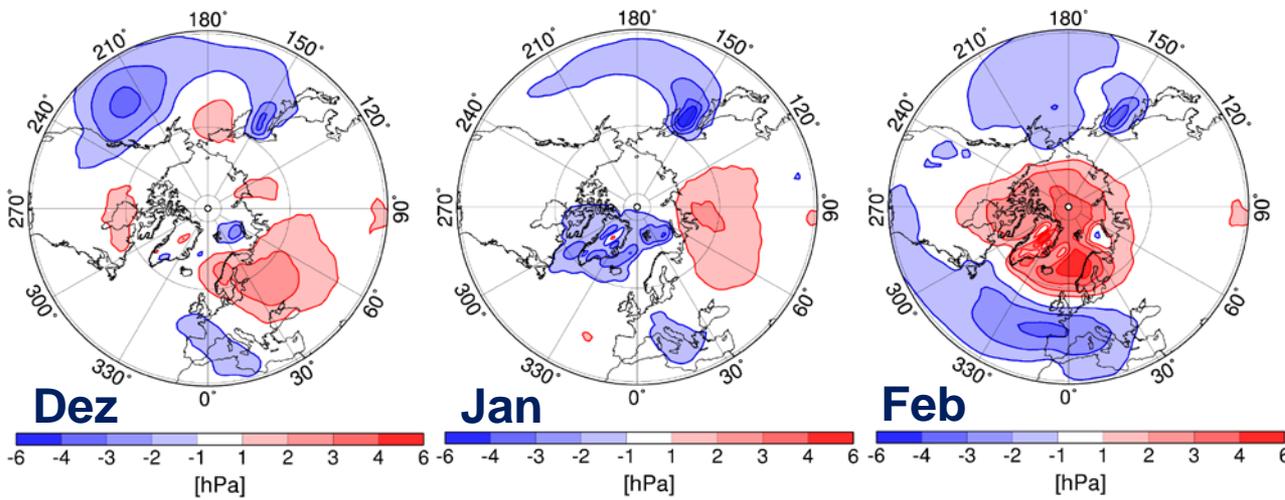
Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

ERA-Interim: Zirkulationsänderungen im Bodenluftdruck
aus Analyse der gekoppelten Muster



- Sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Reanalyse im Februar
- Ausgeprägtes **negatives NAO-Signal** im Februar
- Modell reproduziert das beobachtete **negative (N)AO Signal**

AFES: Zirkulationsänderungen im Bodenluftdruck
aus Differenzen für low minus high ice Bedingungen



Zusammenfassung: Meereisrückgang in der Arktis und atmosphärische Zirkulationsänderungen

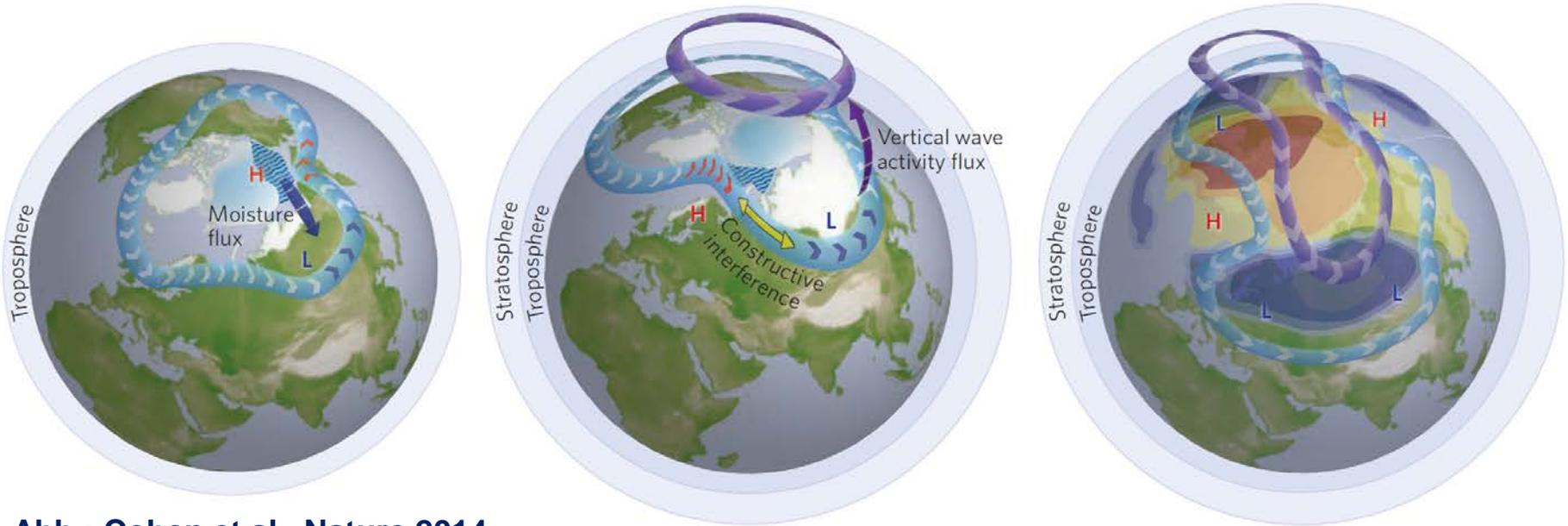


Abb.: Cohen et al., Nature 2014

Sept.

Oct.

Nov.

Dec.

Jan.

Feb.

Meereisrückgang

- Vertikale Wärme- und Feuchteflüsse
- Verstärkte barokline Instabilität (Zyklonen)
- Schneezunahme über Sibirien

Anregung planetarer Wellen

- Wechselwirkungen planetare-synoptische Wellen
- Diabatischer Antrieb durch
 - Schneeänderungen
 - Eisanomalie im Nov.
- Schwächerer meridionaler Temperaturgradient

Stärkere planetare Wellen

- Verstärkte vertikale Wellenausbreitung in die Stratosphäre (EP-Flüsse)
- Störungen des stratosphärischen Polarwirbels
- Abwärts propagierendes Signal
- negative NAO
 - kältere europäische Winter

Arktische Meereisänderungen sind bedeutender Antrieb für atmosphärische Zirkulationsänderungen

- Atmosphärische Modelle mit realistischem Meereisantrieb reproduzieren das beobachtete **negative (N)AO Signal im (Spät)-Winter** und die zugehörigen Prozesse
- Änderungen im Meereisantrieb ändern die Häufigkeit des Auftretens der **bevorzugten Zirkulationsregimen** der chaotischen Atmosphäre
- Abhängigkeit des Signals vom regionalen Muster der Eisänderungen analysieren
- Änderungen in anderen Antriebsfaktoren müssen untersucht werden, z.B.
 - Änderungen in Schneebedeckung oder Meeresoberflächentemperaturen
 - Änderungen natürlicher Variabilitätsmuster (z.B. ENSO)
- Detaillierte Untersuchung von Zusammenhängen/Mechanismen in anderen Jahreszeiten steht noch aus

Schlussfolgerungen für Modellierung des Einflusses arktischer Klimaänderungen auf das Wetter und Klima in mittleren Breiten

- Grundlegende atmosphärendynamische Prozesse müssen hinreichend gut dargestellt sein, insbesondere Wellenanregung und Wellenausbreitung
- Adäquate Implementierung des Oberflächenantriebs ist wichtig
→ bedeutsam für gekoppelte Atmosphären-Ozean-Meereis-Modelle
- Potential für verbesserte **Vorhersagen auf Zeitskalen von Jahreszeiten bis Dekaden** und darauf aufbauenden Klimafolgen-Studien

- Cohen, J. J. A. Screen, J. C. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, J. Jones, (2014), Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, 7, 627–637, doi:10.1038/ngeo2234
- Handorf, D., R. Jaiser, K. Dethloff, A. Rinke, and J. Cohen (2015), Impacts of Arctic sea ice and continental snow cover changes on atmospheric winter teleconnections. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2015GL063203
- Jaiser, R., K. Dethloff, D. Handorf, A. Rinke, and J. Cohen (2012), Planetary- and synoptic-scale feedbacks between tropospheric and sea ice cover changes in the Arctic, *Tellus, Ser. A*, 64, 11595, doi:10.3402/tellusa.v64i0.11595.
- Jaiser, R., K. Dethloff, and D. Handorf (2013), Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes, *Tellus, Ser. A*, 65, 19375, doi:10.3402/tellusa.v65i0.19375.
- Jaiser, R., T. Nakamura, D. Handorf, K. Dethloff, J. Ukita, K. Yamazaki (2016), Atmospheric winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations. *JGR*, submitted.
- Nakamura, T., K. Yamazaki, K. Iwamoto, M. Honda, Y. Miyoshi, Y. Ogawa, J. Ukita (2015), A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea-ice reduction in late autumn. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 3209–3227, doi: 10.1002/2014JD022848.
- Brennecke, W. (1904), Beziehungen zwischen der Luftdruckverteilung und den Eisverhältnissen in des Ostgrönländischen Meeres. *Ann. Hydrogr. Mar. Meteor.*, 32(II), 49-62.
- Meinardus, W. (1906), Periodische Schwankungen der Eistrift bei Island. *Ann Hydrogr. Mar. Meteor.*, 34, 148-162, 227-239, 278-285.
- Hildebrandsson, H.H. (1914), Quelques recherches sur les centres d'action de l'atmosphère. *Kungl. Svenska vetenskapsakademiens handlingar*, 51, 3-16.
- Wiese, W. (1924), Polareis und atmosphärische Schwankungen. *Geograf. Ann.*, 6, 273-299.
- Herman, G.F. and W.T. Johnson (1978), The Sensitivity of the General Circulation to Arctic Sea Ice Boundaries: A Numerical Experiment. *Mon. Weath. Rev.*, 106, 1649-1664.



ALFRED-WEGENER-INSTITUT
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-
UND MEERESFORSCHUNG

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit