

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

Dörthe Handorf<sup>1</sup>

Ralf Jaiser<sup>1</sup>, Annette Rinke<sup>1</sup>, Klaus Dethloff<sup>1</sup>,  
Judah Cohen<sup>2</sup>, Tetsu Nakamura<sup>3,4</sup>, Jinro Ukita<sup>5</sup>, Koji Yamazaki<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung,  
Forschungsstelle Potsdam

<sup>2</sup>Atmospheric and Environmental Research, Inc., Lexington, Massachusetts, USA

<sup>3</sup>National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

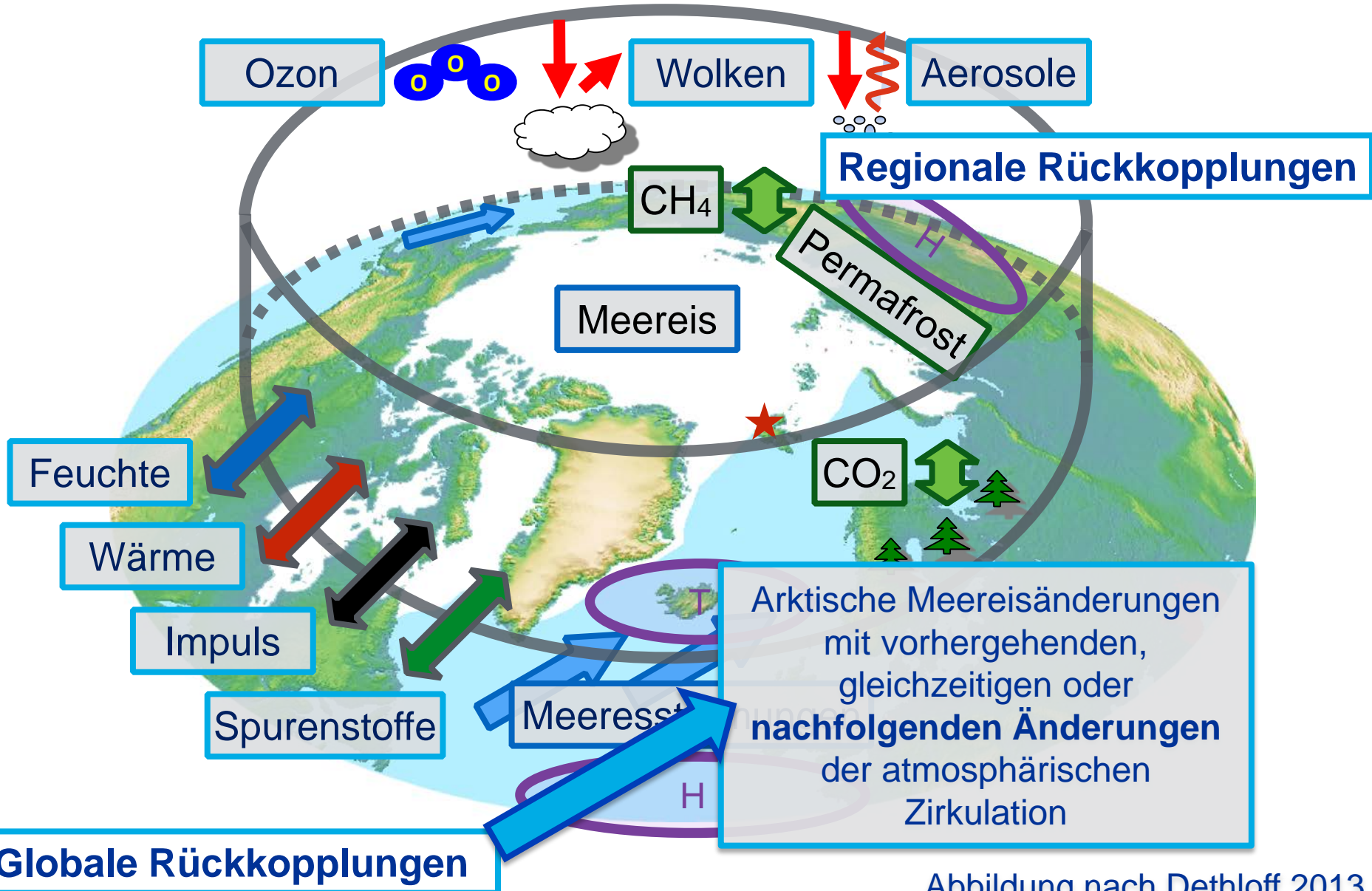
<sup>4</sup>Hokkaido University, Sapporo, Japan

<sup>5</sup>Niigata University, Niigata, Japan

 DACH  
2016

DACH-Tagung, Berlin, 18. März 2016

Arktisches Meereis © AWI/Mario Hoppmann CC-BY 4.0





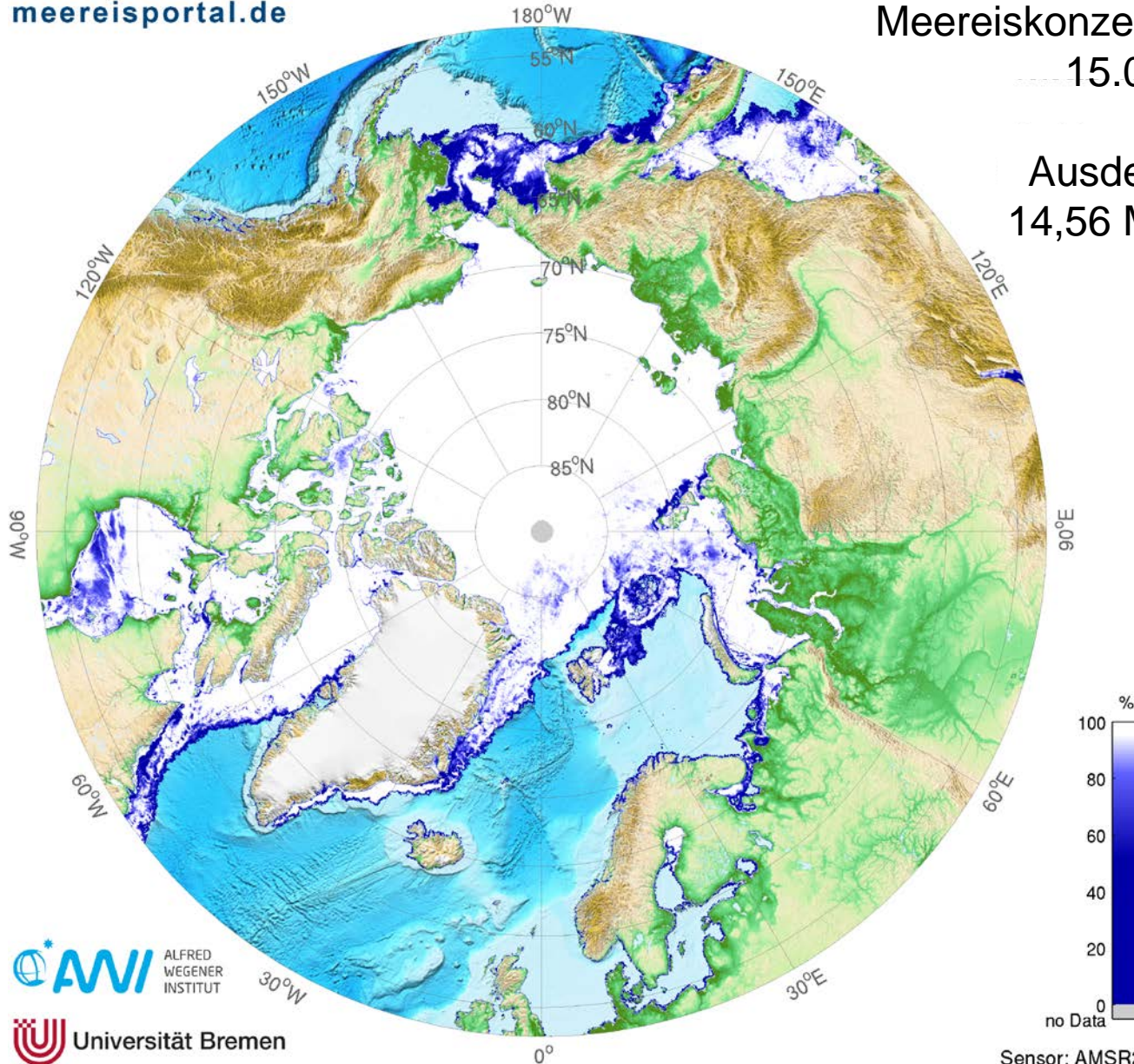
# Die aktuelle Situation in der Arktis

meereisportal.de

Meereiskonzentration

15.03.2016

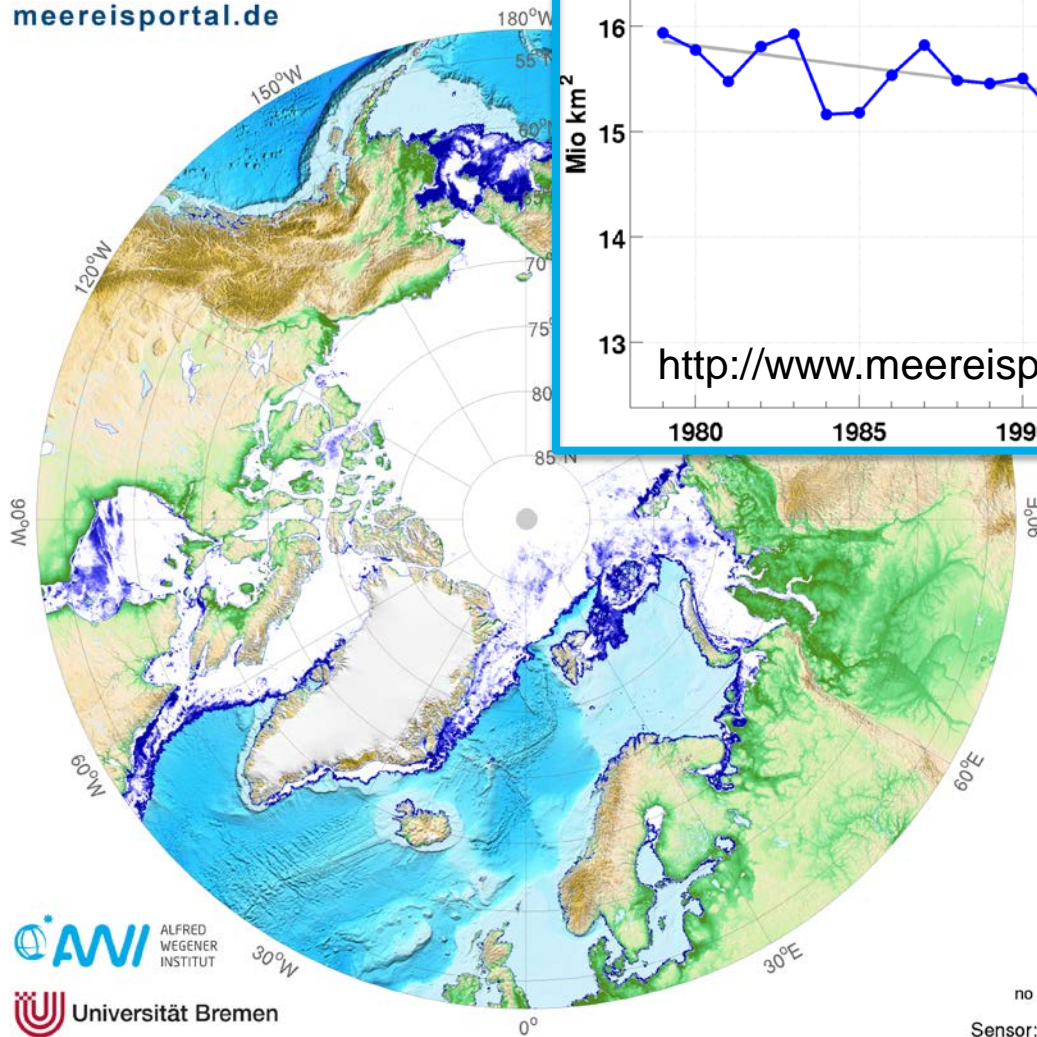
Ausdehnung:  
14,56 Mio km<sup>2</sup>



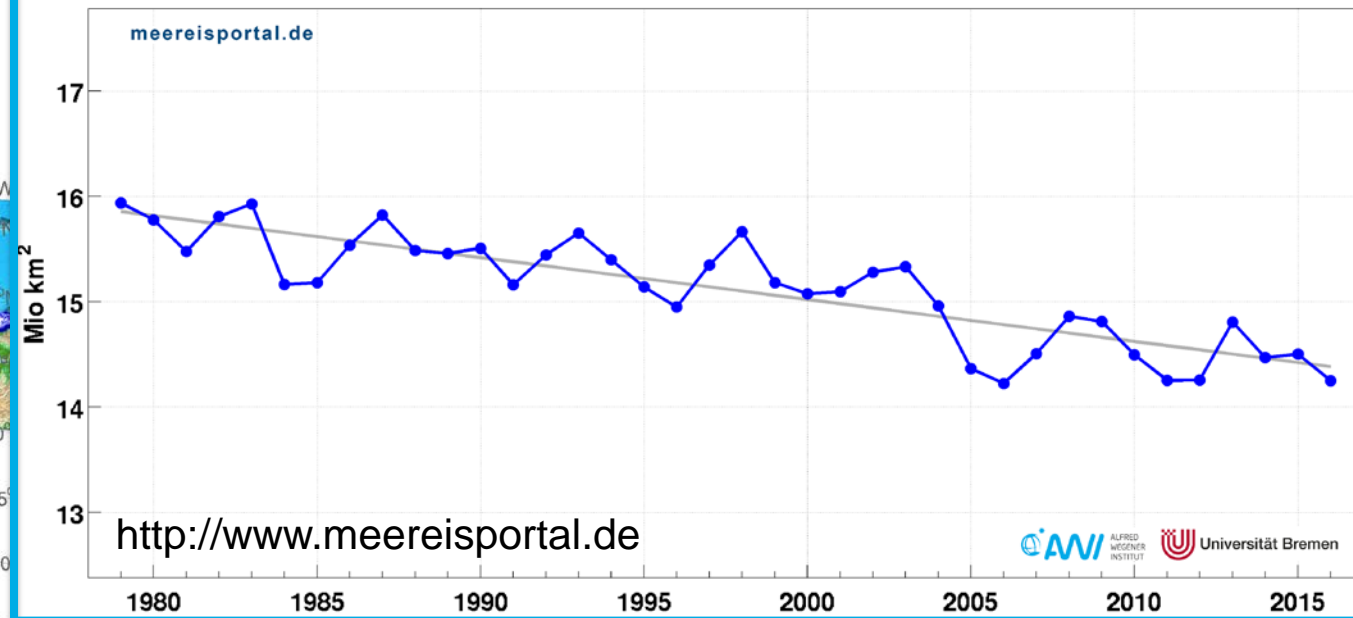
- Negative Anomalie in Meereisbedeckung vor allem über nördlicher Barents-See
- Verbunden mit positiven Temperaturanomalien

Sensor: AMSR2

meereisportal.de



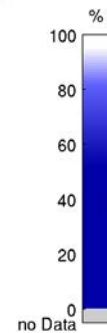
## Februar-Mittel der Meereisausdehnung in der Arktis von 1979-2016



<http://www.meereisportal.de>

AWI ALFRED WEGENER INSTITUT Universität Bremen

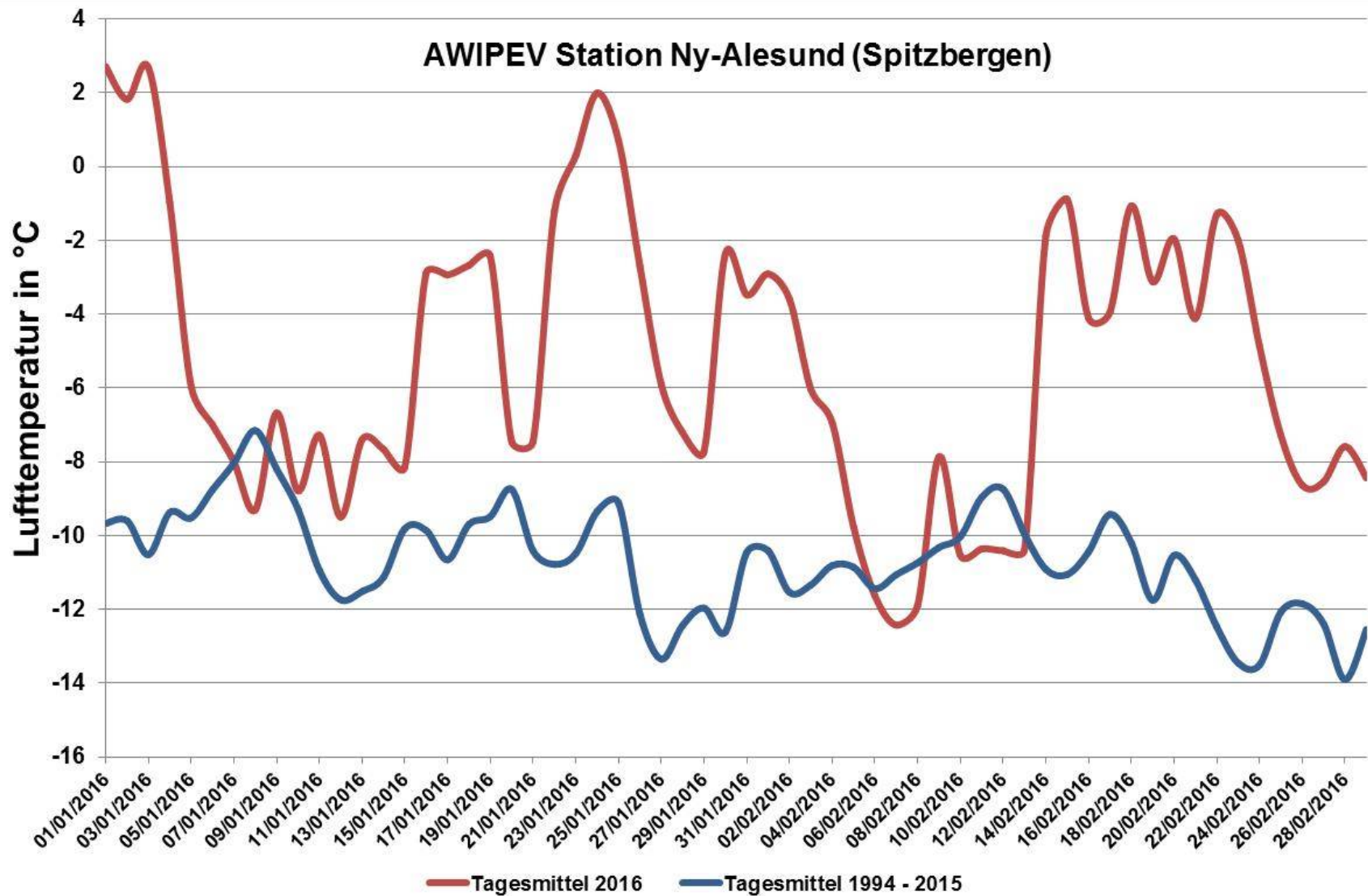
- Negative Anomalie in Meereisbedeckung vor allem über nördlicher Barents-See
- Verbunden mit positiven Temperatur-anomalien



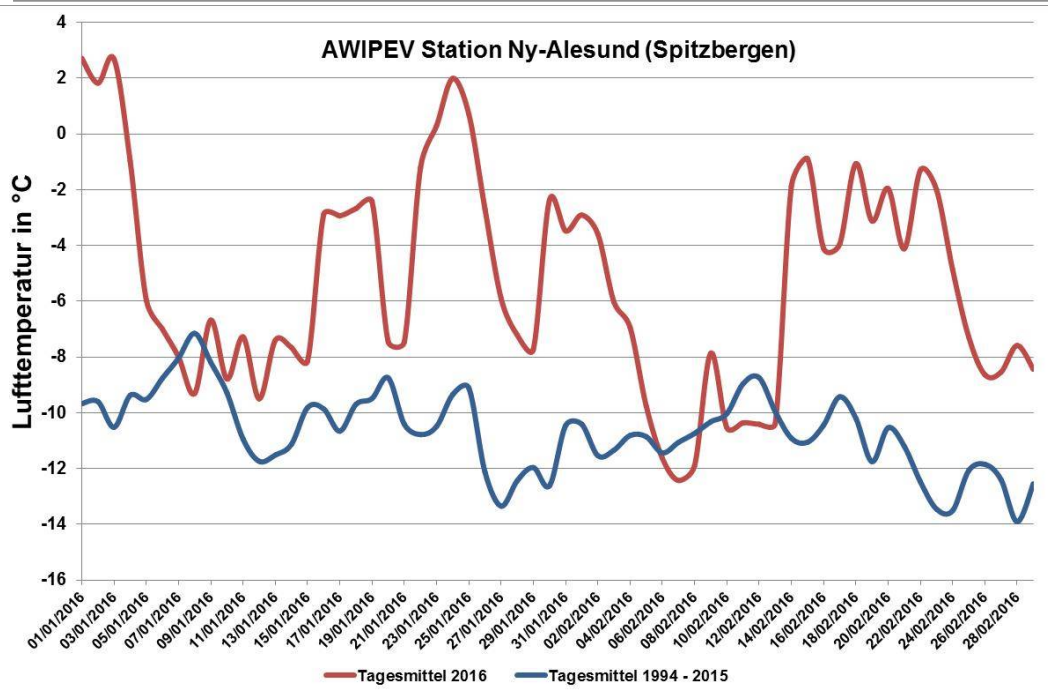
Sensor: AMSR2



# Die aktuelle Situation in der Arktis



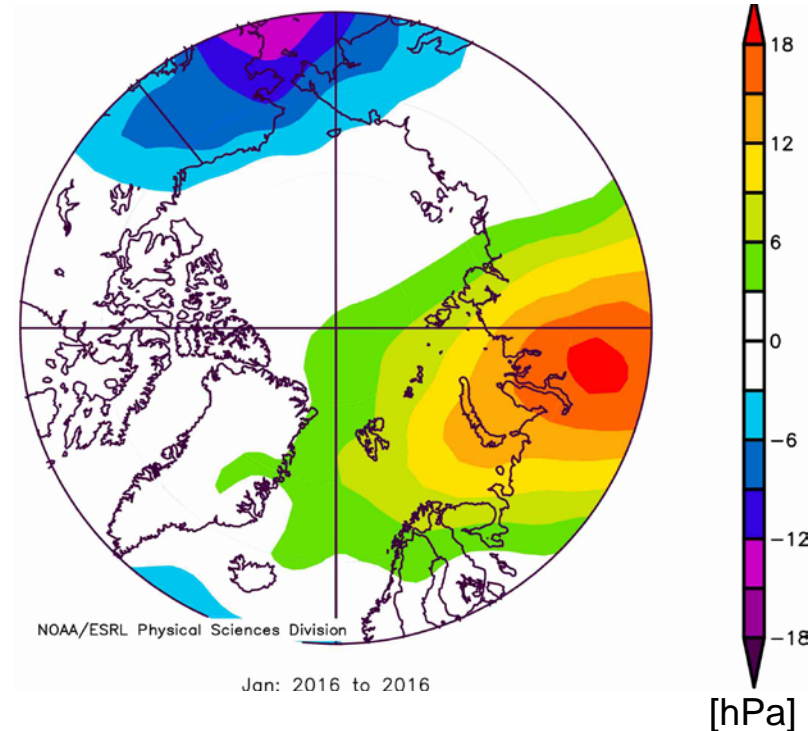
# Die aktuelle Situation in der Arktis



<http://www.meereisportal.de>

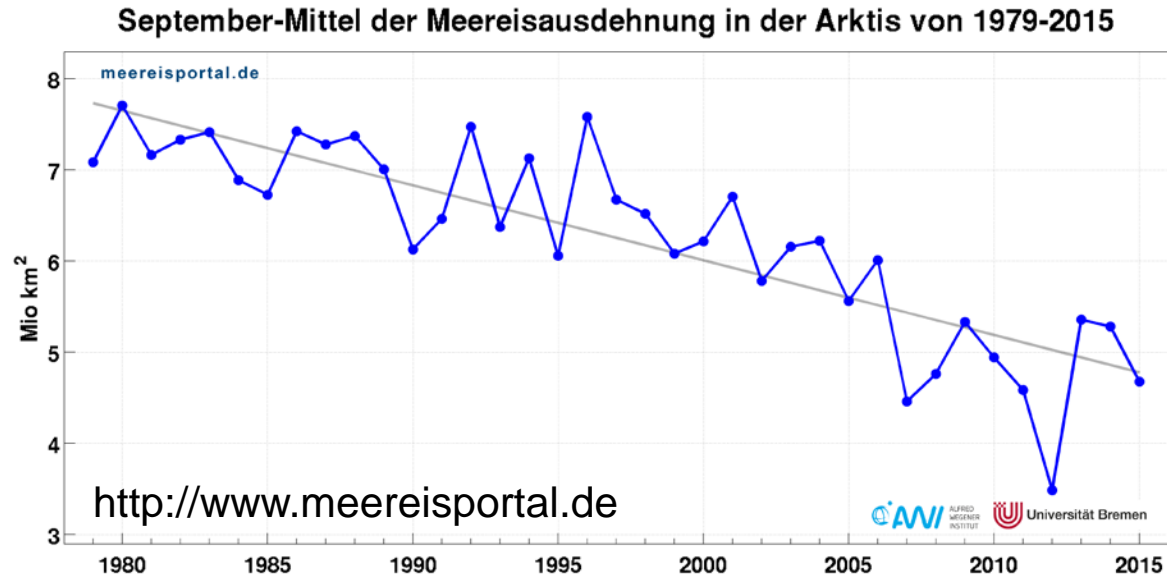
Atmosphärische Zirkulation im Januar  
→ Arktische Oszillation überwiegend negativ

Januar 2016  
Anomalien des Luftdrucks  
zum Mittel 1981-2010

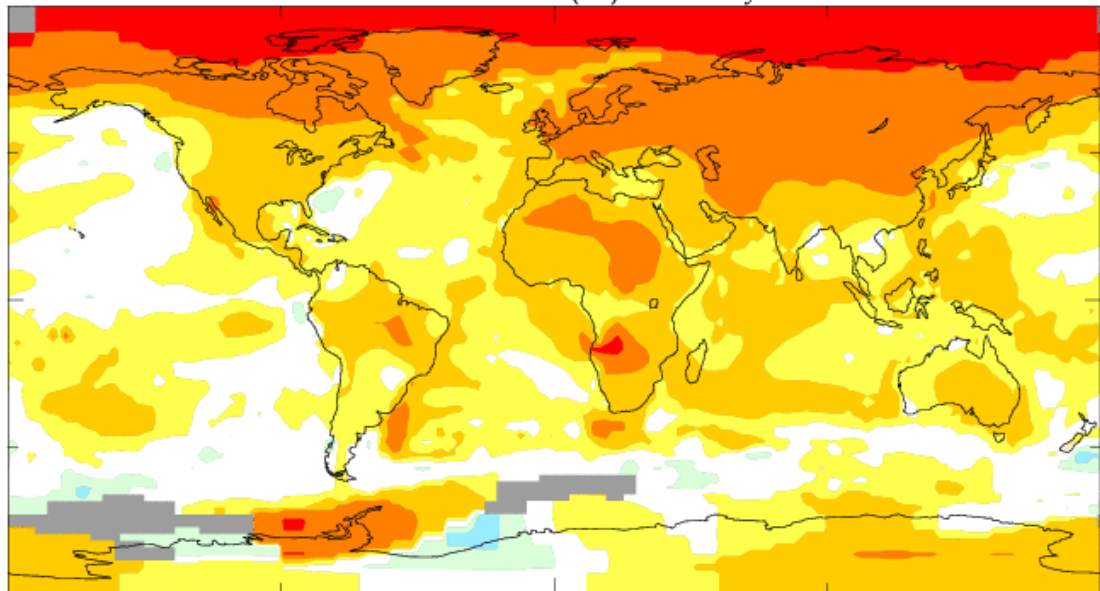


# Arktische Verstärkung und Rückgang des arktischen Meereises

## Rückgang der arktischen Meereisausdehnung im September, 1979-2015



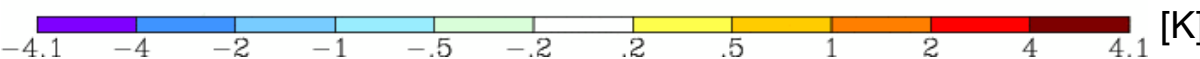
Annual J-D 2005-2009 L-O<sub>TI</sub>(°C) Anomaly vs 1951-1980 .54



## 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)

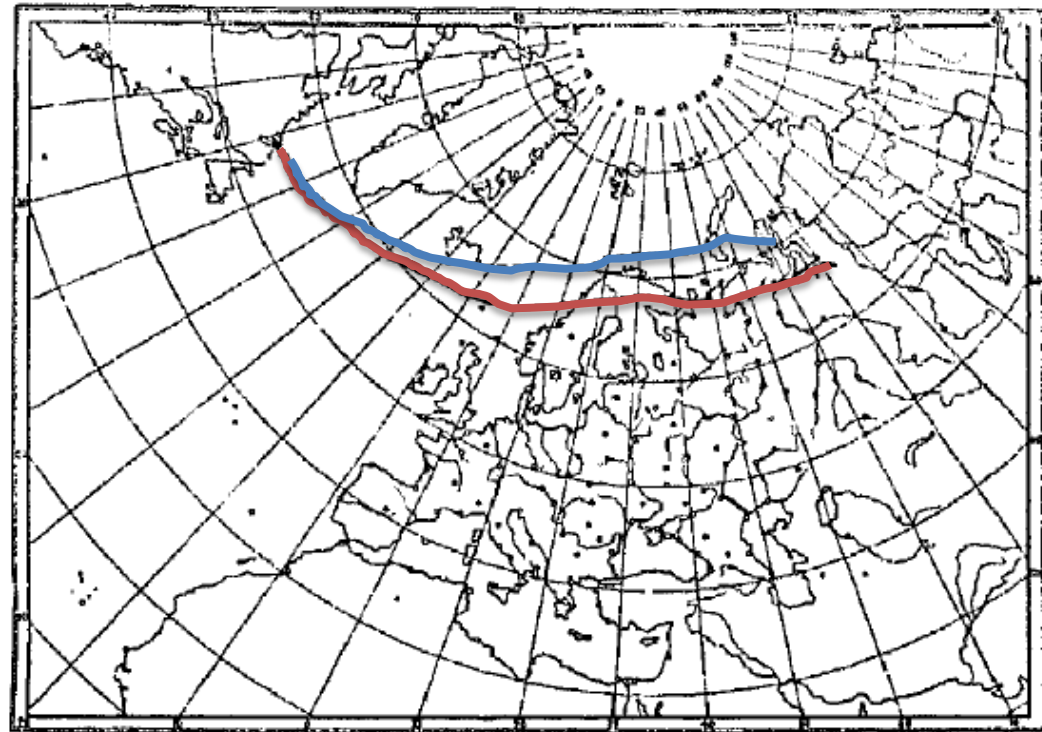


Fig. 10. Mittlere Bahnen nordatlantischer Zyklonen im Herbst.

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

## Analyse von Beobachtungsdaten

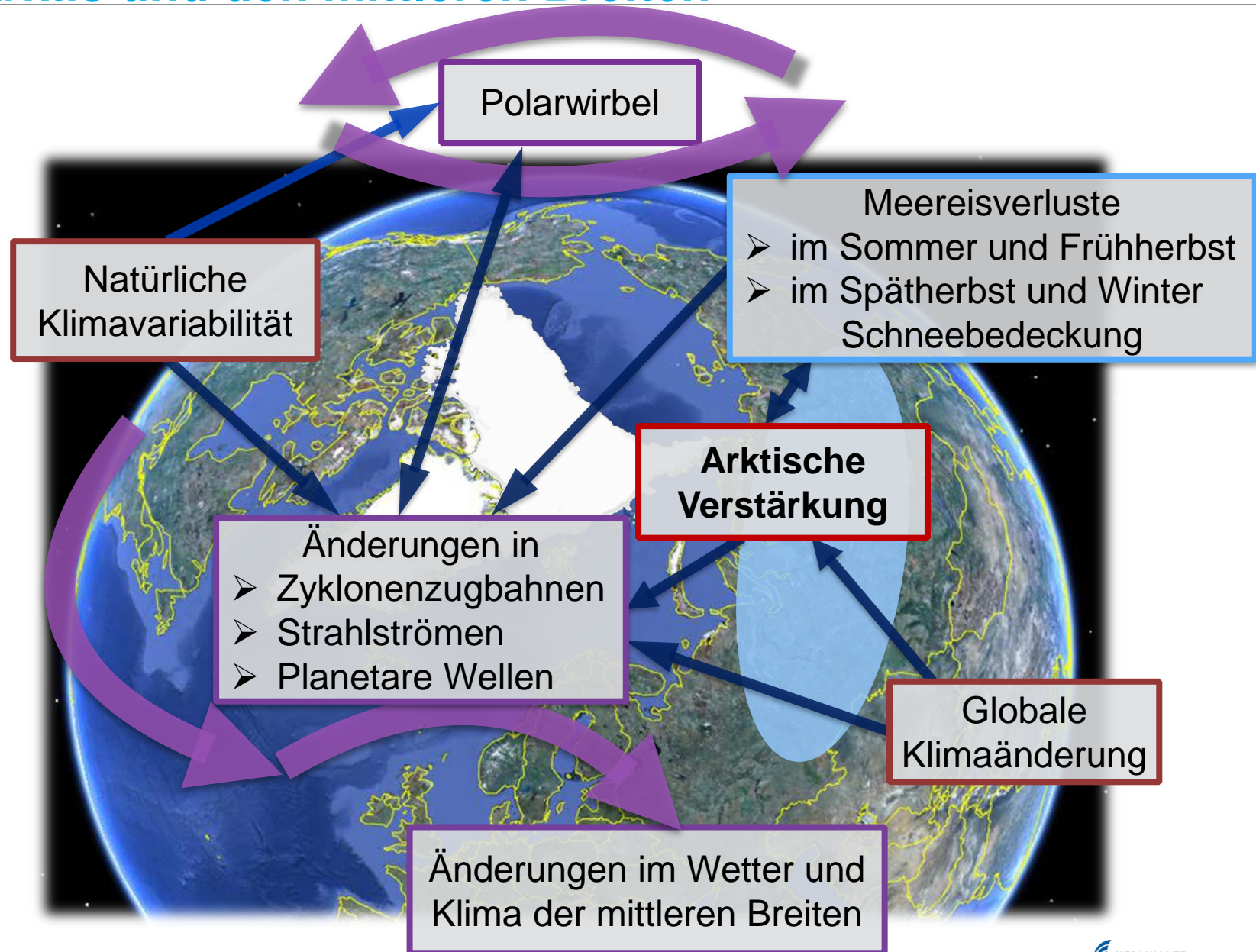
- Brennecke (1904), Meinardus (1906)  
lokale synoptische Situation ↔ Position der Eiskante
- Hildebrandsson (1914)  
Hypothese: Mittlere Winterbedingungen in  
sind von der sommerlichen Eisbedeckung in der  
Grönlandsee abhängig
- Wiese (1924)  
Zusammenhänge zwischen:  
(1) Luftdruckverteilung und 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)

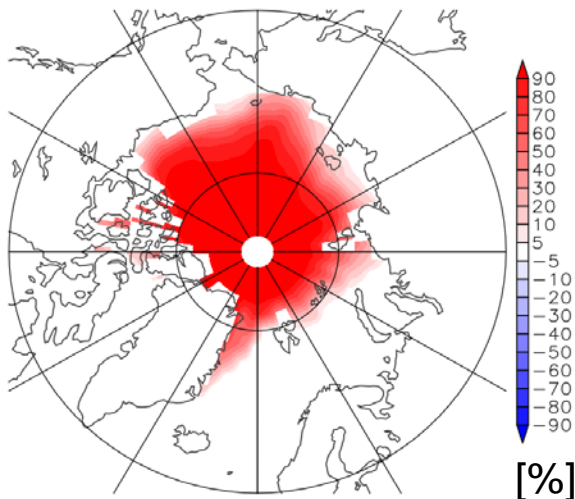
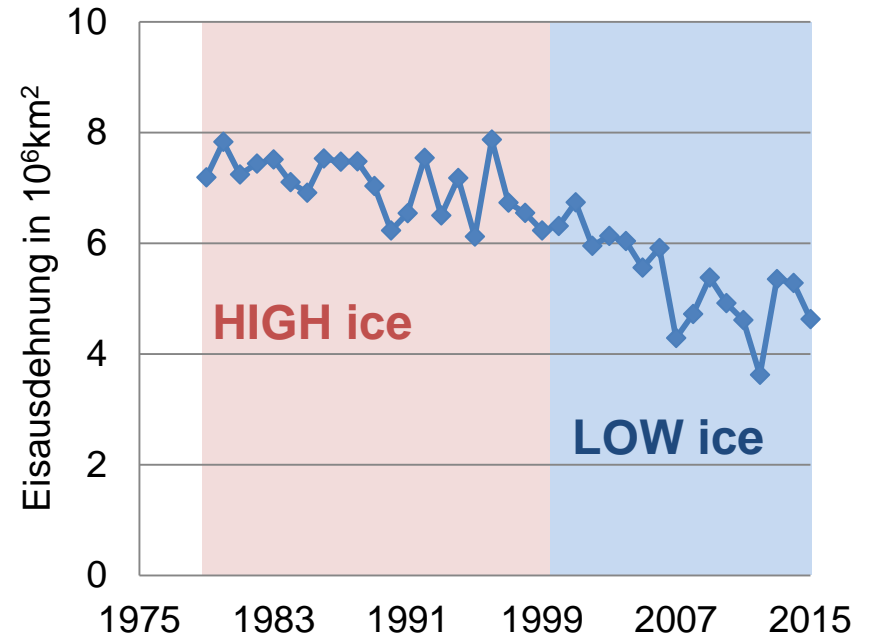


# Dynamische Verbindungswege zwischen der Arktis und den mittleren Breiten

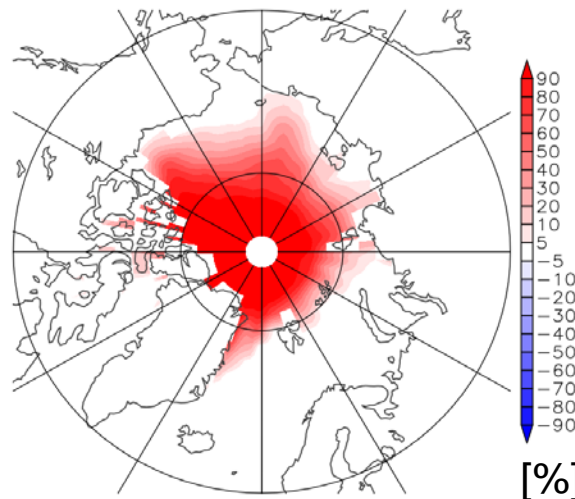


# Meereisrückgang & nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen – ERA-Interim Daten

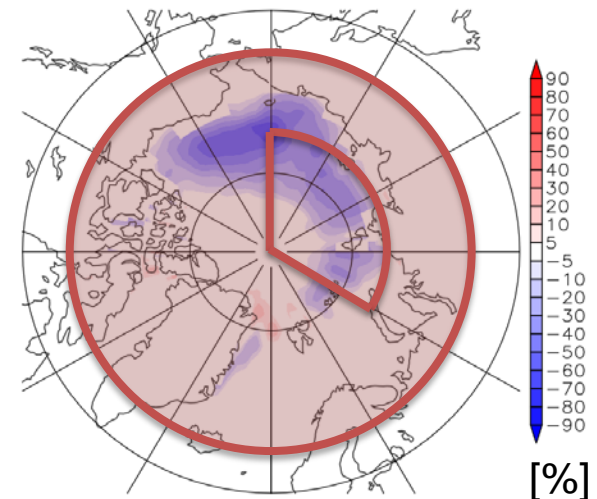
- ERA-Interim
- Reanalyse Datensatz
- Analysen für 1979-2014
- **September Eiskonzentration (%)**
- **Hohe Meereisausdehnung**  
**HIGH ice** (1979/80-1999/00)
- **Geringe Meereisausdehnung**  
**LOW ice** (2000/01-2013/14)



**HIGH**



**LOW**



**LOW-HIGH**

# Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

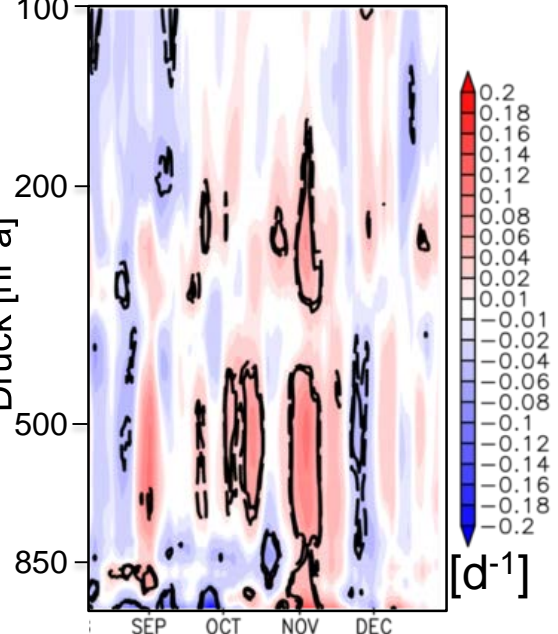
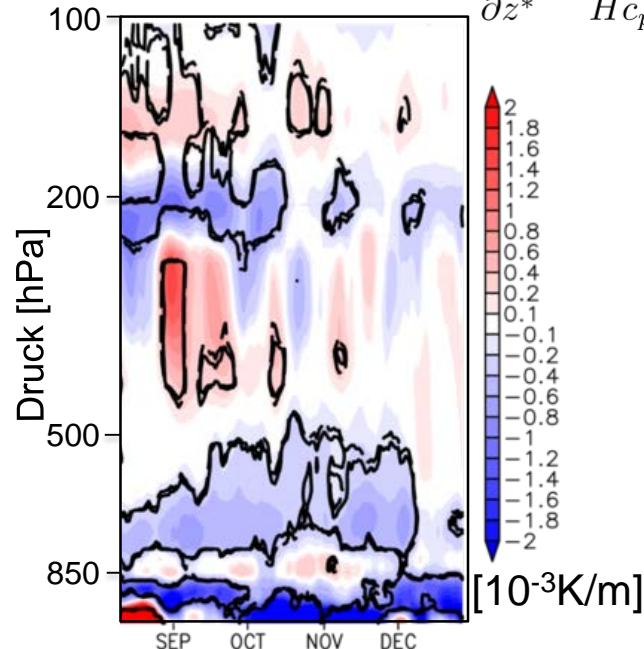
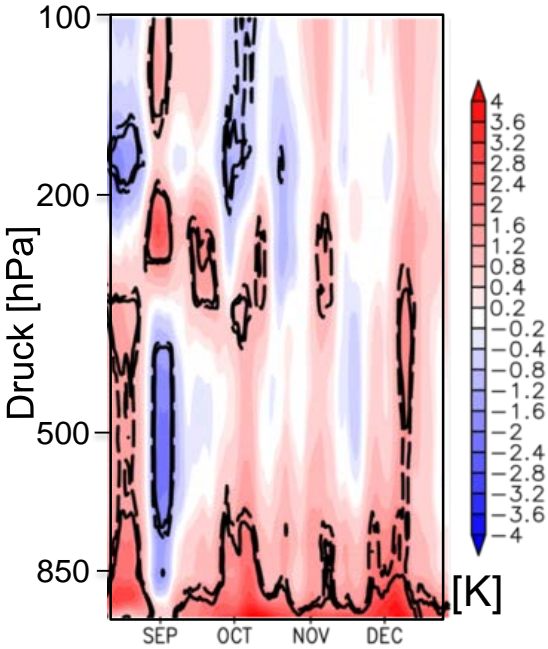


## Barokline Reaktion in der Arktis im Herbst

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

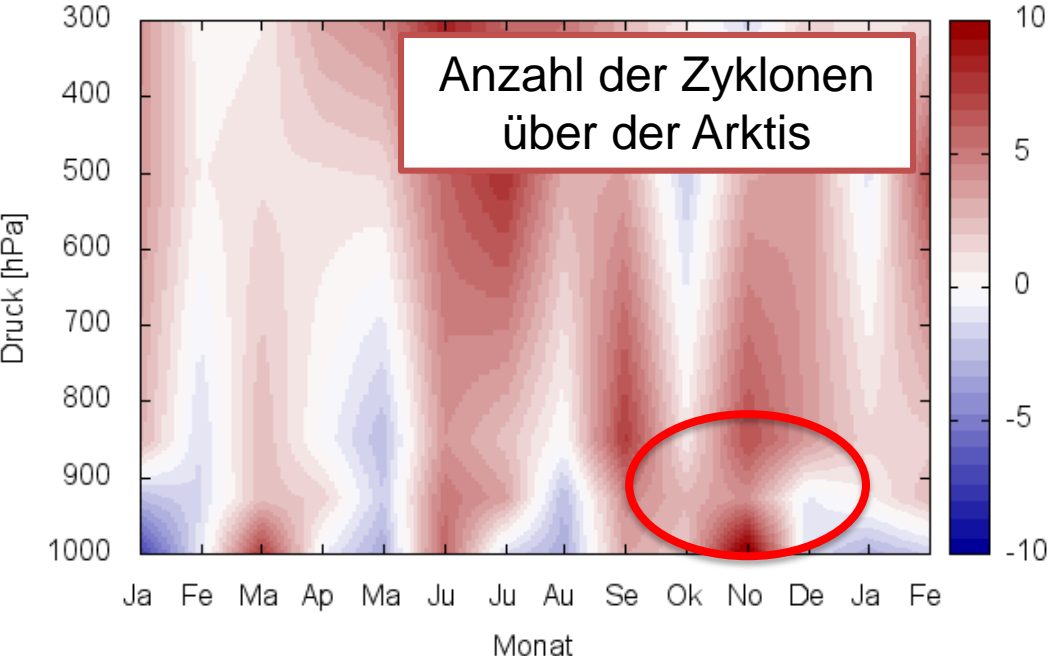
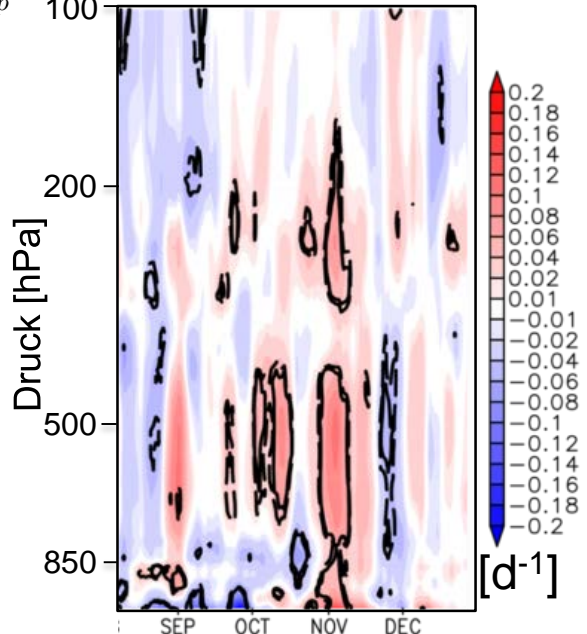
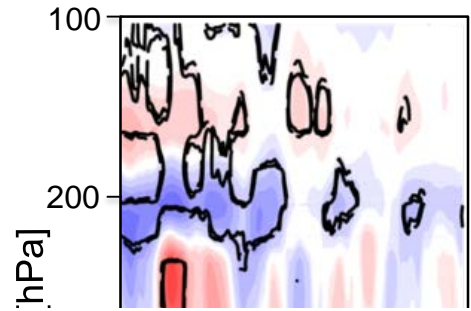
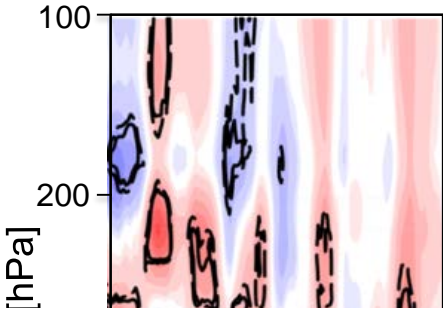


## Barokline Reaktion in der Arktis im Herbst

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

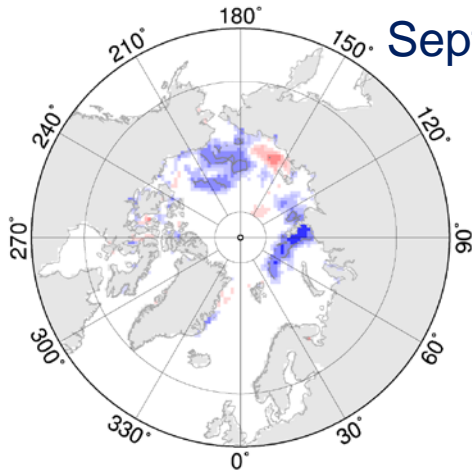
### Eady Wachstumsrate

Erhöhte Baroklinität in mittlerer Troposphäre

Intensivierung der Zyklonenentstehung

## Meereiskonzentration

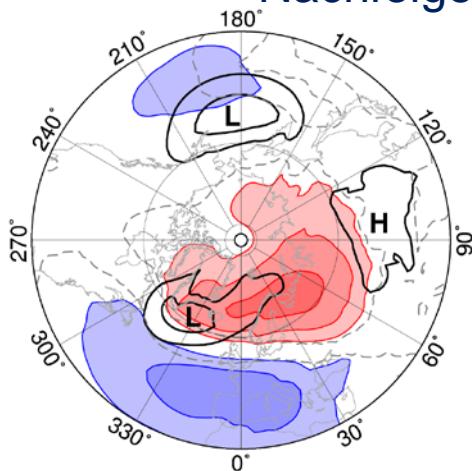
September (HadISST Daten)



-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

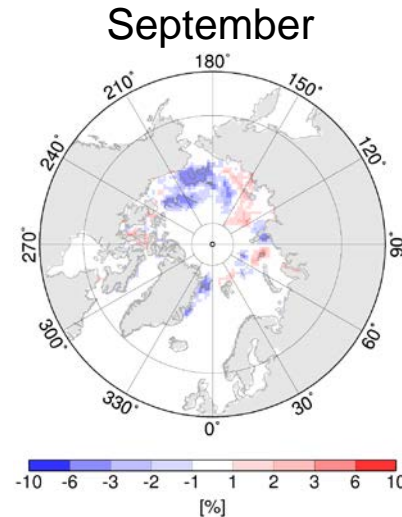
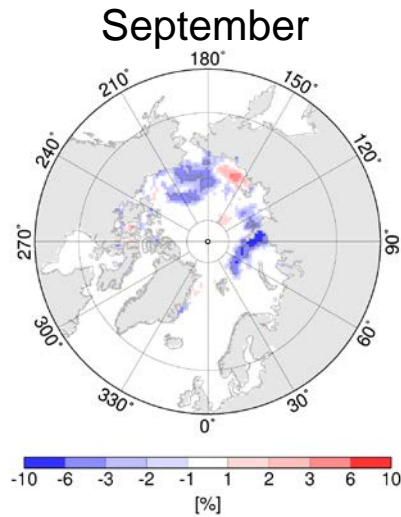
- Statistische Zusammenhänge zwischen Meereisabnahme und Änderungen der atmosphärischen Zirkulationsmuster
- Änderungen der Aktionszentren, negatives NAO-Muster

# Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

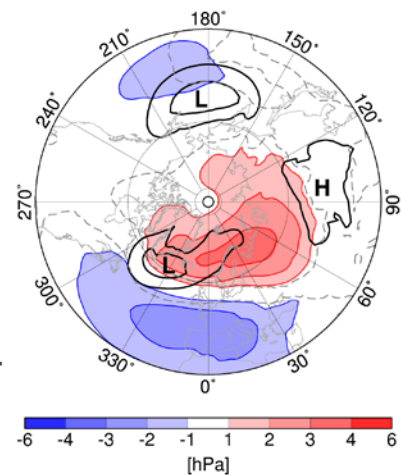
## Großskalige Reaktion im Winter Gekoppelte Muster 1979-2015

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

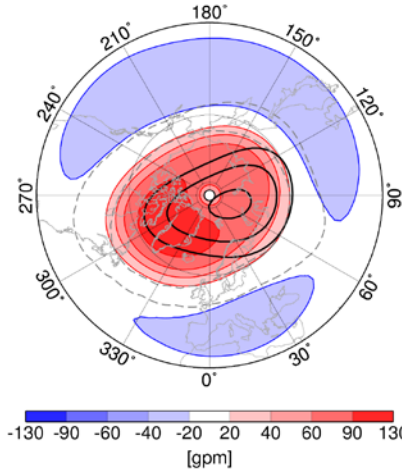
Meereiskonzentration



Atmosphärische Zirkulation



Winter  
Bodenluftdruck  
42% erklärte Kovarianz



Winter  
GPH 50hPa  
53% erklärte Kovarianz

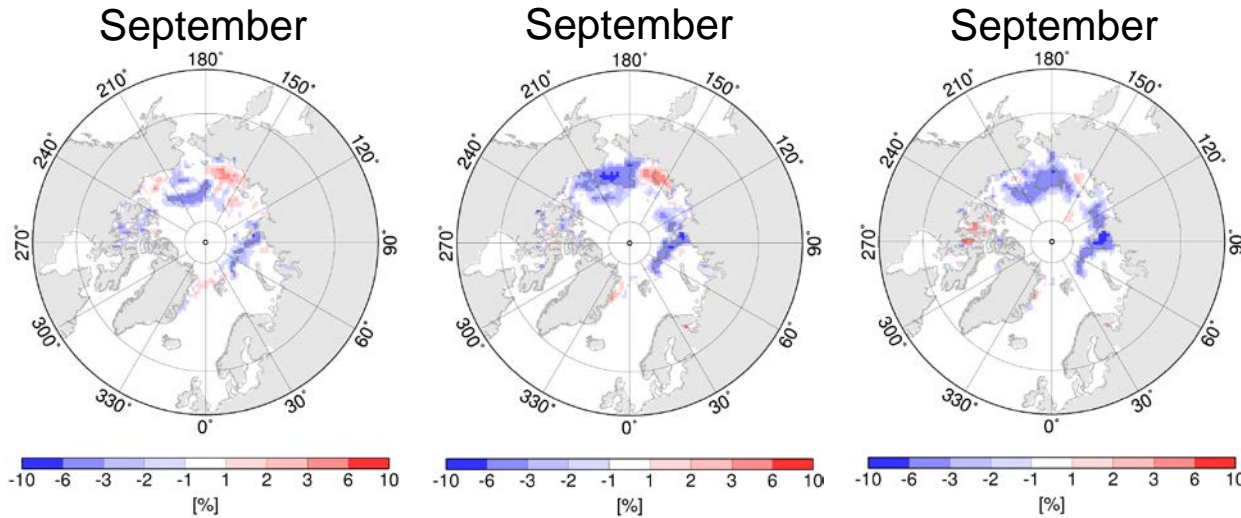


# Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

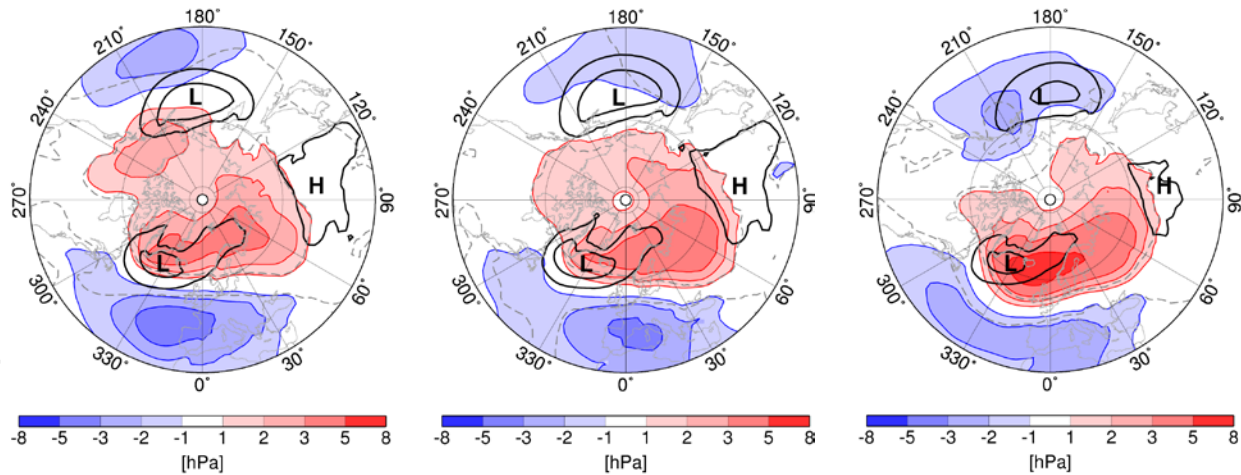
**Großskalige  
Reaktion im Winter  
Gekoppelte Muster  
1979-2015  
Bodenluftdruck  
Monatliche  
Auflösung**

- Verlagerung der Aktionszentren nach Westen über Nordatlantik

Meereiskonzentration



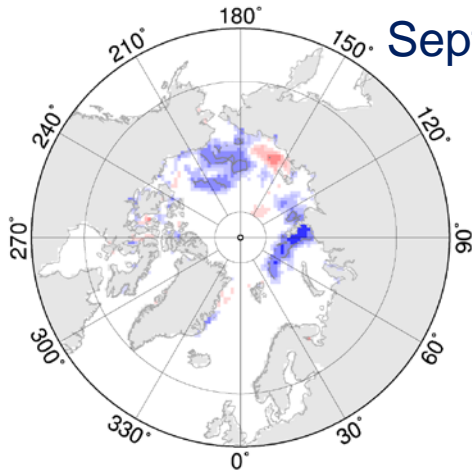
Atmosphärische Zirkulation



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

## Meereiskonzentration

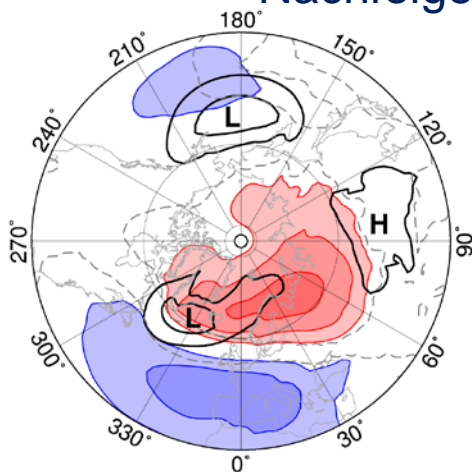
September (HadISST Daten)



-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?**

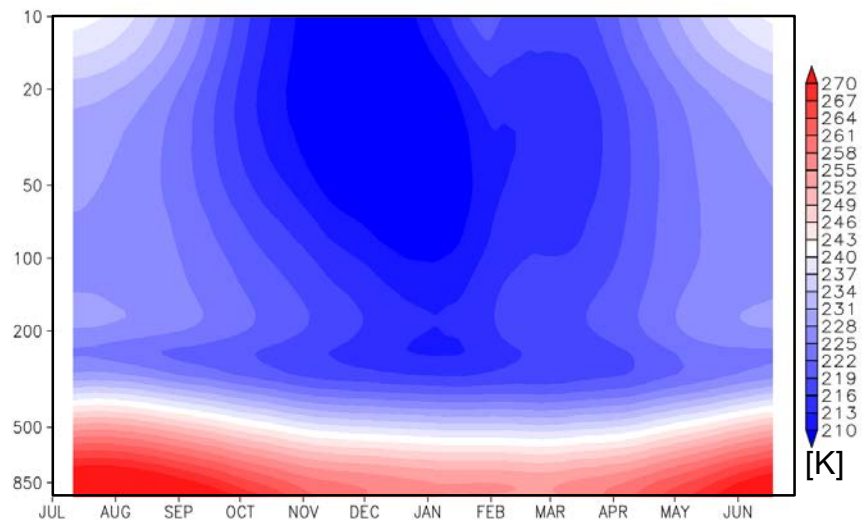
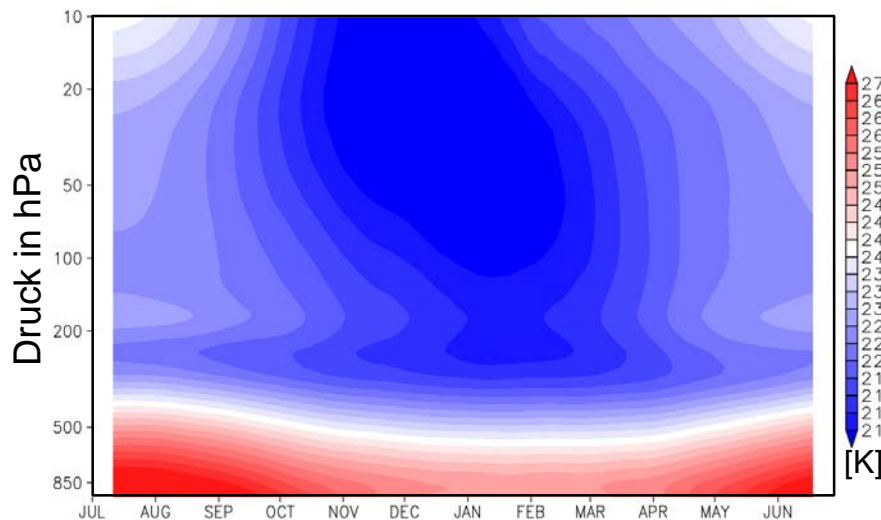
Jaiser et al. 2012, 2013, 2016 (submitted)  
Handorf et al. 2015

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

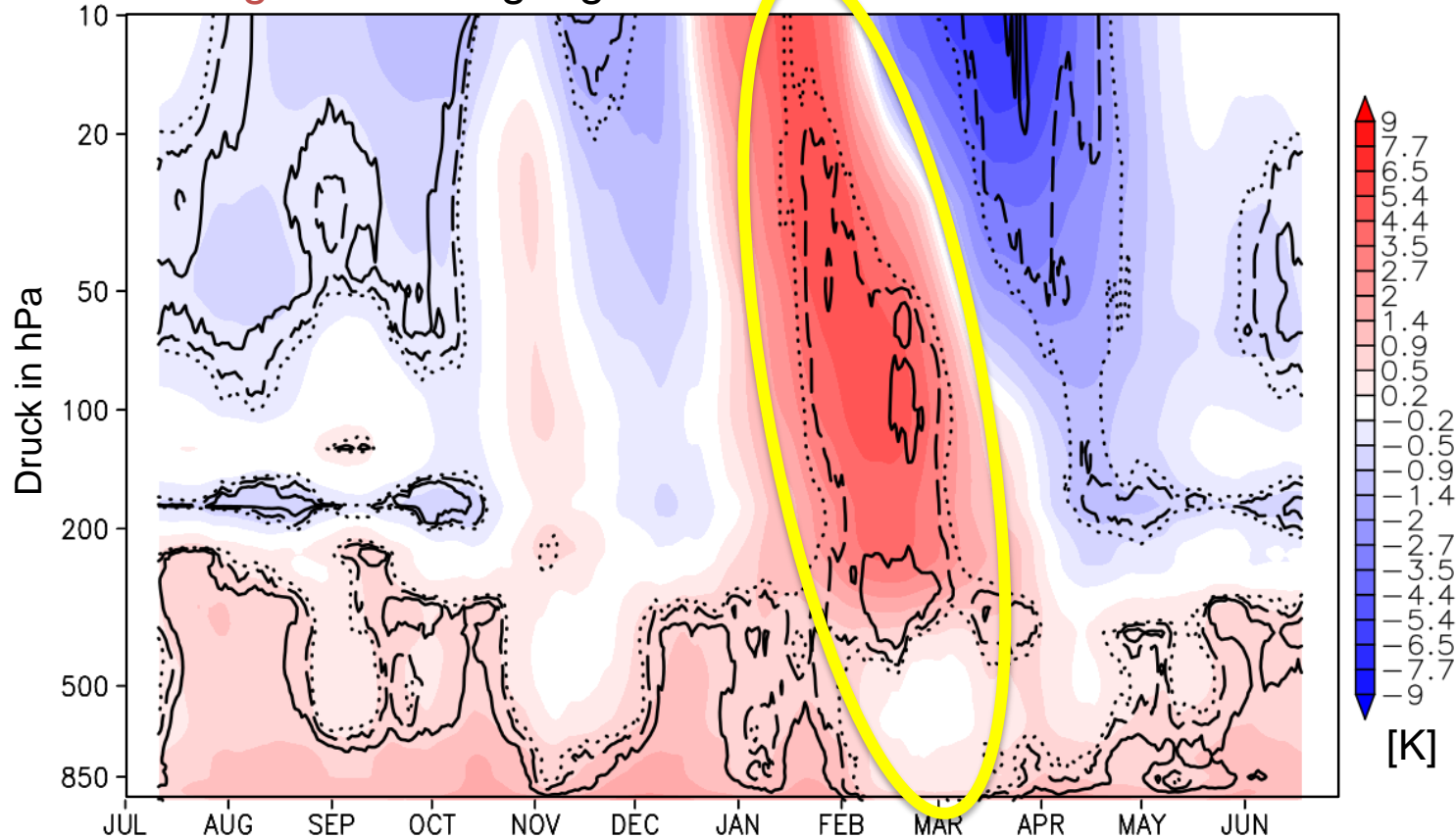


- Ganzjährig höhere troposphärische Temperaturen
  - Globale Erwärmung
  - Arktische Verstärkung
- Starke signifikante Erwärmung der polaren Stratosphäre im Spätwinter
  - Störung/Zusammenbruch des Polarwirbels?



# Temperaturänderungen über der Polarregion

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



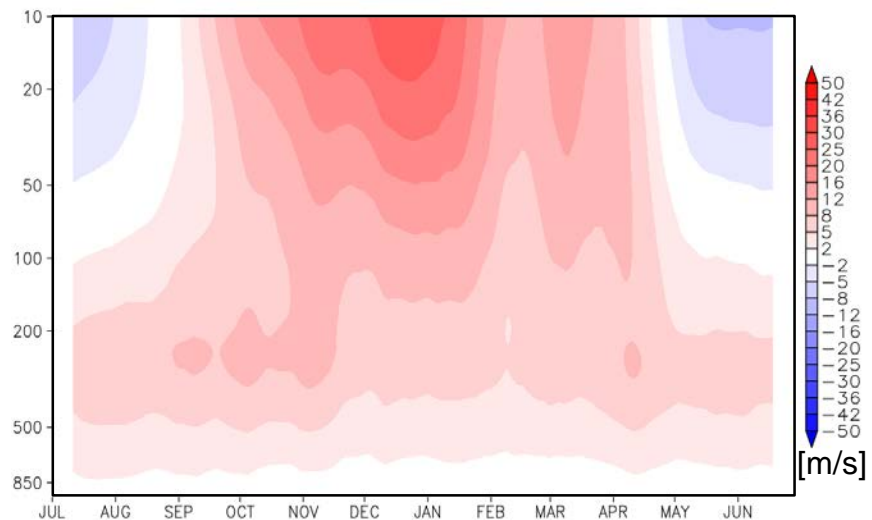
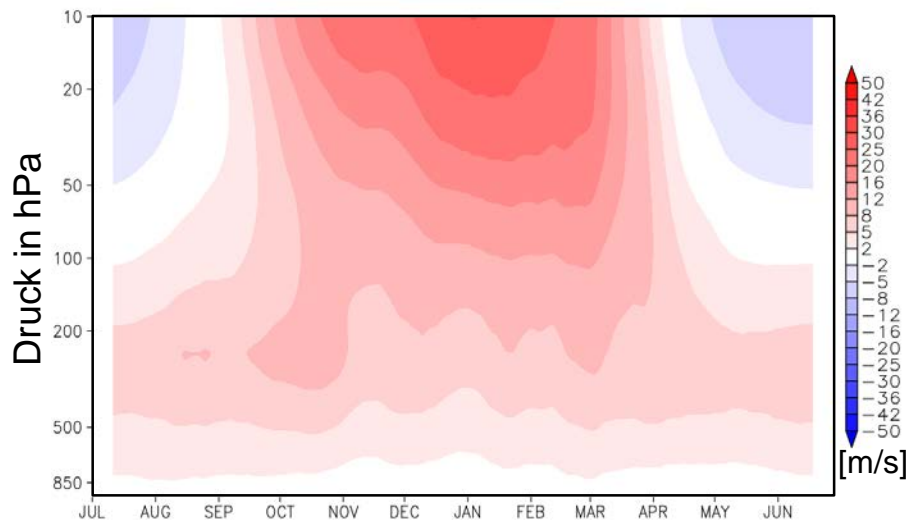
- Ganzjährig höhere troposphärische Temperaturen
  - Globale Erwärmung
  - Arktische Verstärkung
- Starke signifikante Erwärmung der polaren Stratosphäre im Spätwinter
  - Störung/Zusammenbruch des Polarwirbels?

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

## Klimatologien des Zonalwindes über der Polarregion (Westwind)

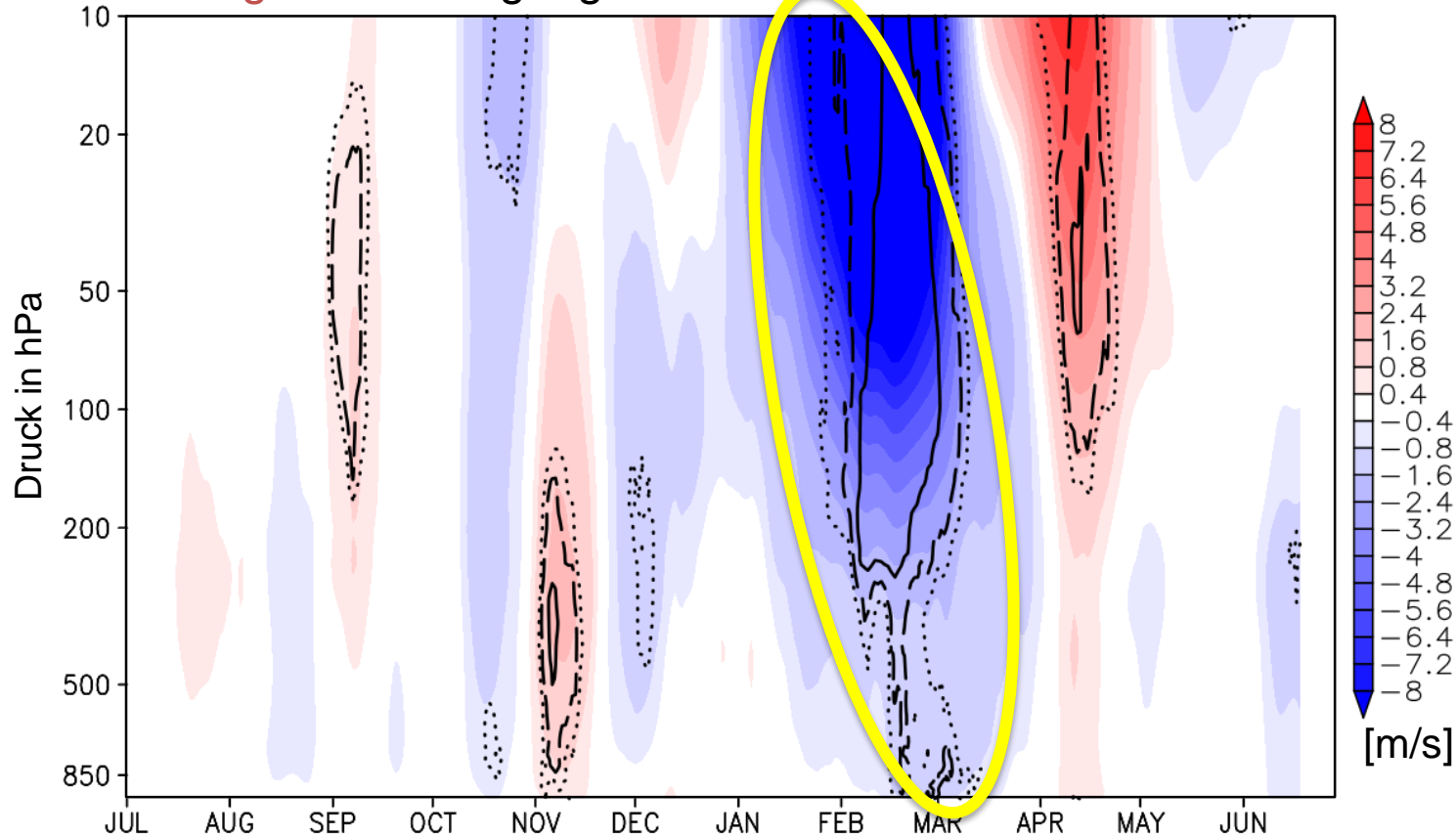
**High ice** 1979/80-1999/00

**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)?**



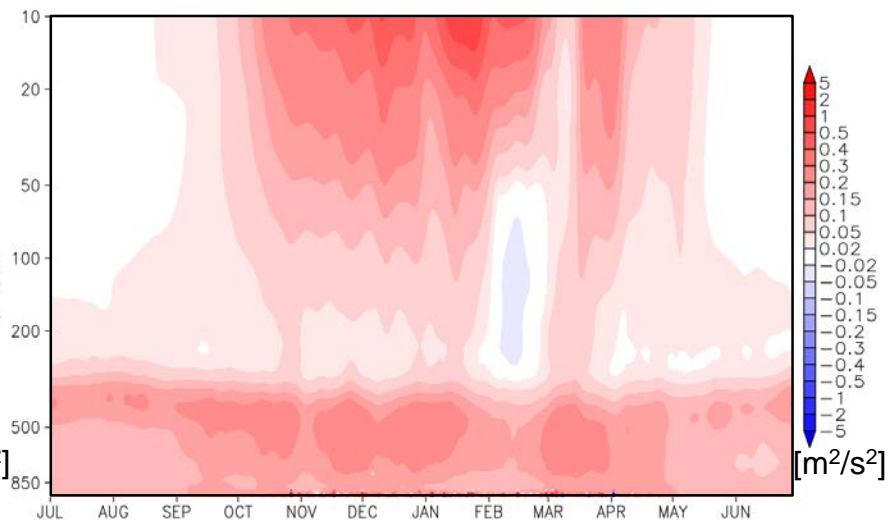
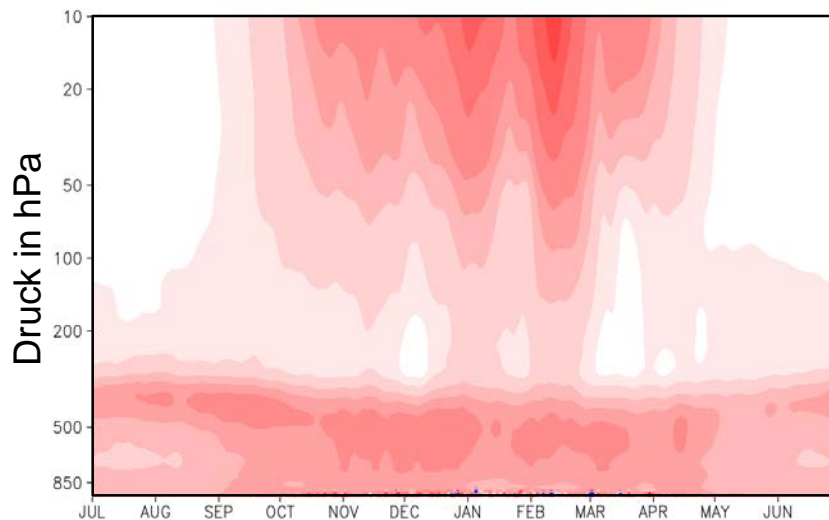
# Änderungen der vertikalen Ausbreitung planetarer Wellen über der Polarregion

Vertikalkomponente Eliassen-Palm Flussvektor [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ] Gebietsmittel über  $65^\circ\text{N}$ - $85^\circ\text{N}$

## Klimatologien Vertikalkomponente des EP-Flussvektors über der Polarregion

**High ice** 1979/80-1999/00

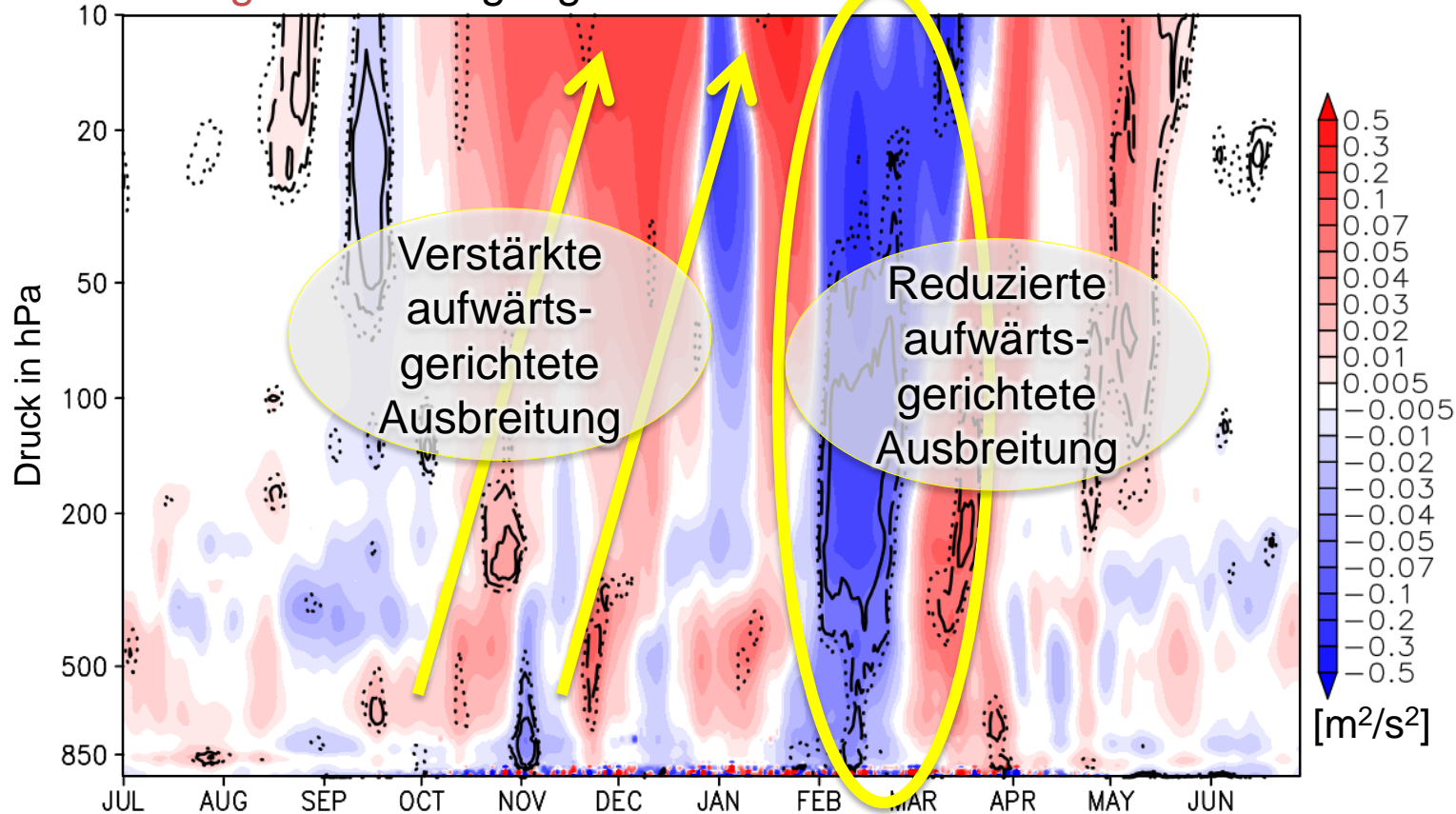
**Low ice** 2000/01-2013/14



- 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 [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ] Gebietsmittel über  $65^\circ\text{N}$ - $85^\circ\text{N}$  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

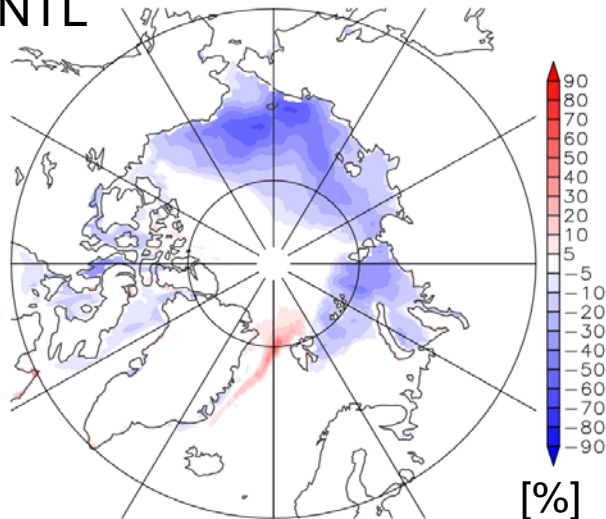
# Darstellung des Einflusses des Meereisrückgangs in Klimamodellen



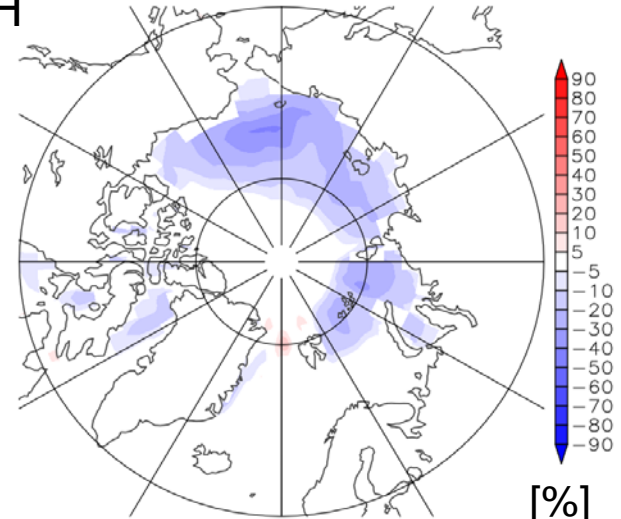
- Modell: AFES (Atmospheric general circulation model For Earth Simulator)
- 2 Modellsimulationen, je 60 Jahre Zeitscheibenexperimente
  - CNTL: High ice Bedingungen, Beobachtungen von 1979 bis 1983
  - NICE: Low ice Bedingungen, Beobachtungen von 2005 bis 2009
  - **Nur Meereis ist zwischen den Simulationen 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



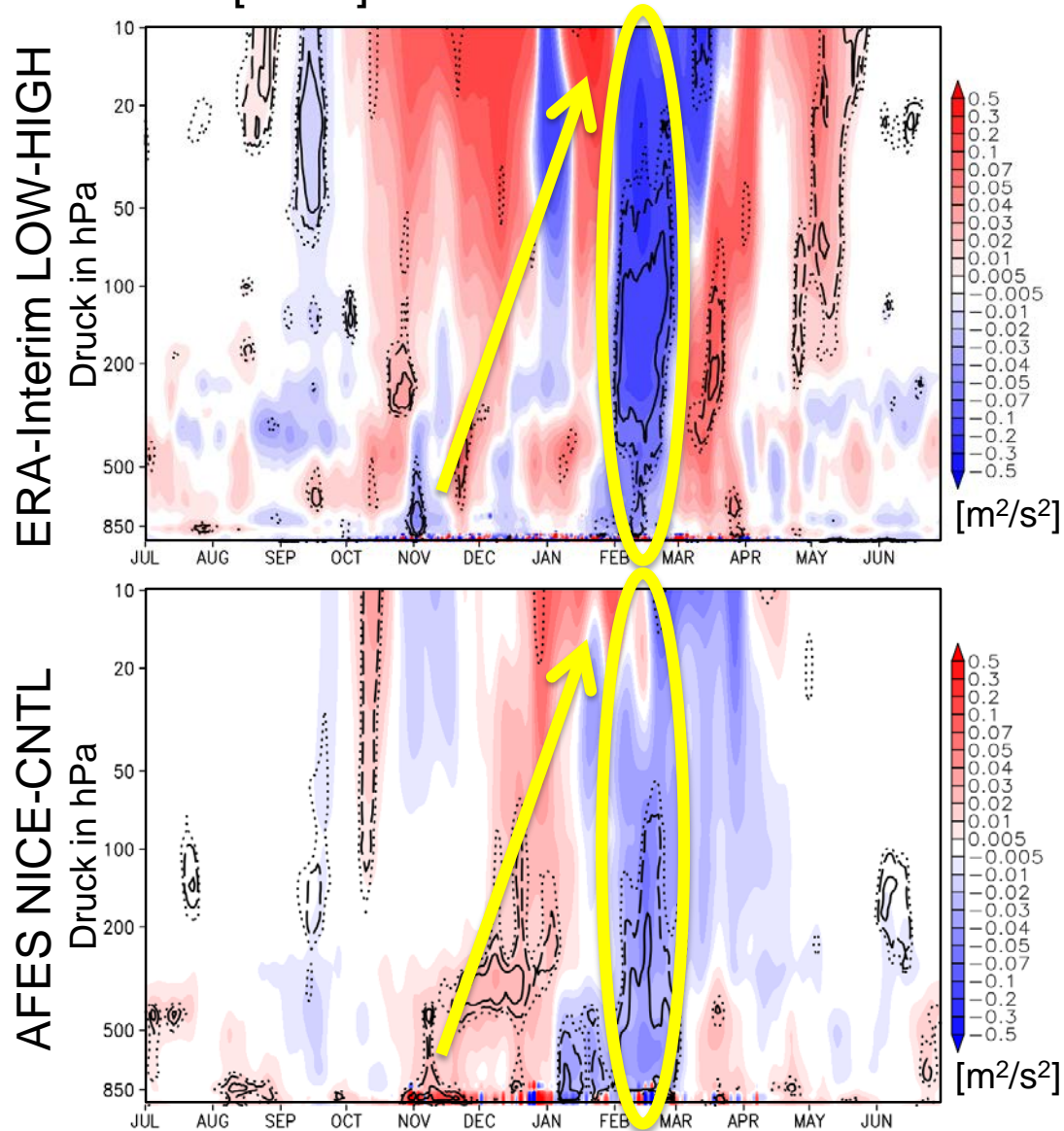
ERA-Interim  
LOW-HIGH



# Änderungen der vertikalen Ausbreitung planetarer Wellen über der Polarregion

Vertikalkomponente Eliassen-Palm Flussvektor [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ] Gebietsmittel über  $65^\circ\text{N}$ - $85^\circ\text{N}$  für low minus high ice Bedingungen

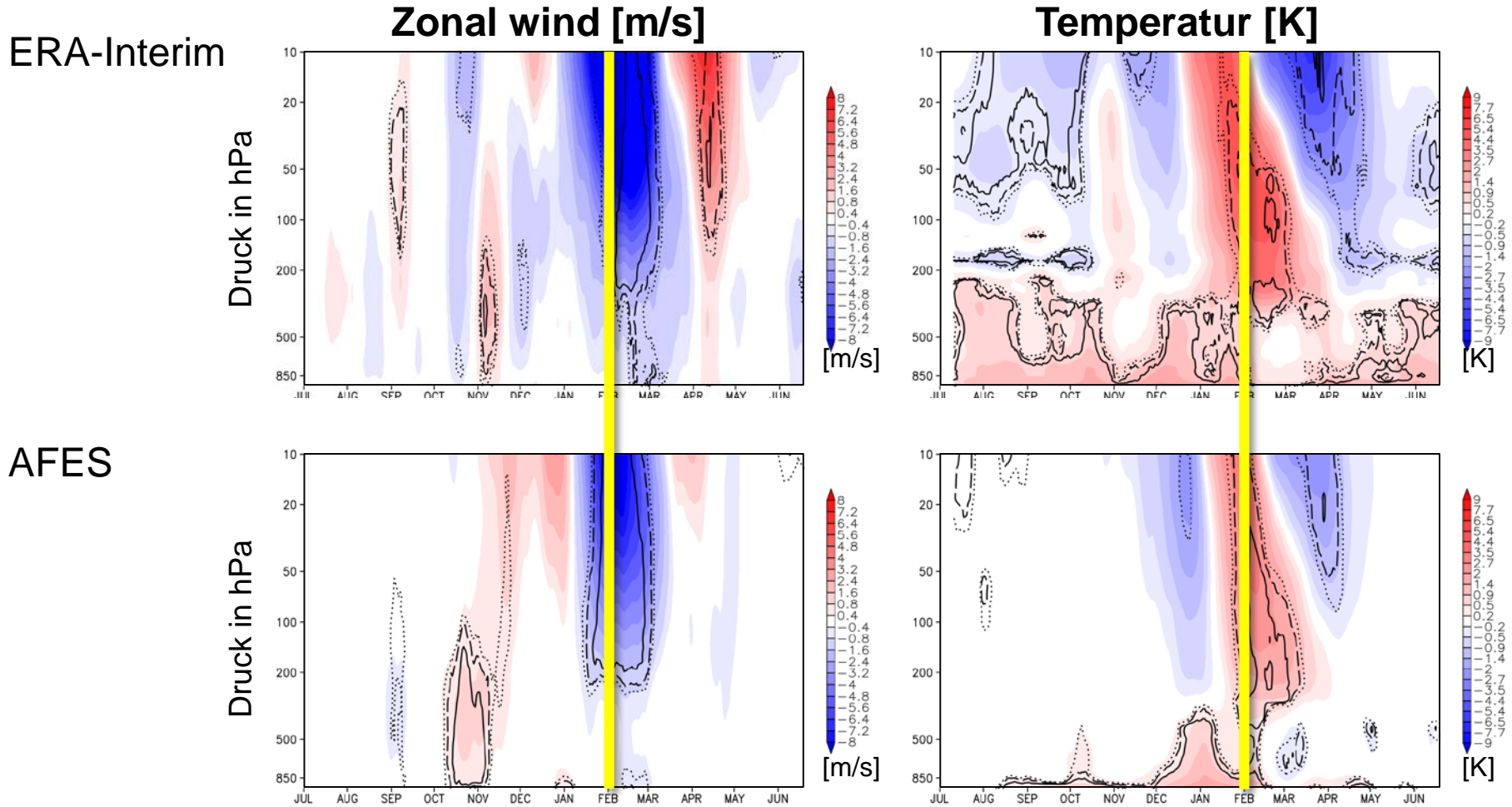
- Ähnliche Anomalien im Winter
- Reduzierter vertikaler Fluss im Februar ist hochsignifikant in beiden Datensätzen
- **Diese Übereinstimmung zeigt den deutlichen Einfluss von Meereisänderungen auf atmosphärische Zirkulationsänderungen**
- ERA-Interim ist im Frühwinter deutlich gestörter
- Einfluss zusätzlicher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





# Temperatur- und Windänderungen über der Polarregion

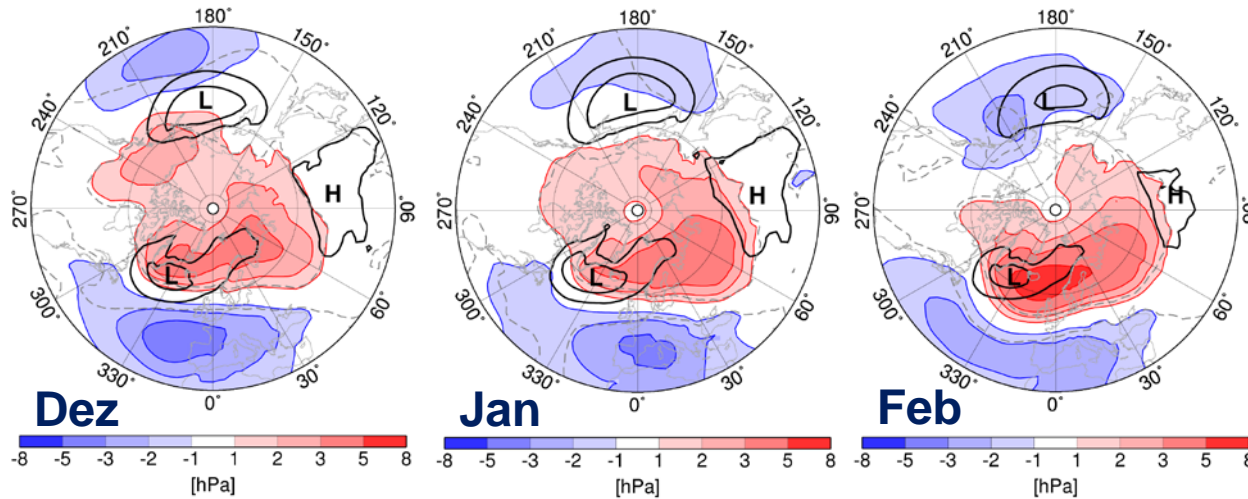
Gebietsmittel über 65°N-85°N für low minus high ice Bedingungen



- 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

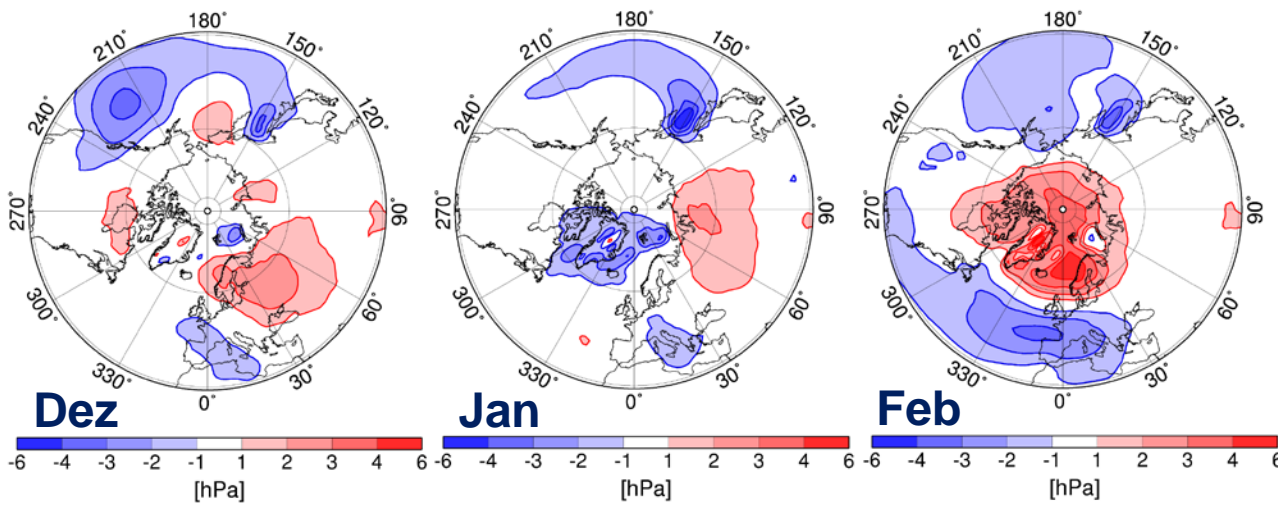
# Meereisrückgang in der Arktis und nachfolgende atmosphärische Zirkulationsänderungen

**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

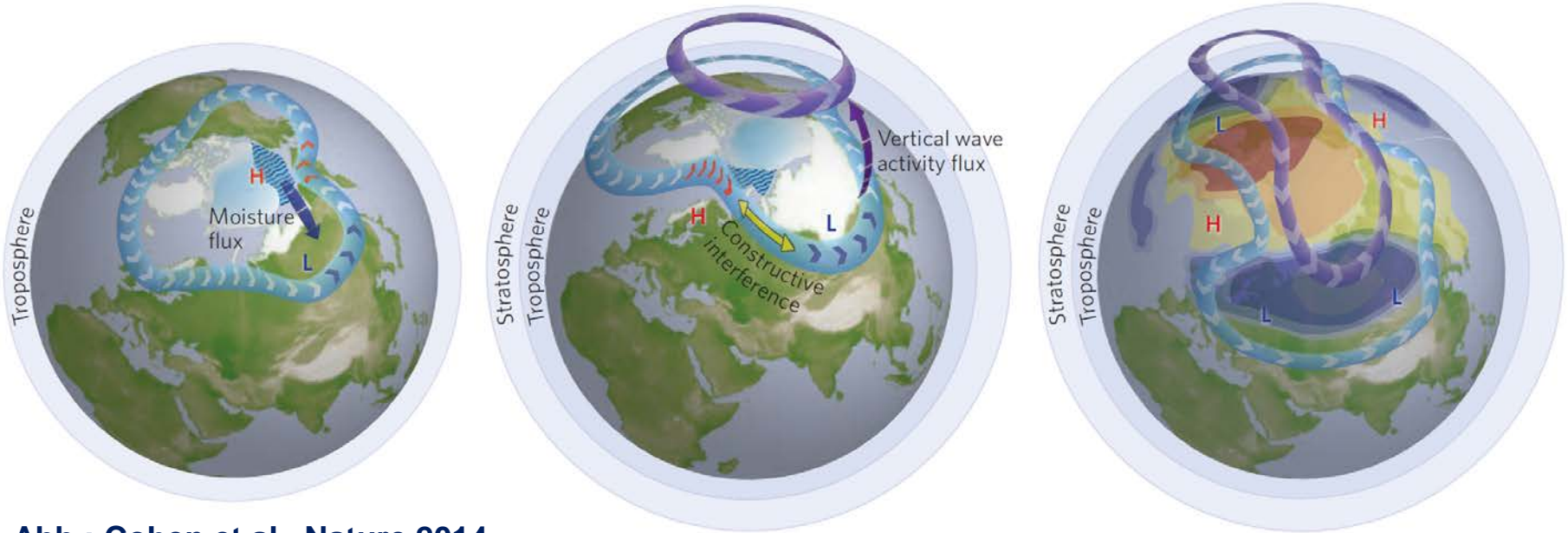


Abb.: Cohen et al., Nature 2014

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