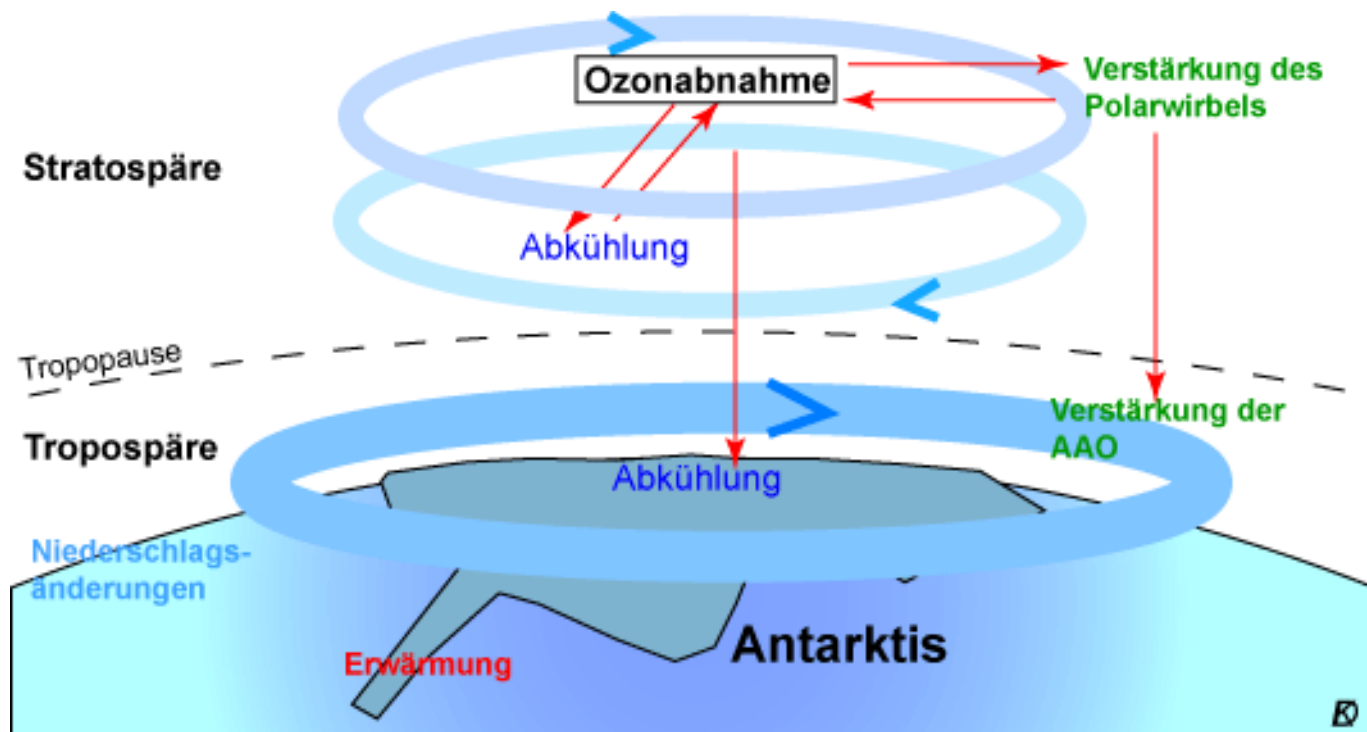


Kapitel 7

Einfluss stratosphärischer Ozonänderungen auf die Troposphäre



Kapitel 7: Gliederung

- Einleitung
- Änderungen in der Südhemisphäre
- Änderungen in der Nordhemisphäre

Einleitung

- Die Wechselwirkungen zwischen Klima (Klimaänderungen) und stratosphärischem Ozon sind komplex.
- Es lassen sich drei Aspekte unterscheiden:
 1. Einfluss troposphärischer Klimaänderungen auf die (klimatischen) Bedingungen in der Stratosphäre und in der Folge auf die Änderung der stratosphärischen Ozonkonzentration;
 2. Einfluss stratosphärischer Ozonänderungen auf das stratosphärische Klima mit Rückwirkungen auf die Ozonveränderung selbst;
 3. Einfluss stratosphärischer Ozonänderungen auf das troposphärische Klima.

zu Punkt 1:

- Die Erwärmung in den unteren Schichten der Atmosphäre durch die Emission von Treibhausgasen hat eine Abkühlung in der Stratosphäre zur Folge (siehe vorherige Kapitel).
- Diese Abkühlung fördert die Ozonzerstörung über den Polen durch die Bildung von PSC und begünstigt die (heterogene) Chlorchemie.
- Die globale Erwärmung hat außerdem Auswirkungen auf die atmosphärische Dynamik: So könnte es z.B. auf der Nordhalbkugel zu einer Veränderung der Nordatlantischen bzw. Arktischen Oszillation (NAO bzw. AO) kommen, mit entsprechenden Konsequenzen für die stratosphärische Dynamik.

zu Punkt 1:

- Auch auf der Südhalbkugel könnte durch Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation (hier der Antarkischen Oszillation AAO) die Isolation der polaren Stratosphäre über der Antarktis verändert werden.

zu Punkt 2:

- Das stratosphärische Ozon absorbiert nicht nur die kurzwellige Solarstrahlung, sondern ist darüber hinaus in der Stratosphäre wie in der Troposphäre ein Treibhausgas.
- Jede Veränderung in der Ozonmenge wirkt sich daher auch auf die Temperaturen in der Stratosphäre aus.
- Ein Ozonverlust in der Stratosphäre hat wie die Zunahme von Kohlendioxid in der Troposphäre eine Abkühlung der Stratosphäre zur Folge (siehe Kapitel 7).

zu Punkt 2:

- Dieser Abkühlungseffekt ist in der unteren Stratosphäre (in etwa 15 km Höhe) sogar stärker als der durch die Zunahme der troposphärischen Treibhausgase und wird auf $-0,5^{\circ}\text{C}$ pro Dekade geschätzt.
- In der oberen Stratosphäre spielt dagegen die Wirkung der Treibhausgase die dominierende Rolle (etwa $-0,8^{\circ}\text{C}$ pro Dekade in 20-35 km und $-2,5^{\circ}\text{C}$ pro Dekade in etwa 50 km Höhe).
- Die Abkühlung der Stratosphäre durch Ozonabnahme ist dort am größten, wo der Ozonverlust am stärksten ist, d.h. über den Polen (siehe unten).

zu Punkt 2:

- Die mittlere Temperatur in der südpolaren Stratosphäre hat während der Frühlingsmonate in etwa 18 km Höhe von 1969-1998 um etwa 6°C abgenommen.
- Diese Temperaturänderungen haben auch Auswirkungen auf die atmosphärische Dynamik.
- So ist eine deutliche Verstärkung des Polarwirbels festgestellt worden und eine Verschiebung des Zeitpunkts seines Zusammenbruchs (Umstellung auf Sommerbedingungen (siehe Kapitel 6)).
- Durch diesen positiven Rückkopplungseffekt verstärken Ozonverluste die Bedingungen für die Ozonzerstörung.

zu Punkt 3:

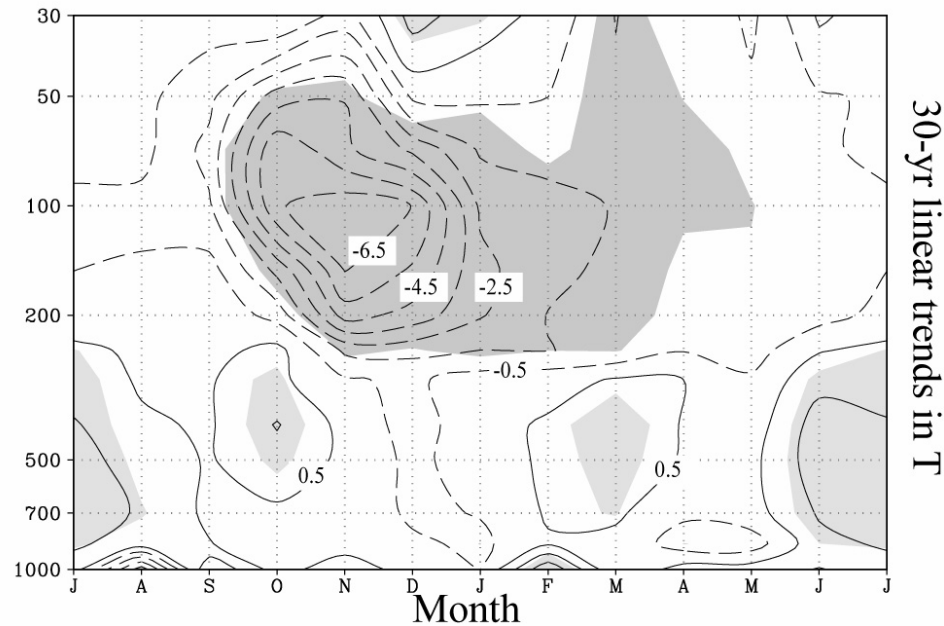
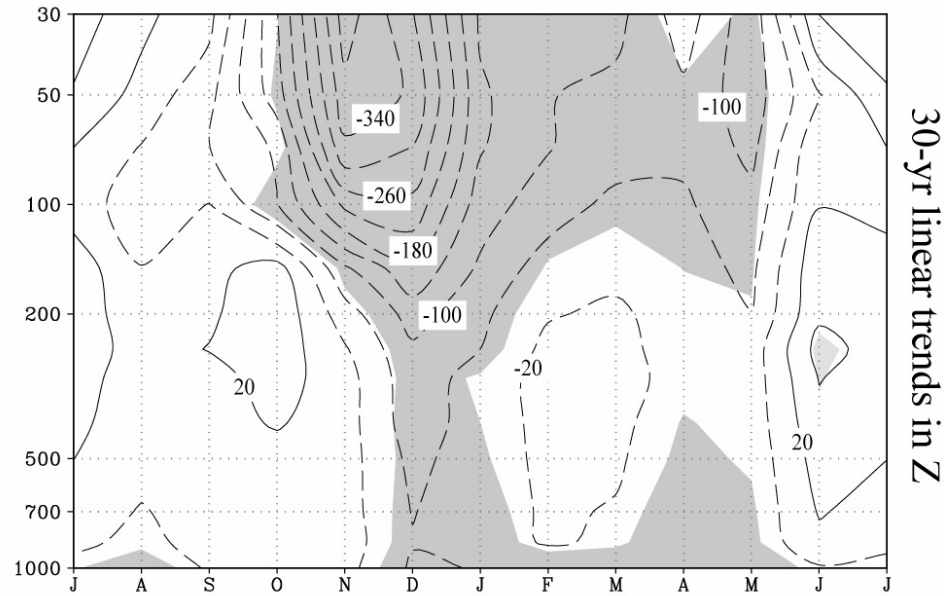
- Die stratosphärische Ozonabnahme hat in der unteren Troposphäre eine geringfügige Temperaturabnahme zur Folge.
- Zwar gelangt durch die stratosphärische Ozonabnahme etwas mehr UV-B-Strahlung (280-320 nm) in die bodennahe Luftschichten, dieser Effekt wird aber übertroffen durch die Abnahme der Wärmestrahlung aus der Stratosphäre in Richtung untere Troposphäre (wegen des Ozonverlusts).
- Während die Ozonzunahme in der Troposphäre den natürlichen Treibhauseffekt verstärkt und zur globalen Erwärmung beiträgt, verringert die Ozonabnahme in der Stratosphäre den Treibhauseffekt.

Änderungen in der Südhemisphäre

- Die stärkste stratosphärische Ozonzerstörung wird im antarktischen Frühling beobachtet. Deshalb erwartet man, dass der größte Effekt des stratosphärischen Ozonabbaus auf das troposphärische Klima dort am deutlichsten ist.
- Während man die größten Trends in der stratosphärischen Temperatur und der geopotentiellen Höhe im November beobachtet, in Übereinstimmung mit dem Bereich der maximalen Ozonzerstörung, findet man auch signifikante Abnahmen der geopotentiellen Höhe in der Troposphäre, allerdings 1 bis 2 Monate später (Thompson und Solomon, 2002; siehe nachfolgende Abbildung).

Thompson, D.W.J., und S. Solomon, Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change, *Science*, 296 (5569), 895-899, 2002.

Änderungen in der Südhemisphäre



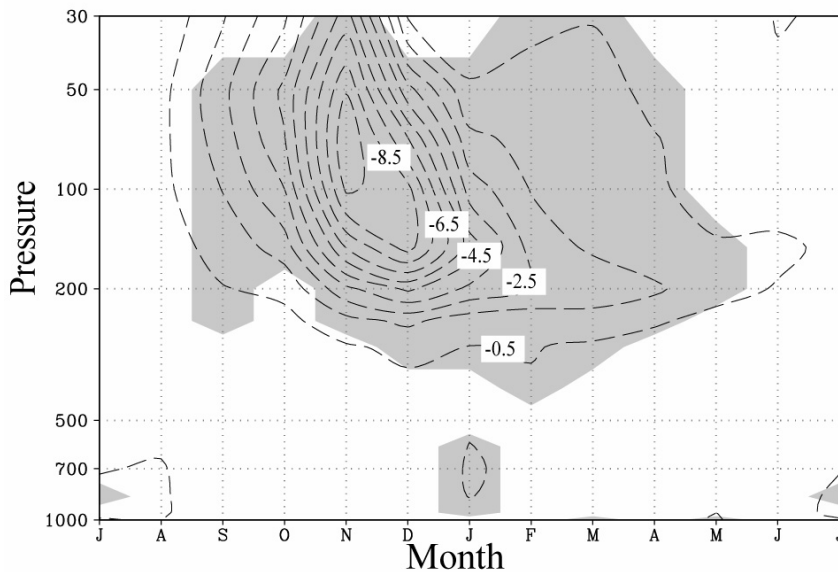
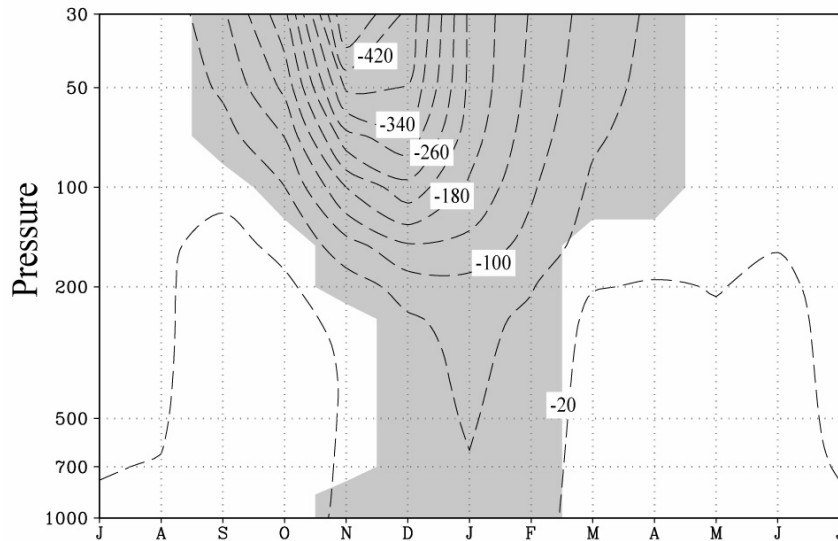
Änderungen in der Südhemisphäre

- Verschiedene Studien mit numerischen Atmosphärenmodellen haben die Reaktion der Troposphäre auf vorgegebene Änderungen des stratosphärischen Ozongehalts untersucht.
- Beispiel: Gillett und Thompson (2003) simulierten eine signifikante Reaktion der troposphärischen geopotentiellen Höhe auf vorgeschriebene Änderungen der stratosphärischen Ozonkonzentration, wobei die Treibhausgaskonzentrationen nicht verändert wurden (siehe nachfolgende Abbildung).

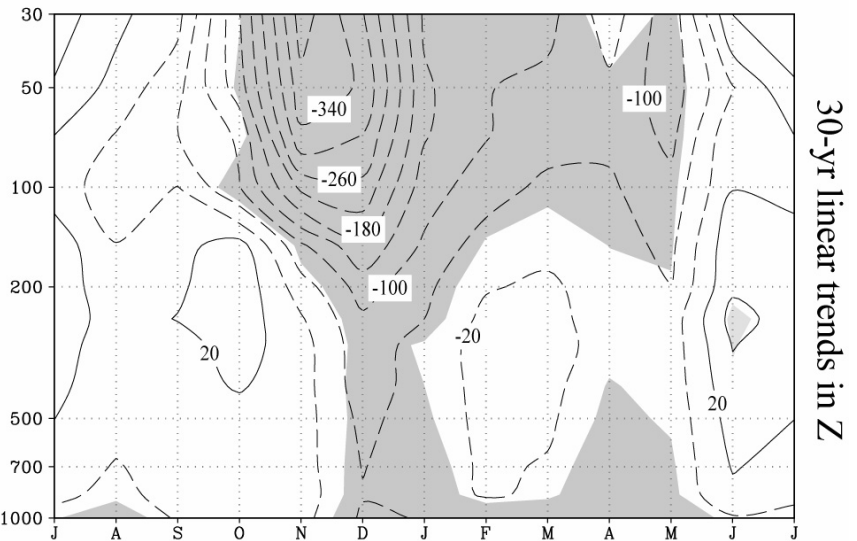
Gillett, N.P., und D.W.J. Thompson, Simulation of recent Southern Hemisphere climate change, *Science*, 302 (5643), 273-275, 2003.

Änderungen in der Südhemisphäre

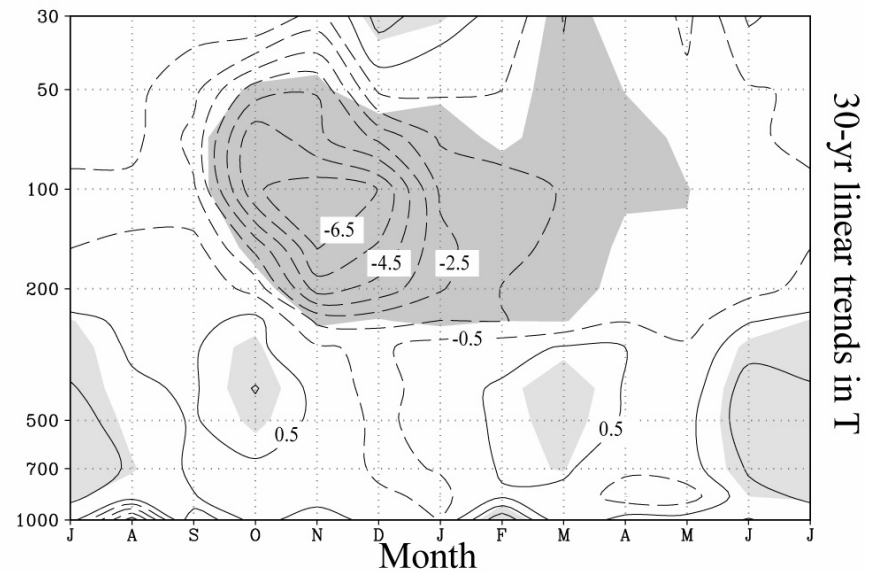
Model



Observations
(from Thompson and Solomon 2002)



30-yr linear trends in Z



30-yr linear trends in T

Änderungen in der Südhemisphäre

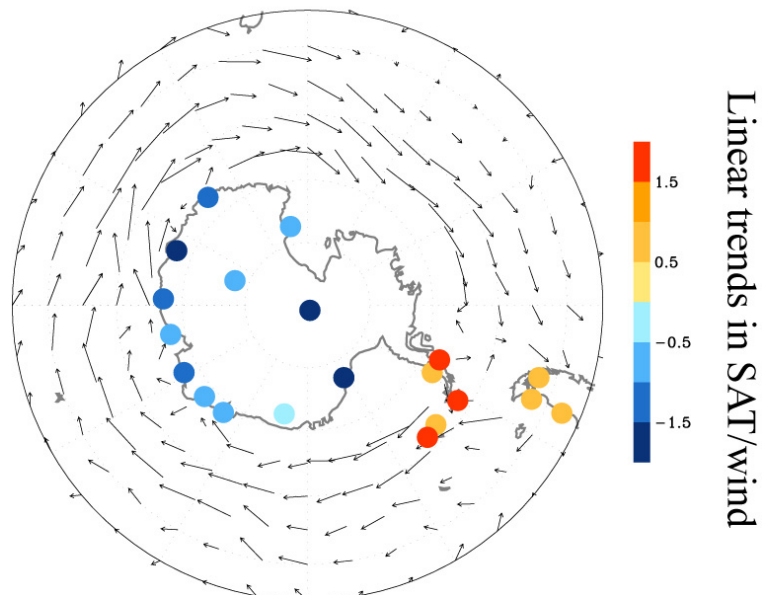
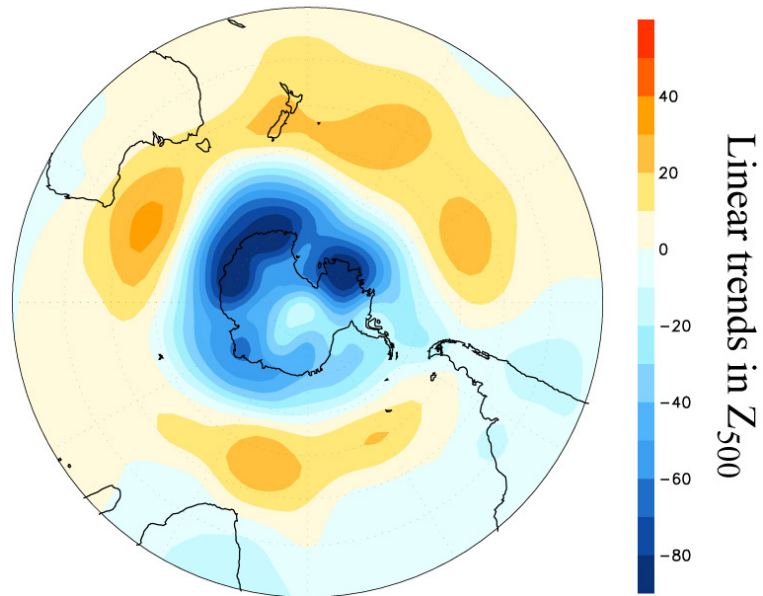
- Die simulierten und beobachteten Änderungen der geopotentiellen Höhe stimmen in Größe und Jahresgang gut überein.
- Dies stützt die Vermutung, dass die beobachteten Trends im Wesentlichen durch die stratosphärische Ozonzerstörung verursacht werden.

Änderungen in der Südhemisphäre

- Ferner wurde beobachtet:
 - eine Abkühlung der Oberfläche von etwa 1 K im Inneren des antarktischen Kontinents;
 - eine Erwärmung der antarktischen Halbinsel, der schottischen See und der südlichsten Spitze von Südamerika.

(Thompson and Solomon, 2002; siehe Abbildung).

Änderungen in der Südhemisphäre



Änderungen in der Südhemisphäre

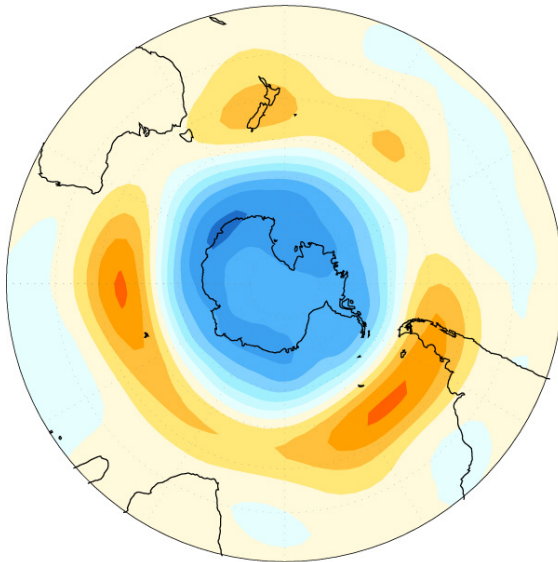
- Ein ähnliches Muster der Erwärmung und Abkühlung der bodennahen Schichten wurde auch als Reaktion auf die stratosphärische Ozonzerstörung simuliert (Gillett und Thompson, 2003; siehe Abbildung) und auch als kombinierter Effekt der stratosphärischen Ozonzerstörung und dem Anstieg der Treibhausgas-konzentrationen (Shindell und Schmidt, 2004; Arblaster und Meehl, 2006).

Shindell, D.T., und G.A. Schmidt, Southern Hemisphere climate response to ozone changes and greenhouse gas increases, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18209, doi: 10.1029/2004GL020724, 2004.

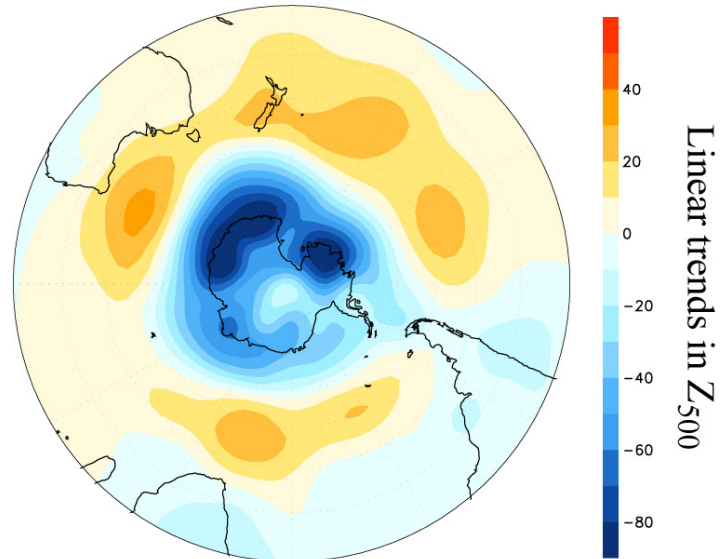
Arblaster, J.M., und G.A. Meehl, Contributions of external forcings to Southern Annular Mode trends, *J. Clim.*, 19, 2896-2905, 2006.

Änderungen in der Südhemisphäre

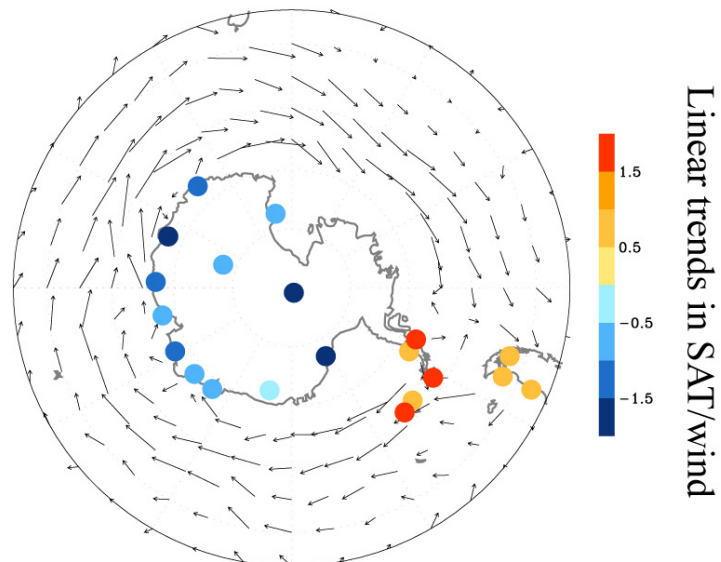
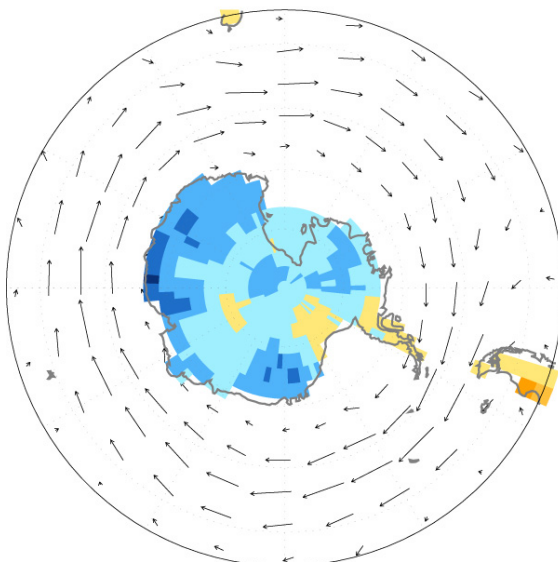
Model



Observations
(from Thompson and Solomon 2002)



Linear trends in Z₅₀₀



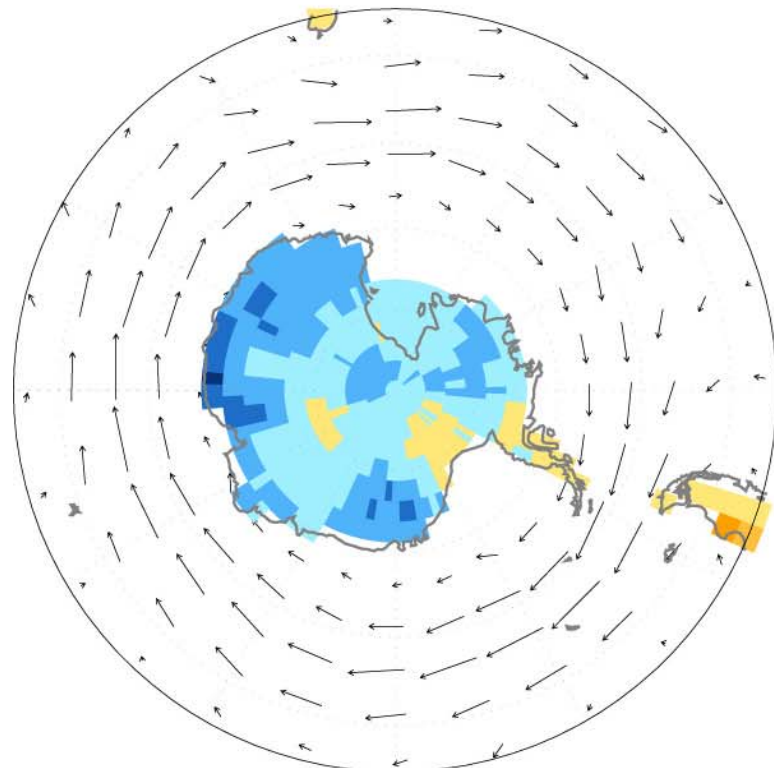
Linear trends in SAT/wind

Änderungen in der Südhemisphäre

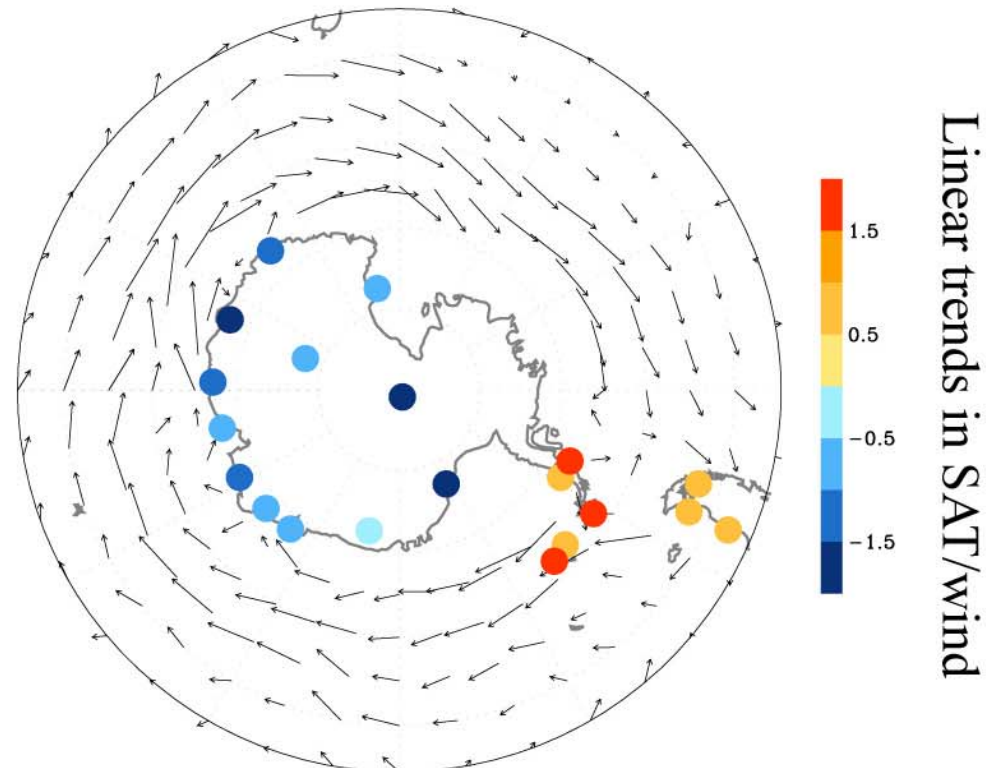
- Thompson und Solomon (2002) identifizierten darüber hinaus eine damit im Zusammenhang stehende Verstärkung der Westwinde über dem südlichen Ozean, entsprechend einer Verlagerung der Zugbahn der Tiefdruckgebiete in Richtung Südpol.
- Dies wurde ebenfalls als Reaktion auf die stratosphärische Ozonzerstörung nachsimuliert (Gillett und Thompson, 2003; Shindell und Schmidt, 2004; siehe auch nachfolgende Abbildung).
- Simulierte und beobachtete Windänderungen haben die Größenordnung von 1 m/s und werden bis etwa 30°S gefunden (Gillett und Thompson, 2003).

Änderungen in der Südhemisphäre

Model



Observations
(from Thompson and Solomon 2002)



Die längsten Vektoren entsprechen einer Änderung der Windgeschwindigkeit von etwa 4m/s.

Änderungen in der Südhemisphäre

- Die stratosphärische Ozonzerstörung beeinflusst das troposphärische Klima sowohl über Strahlungs- als auch über dynamische Prozesse.
- Die troposphärische Reaktion auf stratosphärische Störungen (Veränderungen) kann sich direkt durch die (planetare) Wellenaktivität und den Strahlungsantrieb in der Stratosphäre ergeben (Thompson et al., 2006; siehe auch Kapitel 3), obwohl diese direkten Antriebsmechanismen die breitenabhängige Struktur der troposphärischen Reaktion nicht erklären kann.

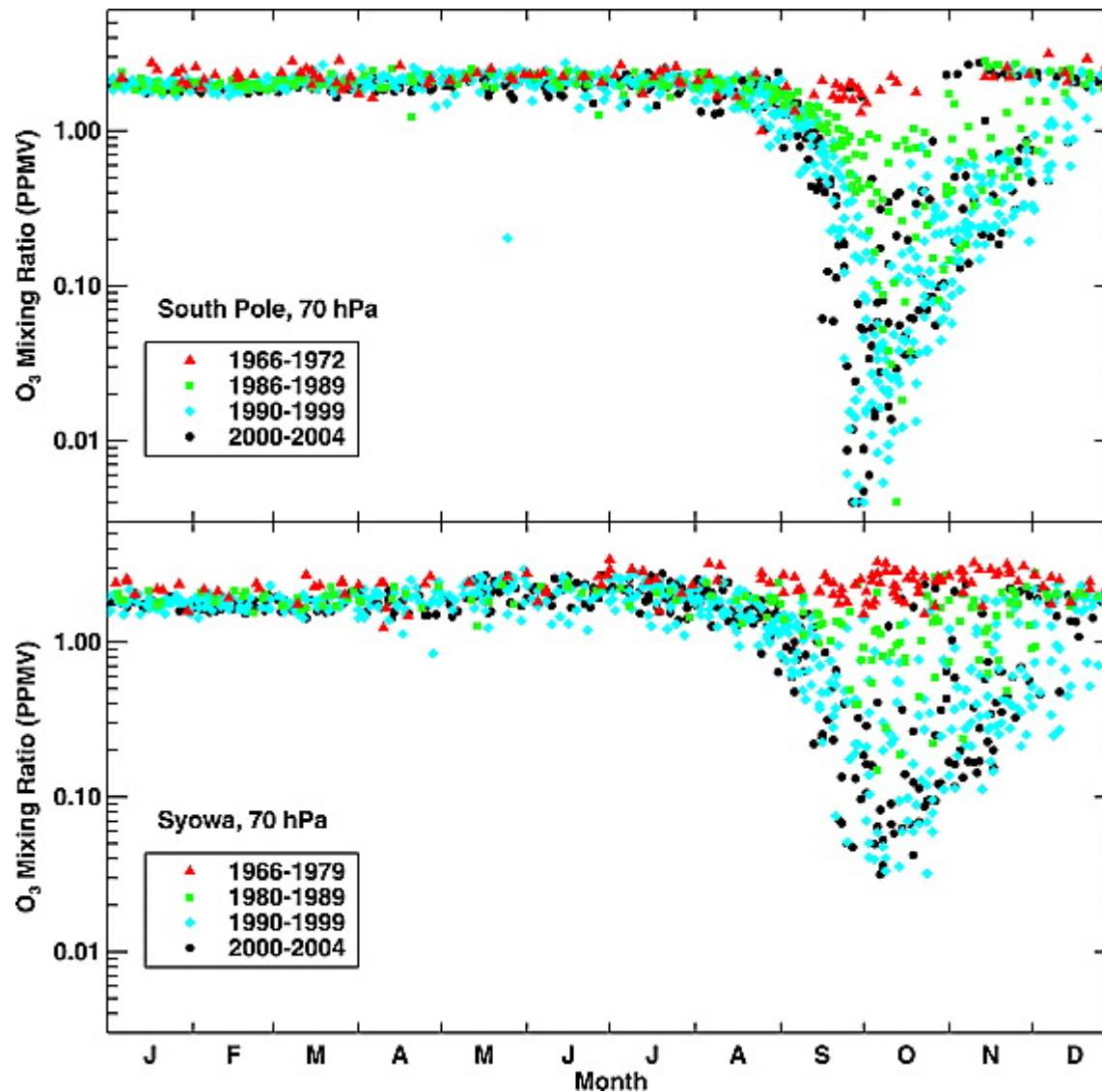
Thompson, D.W.J., J.C. Furtado, und T.G. Shepherd, On the tropospheric response to anomalous stratospheric wave drag and radiative heating, *J. Atmos. Sci.*, 63 (10), 2616-2629, 2006.

Änderungen in der Südhemisphäre

- Die Ozonzerstörung in der antarktischen Stratosphäre führt zu einer direkten strahlungsbedingten Abkühlungseffekt der Oberfläche (siehe oben und Kapitel 2).
- Maximale Ozonzerstörung nahe der Tropopause findet von Dezember bis Januar statt, über einen Monat nach dem stärksten Ozonabbau in 70 hPa (etwa 18 km).
- Diese Verzögerung ist durch den Abwärtstransport der ozonarmen Luftmassen verursacht (Solomon et al., 2005).

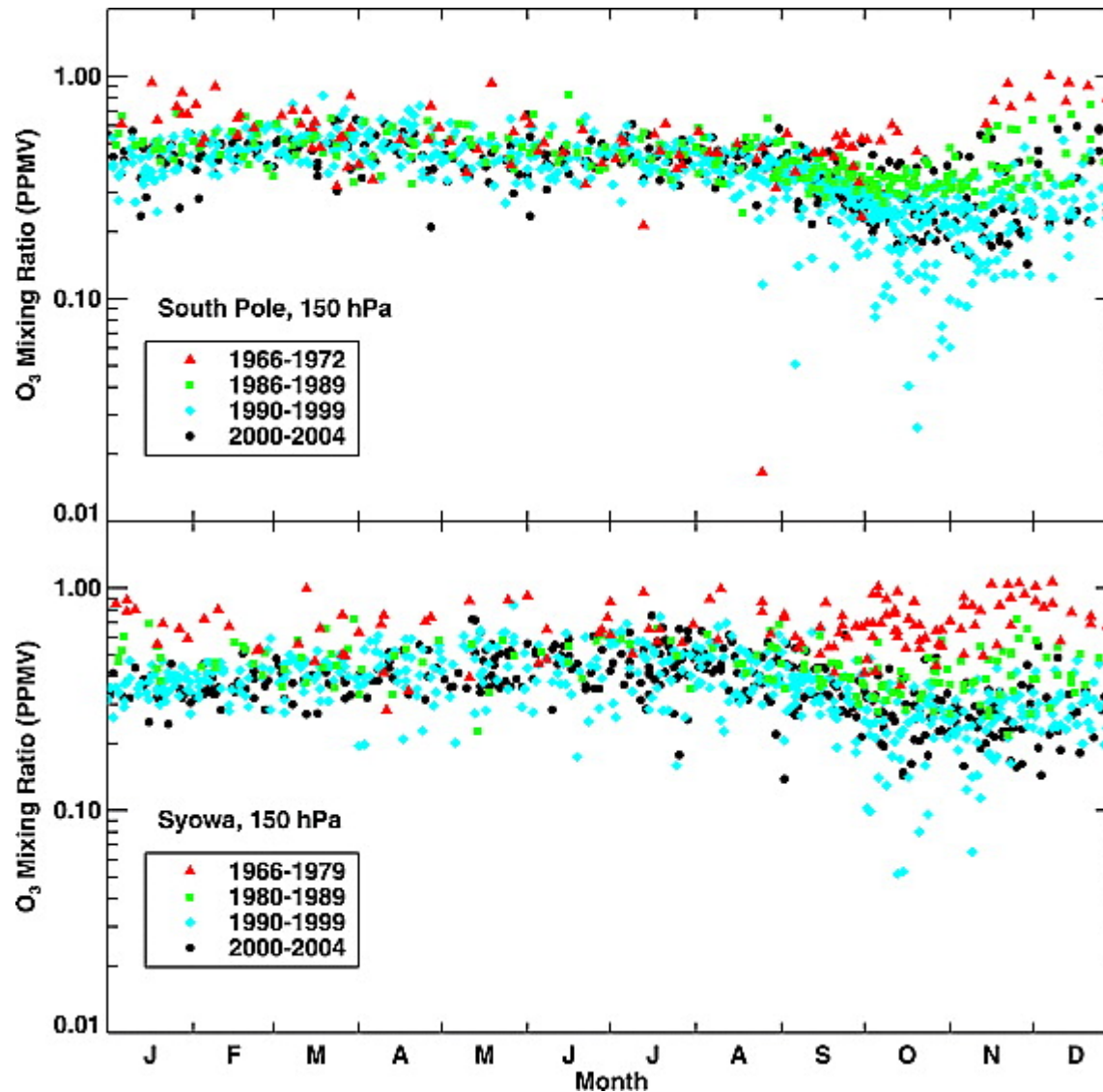
Solomon, S., R.W. Portmann, T. Sasaki, D.J. Hofman, und D.W.J. Thompson, Four decades of ozonesonde measurements over Antarctica, *J. Geophys. Res.*, *110*, D21311, doi: 10.1029/2005JD005917, 2005.

Änderungen in der Südhemisphäre



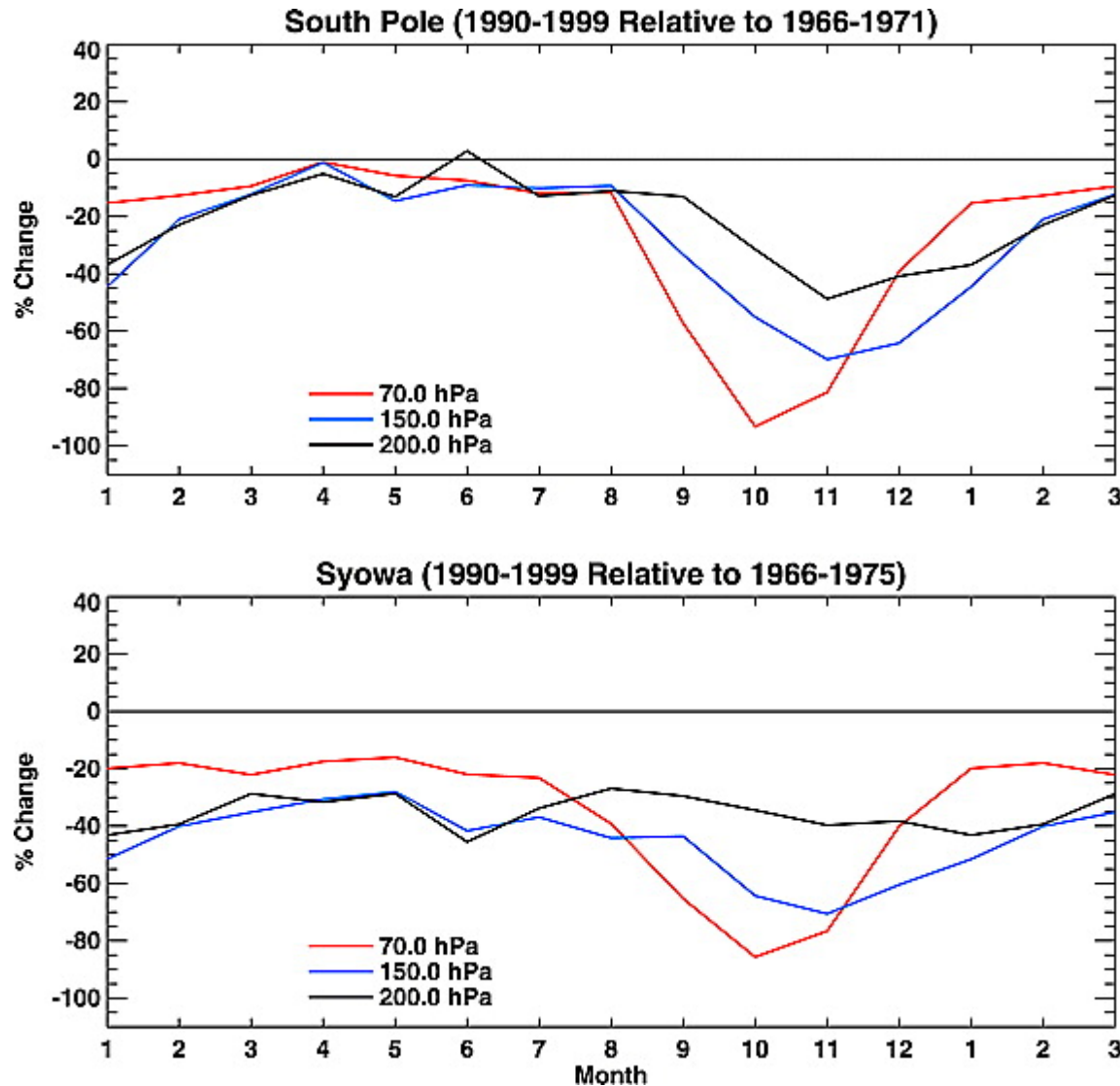
Observations of ozone mixing ratios at 70 hPa (about 18 km) over Antarctica throughout the year.

Änderungen in der Südhemisphäre



Observations of ozone mixing ratios at 150 hPa (about 13 km) over Antarctica throughout the year.

Änderungen in der Südhemisphäre



Percent changes in ozone for the 1990s relative to 1966–1975 for (top) South Pole and (bottom) Syowa by month at 70, 150, and 200 hPa.

Änderungen in der Südhemisphäre

- Da die Bodentemperatur besonders empfindlich auf Änderungen der Ozonkonzentration nahe der Tropopause ist (Forster und Shine, 1997; siehe Kapitel 2), spricht dies dafür, dass die Abkühlung der bodennahen Schichten strahlungsbedingt ist.
- Die offensichtliche Verzögerung zwischen stratosphärischer und troposphärischer Reaktion ist eher durch den abwärts gerichteten Transport ozonarmer Luft bedingt, als durch irgendwelche dynamischen Effekte.

Forster, P.M. de F., und K.P. Shine, Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone changes, *J. Geophys. Res.*, 102 (D9), 10841-10855, 1997.

Änderungen in der Südhemisphäre

- Die meisten Studien zeigen, dass die größte Ozonzerstörung über der Antarktis in diesem Jahrzehnt (bis 2010) geschieht und sich die Ozonschicht innerhalb der nächsten 50 Jahre vollständig regeneriert (z.B. Eyring et al., 2007).

Eyring, V., et al., Multi-model projections of stratospheric ozone in the 21st century, *J. Geophys. Res.*, *112*, D16303, doi:10.1029/2006JD008332, 2007.

Änderungen in der Südhemisphäre

- Aus diesem Grund sollten sich die daraus ergebenden Konsequenzen für die Troposphäre in den kommenden Jahrzehnten wieder entsprechend reduzieren. Dennoch kann ein weiteres Ansteigen der Treibhausgaskonzentrationen einen genau entgegen gesetzten Effekt haben.
- Die Änderungen und Auswirkungen in der Zukunft sind bisher unklar.

Änderungen in der Nordhemisphäre

- Stratosphärische Ozonzerstörung hat auch auf der Nordhemisphäre stattgefunden.
- Die Abkühlung des arktischen Polarwirbels fiel jedoch schwächer aus mit maximalen Werten im Frühling, obwohl Modellstudien zeigen, dass nur eine Teil der beobachteten Abkühlung in der nördlichen Stratosphäre durch Ozonzerstörung erklärt werden kann.
- Einige Studien legen nahe, dass die Ozonzerstörung zu dem beobachteten Trend hin zu einer positiven Phase der NAO oder NAM beigetragen haben (siehe auch Kapitel 3).

Änderungen in der Nordhemisphäre

- So wurde zum Beispiel in Modellsimulationen gefunden, dass die Ozonänderungen einen kleinen Betrag hin zu einer positiven Phase der NAM liefern.
- Dieser Effekt ist allerdings deutlich kleiner als der durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen oder der wirklich beobachtete Effekt (Graf et al., 1998; Shindell et al., 2001).

Graf, H.F., I. Kirchner, und J. Perlwitz, Changing lower stratospheric circulation: The role of ozone and greenhouse gases, *J. Geophys. Res.*, 103 (D10), 11251-11261, 1998.

Shindell, D.T., G.A. Schmidt, R.L. Miller, und D. Rind, Northern Hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone solar and volcanic forcing, *J. Geophys. Res.*, 106 (D7), 7193-7210, 2001.

Änderungen in der Nordhemisphäre

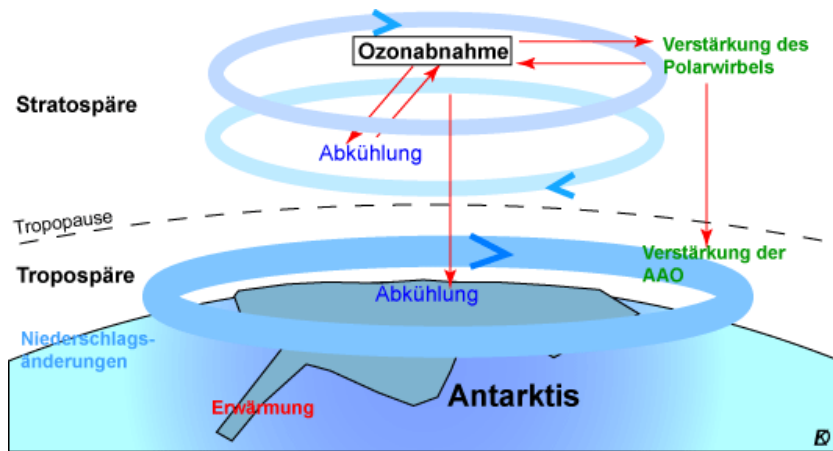
- Zu beachten ist dennoch, dass während die stärkste Reaktion auf die stratosphärische Ozonzerstörung in den Frühlingsmonaten simuliert wird (Graf et al., 1998) die stärksten Trends in den Wintermonaten beobachtet wurden (Thompson et al., 2000), also zu dem Zeitpunkt, wenn keine signifikanten Reaktionen auf die Ozonzerstörung simuliert werden (Gillett et al., 2003; Gillett, 2005).

Gillett, N.P., M.R. Allen, and K.D. Williams, Modelling the atmospheric response to doubled CO₂ and depleted stratospheric ozone using a stratosphere-resolving coupled GCM, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 129 (589), 947-966, 2003.

Gillett, N.P., Northern Hemisphere circulation, *Nature*, 437 (7058), 496, 2005.

Änderungen in der Nordhemisphäre

- Zusammengefasst kann gesagt werden, dass, basierend auf theoretischen Abschätzungen und Modellsimulationen, die Ozonzerstörung im arktischen Bereich sehr wahrscheinlich einen Teil zum schwachen (positiven) Trend der NAM im Frühling beigetragen hat, dass aber die beobachteten Wintertrends bislang nicht zufriedenstellend erklärt werden können.



Ende Kapitel 7