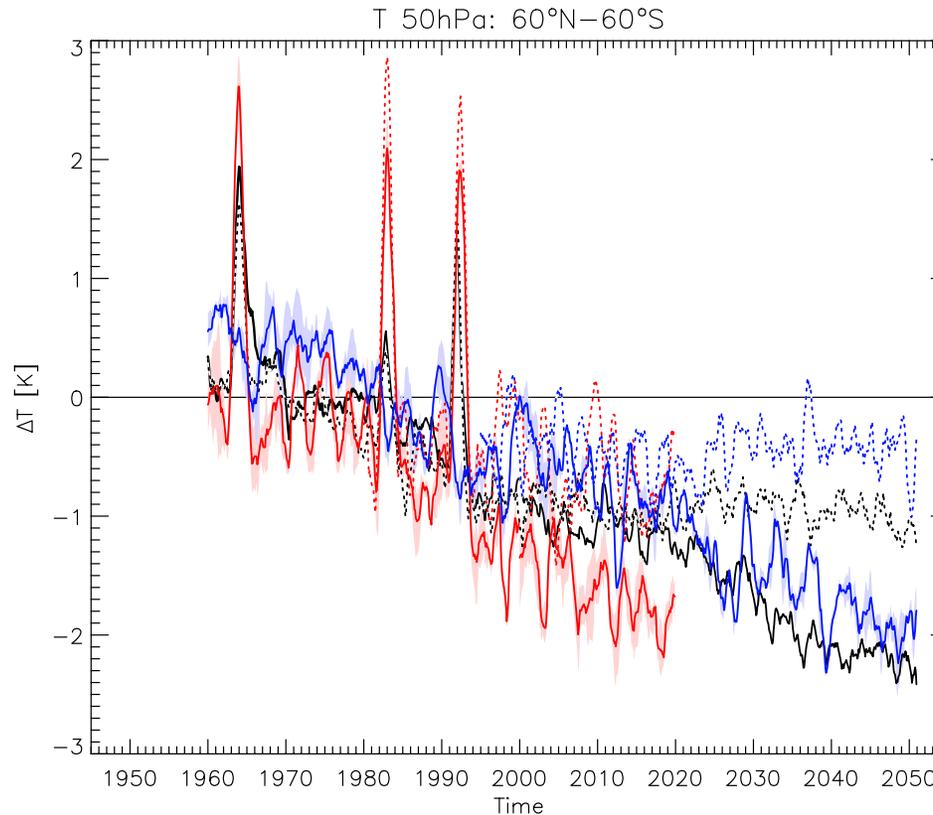


Kapitel 14

Einfluss des Klimawandels auf die Erholung der Ozonschicht



Kapitel 14: Gliederung

- Einleitung
- Frühere Ergebnisse
- Neue Simulationen und Ergebnisse
- Interpretation und Erklärungsversuche

Einleitung

- Wie in den vorherigen Kapiteln diskutiert, hängt die langzeitliche Entwicklung der stratosphärischen Ozonkonzentration nicht nur von der Änderung vieler stratosphärischer Bestandteile ab (einschließlich der Ozon zerstörenden Substanzen (ODSs), Treibhausgase (GHGs), Wasserdampf und Aerosole), sondern auch von Veränderungen des Klimas in der Troposphäre und Stratosphäre verursacht durch natürliche und anthropogene Antriebe.
- Die in den kommenden Jahren und Jahrzehnten erwartete Erholung der Ozonschicht durch die Reduktion der ODSs könnte durch Temperaturänderungen (siehe Kapitel 13) und Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung und den Transport modifiziert werden (siehe Kapitel 10 bis 12).

Frühere Ergebnisse

- In diesem Kapitel werden Ergebnisse von Sensitivitätsstudien mittels CCMs diskutiert mit dem Ziel, eine Abschätzung darüber zu bekommen, wie der Klimawandel die Bildungs- und Zerstörungsprozesse der zukünftigen Ozonschicht beeinflussen kann.
- Frühere Ozonberichte (Sektion 12.2.1.3 in WMO, 1999; Sektion 4.8 in WMO, 2003) zeigten Ergebnisse von 2D Modellstudien (Ensembles), die die zukünftige Entwicklung der Ozonschicht bis 2050 berechneten.
- In einigen Modellen blieb der Mittelwert für den Bereich 60°N-60°S (engl. near-global mean) bis zu etwa 1% unterhalb der Werte für 1980 (bis 2050), während andere Modelle in 2050 um bis zu 3.5% höhere Werte als 1980 zeigten.

Frühere Ergebnisse

- Einige der 2D Modelle berücksichtigten nicht den Abkühlungseffekt in der Stratosphäre durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen.
- Vor allem in der mittleren und oberen Stratosphäre führen Temperaturänderungen zu anderen Reaktionsraten, die den O_x Gehalt bestimmen.
- Darüber hinaus werden in der polaren unteren Stratosphäre die Chlor- und Brom-haltigen Reservoirsubstanzen über heterogene Prozesse auf Wolken- und kalten Wolkenaerosolteilchen aktiviert (siehe Kapitel 13).

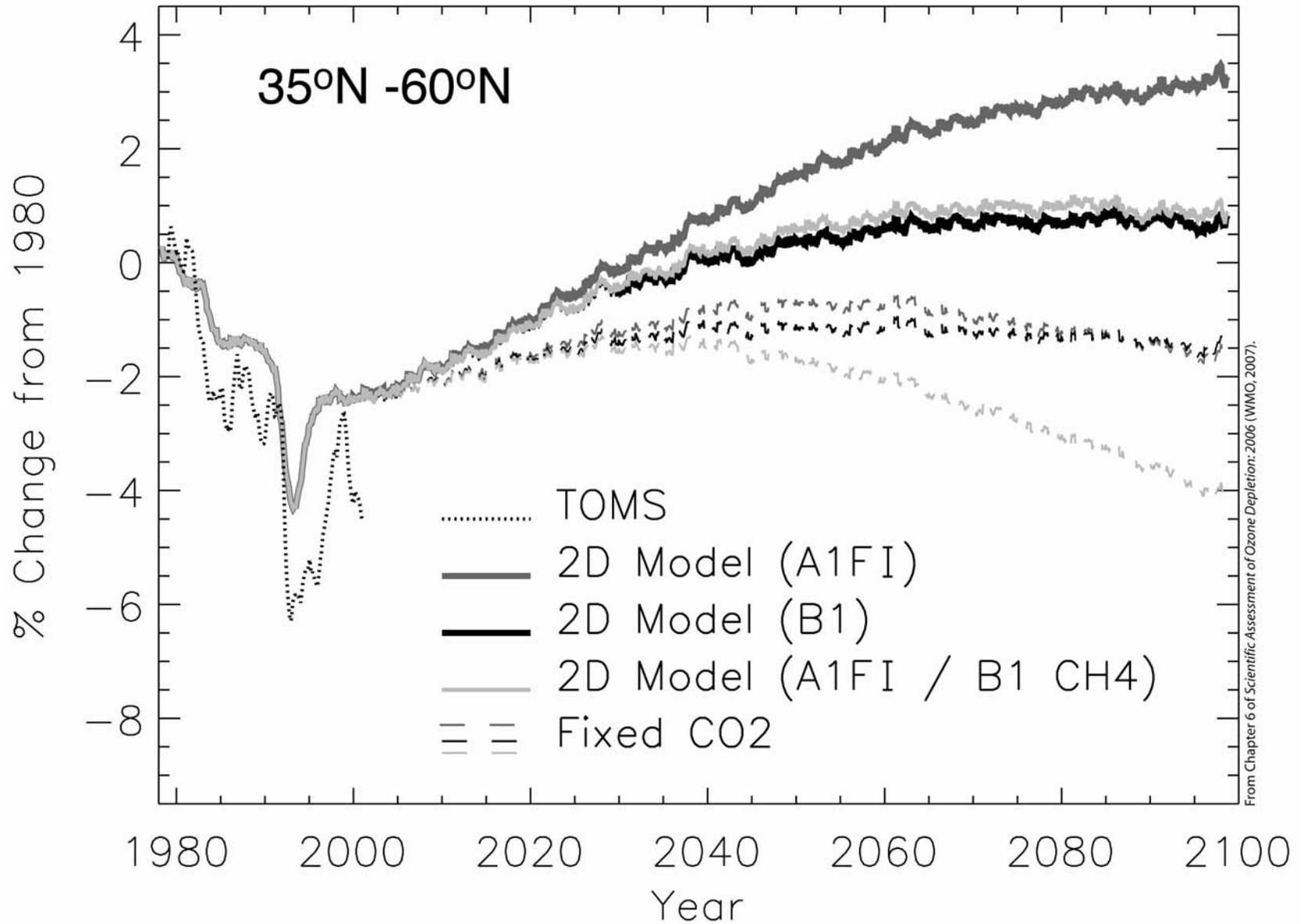
Frühere Ergebnisse

- Beispiel: In den 2D Modellen von Rosenfield et al. (2002) sowie Chipperfield und Feng (2003) erholt sich die Ozonschicht, bezogen auf das Jahr 1980, in vielen Bereichen um 10 bis 20 Jahre schneller, wenn die Abkühlung der Stratosphäre durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen berücksichtigt wird (siehe Abbildung).

Rosenfield, J.E., A.R. Douglass, und D.B. Considine, The impact of increasing carbon dioxide on ozone recovery, *J. Geophys. Res.*, 107 (D6), 4049, doi: 10.1029/2001JD000824, 2002.

Chipperfield, M.P., und W. Feng, Comment on: Stratospheric Ozone Depletion at northern mid-latitudes in the 21st century: The importance of future concentrations of greenhouse gases nitrous oxide and methane, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (7), 1389, doi: 10.1029/2002GL016353, 2003.

Frühere Ergebnisse



Frühere Ergebnisse

- Die 2D Modellstudien zeigen, dass die zukünftige Entwicklung der Ozonschicht abhängt von der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre **und** dem Klima.
- Obwohl einige 2D Modelle auch Veränderungen in der Dynamik der Stratosphäre berücksichtigen, beachten sie nicht die Variabilität der troposphärischen Wellenanregung durch Klimaänderungen und den daraus resultierenden möglichen Einfluss auf die Stratosphäre (siehe Kapitel 3 und 9).
- Ein anderer Schwachpunkt von 2D Modellen ist, dass sie für Untersuchungen der Polarregionen nur schlecht geeignet sind (WMO, 2003).

Frühere Ergebnisse

- Heutzutage ermöglichen Studien mit CCMs bessere Möglichkeiten den Einfluss des Klimas auf Ozon weitergehend zu untersuchen, da diese Modelle die Rückkopplungen von Strahlungseffekten, der Dynamik und chemischer Prozesse berücksichtigen.
- Die nachfolgende Diskussion zeigt einige wichtige Ergebnisse von CCM Studien; diese Modelle wurden dazu eingesetzt, die vergangene und zukünftige Entwicklung der Ozonschicht zu berechnen .
- Mittels von zusätzlichen Sensitivitätsstudien (z.B. ein “no climate change” Szenario, NCC) wurde versucht, den Einfluss eines sich nicht verändernden Klimas auf die Erholung der Ozonschicht darzustellen.

Neue Simulationen und Ergebnisse

- Die Ergebnisse von solchen Sensitivitätsstudien mit Modellen stellen nützliche und ergänzende Informationen zur Verfügung, um die erwartete Entwicklung der Ozonschicht im 21. Jahrhundert besser zu verstehen.
- Drei CCMs (E39C, ULAQ, WACCM) wurden für langzeitliche Simulationen (bis 2050) verwendet, wobei die Konzentrationen der gut durchmischten Treibhausgase (CO_2 , CH_4 und N_2O) nach einem bestimmten Termin konstant gehalten wurden (z.B. in E39C: 1980), wohingegen sich die Entwicklung der atmosphärischen Chlor- (bzw. Brom-) beladung nach dem “Ab” Szenario der WMO (2003) richtet.

Neue Simulationen und Ergebnisse

- Zusätzlich werden die Meeresoberflächentemperaturen (engl. sea surface temperatures, SSTs) anhand von Beobachtungen der Jahre 1970 bis 1979 vorge-schrieben.
- Dieser SST Datensatz wurde immer wieder für jede der nachfolgenden Jahrzehnte in den Modellsimula-tionen verwendet (z.B. E39C: 1980 bis 2020).
- Diese Methode, die SSTs in den NCC Simulationen vorzugeben, ist eine Vereinfachung, aber für diese Art von Sensitivitätsstudie durchaus angemessen.
- In der Realität müsste das thermische Innere (*inertia*) der Ozeane berücksichtigt werden.

Neue Simulationen und Ergebnisse

- Ein Deckschichtozeanmodell benötigt etwa 20 bis 30 Jahre, um ein neues Gleichgewicht zu erreichen, ein Modell des tiefen Ozeans einige hundert Jahre (z.B. Hansen et al., 2005).

Hansen, J., M., et al., Efficacy of climate forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104, doi: 10.1029/2005JD005776, 2005.

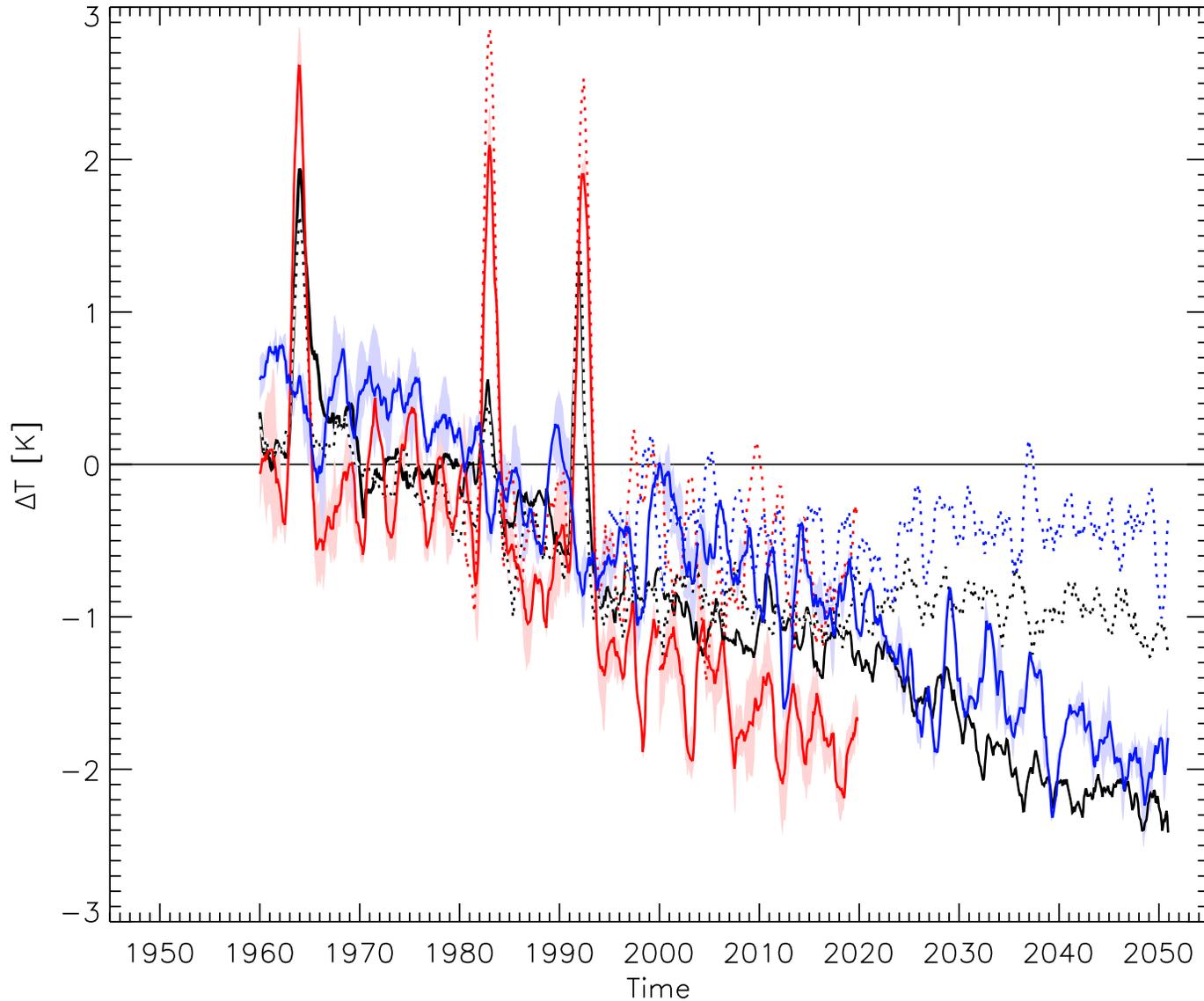
- Für diese Art von Sensitivitätsstudie ist die Vernachlässigung dieses Effektes klein.
- In allen drei CCMs ist Ozon und Wasserdampf eine prognostische Variable, d.h. die Strahlungsrückkopplung von Ozon- und Wasserdampfänderungen ist berücksichtigt.

Neue Simulationen und Ergebnisse

- Ein direkter Vergleich der Ergebnisse der NCC Simulationen mit denen der Referenzsimulationen (die die vergangenen und zukünftigen Änderungen realitätsnah beschreiben, d.h. REF1 und REF2/SCN2) erlauben eine qualitative Bewertung des zukünftigen Einflusses des Klimas auf die Ozonschicht.
- Die nachfolgende Abbildung zeigt die mittlere Temperaturabweichung in der unteren Stratosphäre von 60°N bis 60°S in 50 hPa.

Neue Simulationen und Ergebnisse

T 50hPa: 60°N–60°S

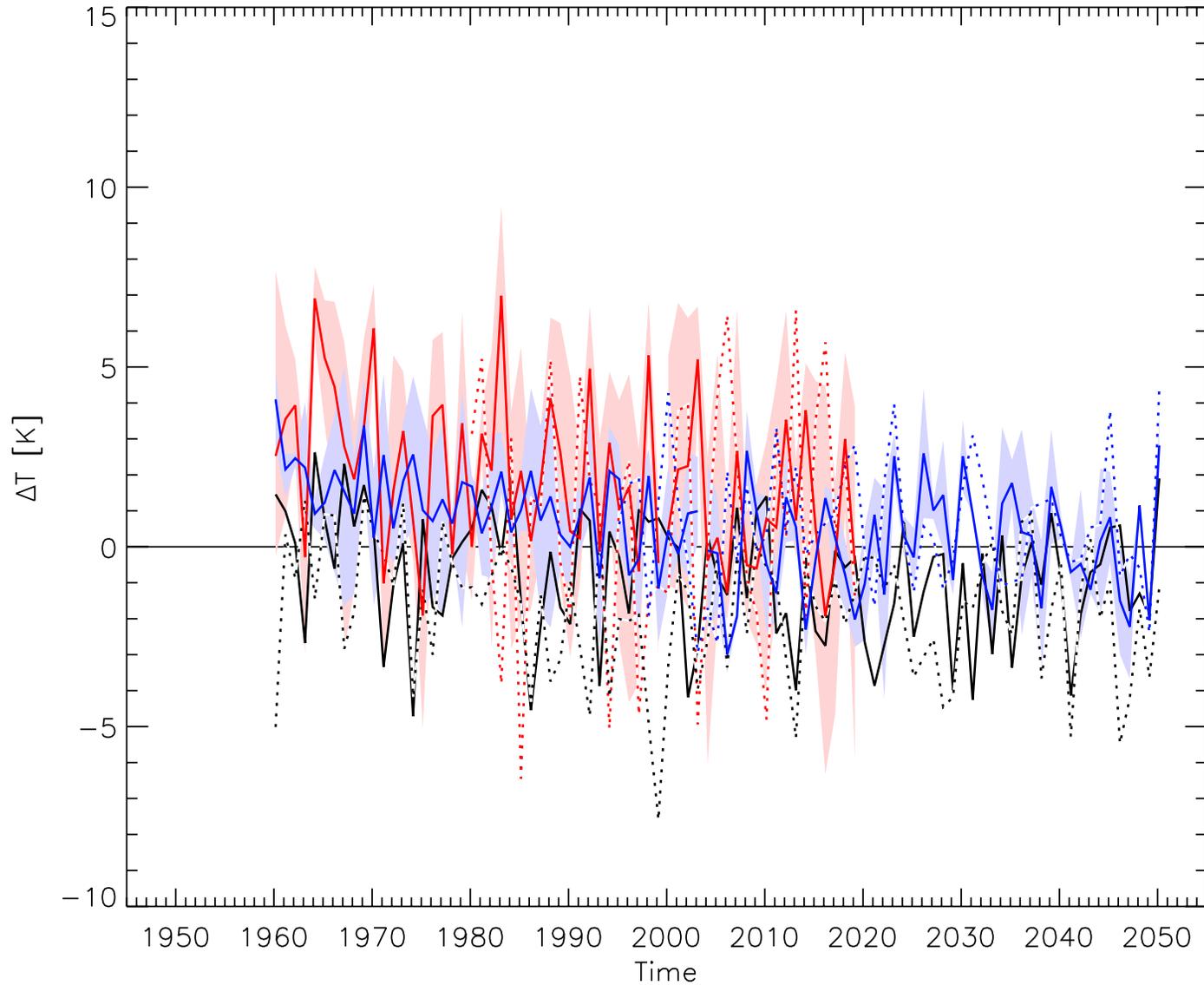


Neue Simulationen und Ergebnisse

- Die Ergebnisse der Referenzsimulationen zeigen einen klaren Abkühlungstrend aufgrund der ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen (siehe Kapitel 8).
- Nahezu kein Trend wird in allen drei CCM Simulationen mit konstanten Treibhausgaskonzentrationen gefunden.
- Es werden etwa 20 Jahre benötigt, damit zwischen den Kurvenpaaren der Referenz- und der NCC Simulation Unterschiede erkannt werden.
- Diese Aussage gilt nicht für die mittleren Temperaturabweichungen über der nordpolaren Region (in 50 hPa, 60°-90°N, nächste Abbildung), wo keine statistisch signifikanten Unterschiede gefunden werden.

Neue Simulationen und Ergebnisse

T 50hPa: 90°N–60°N

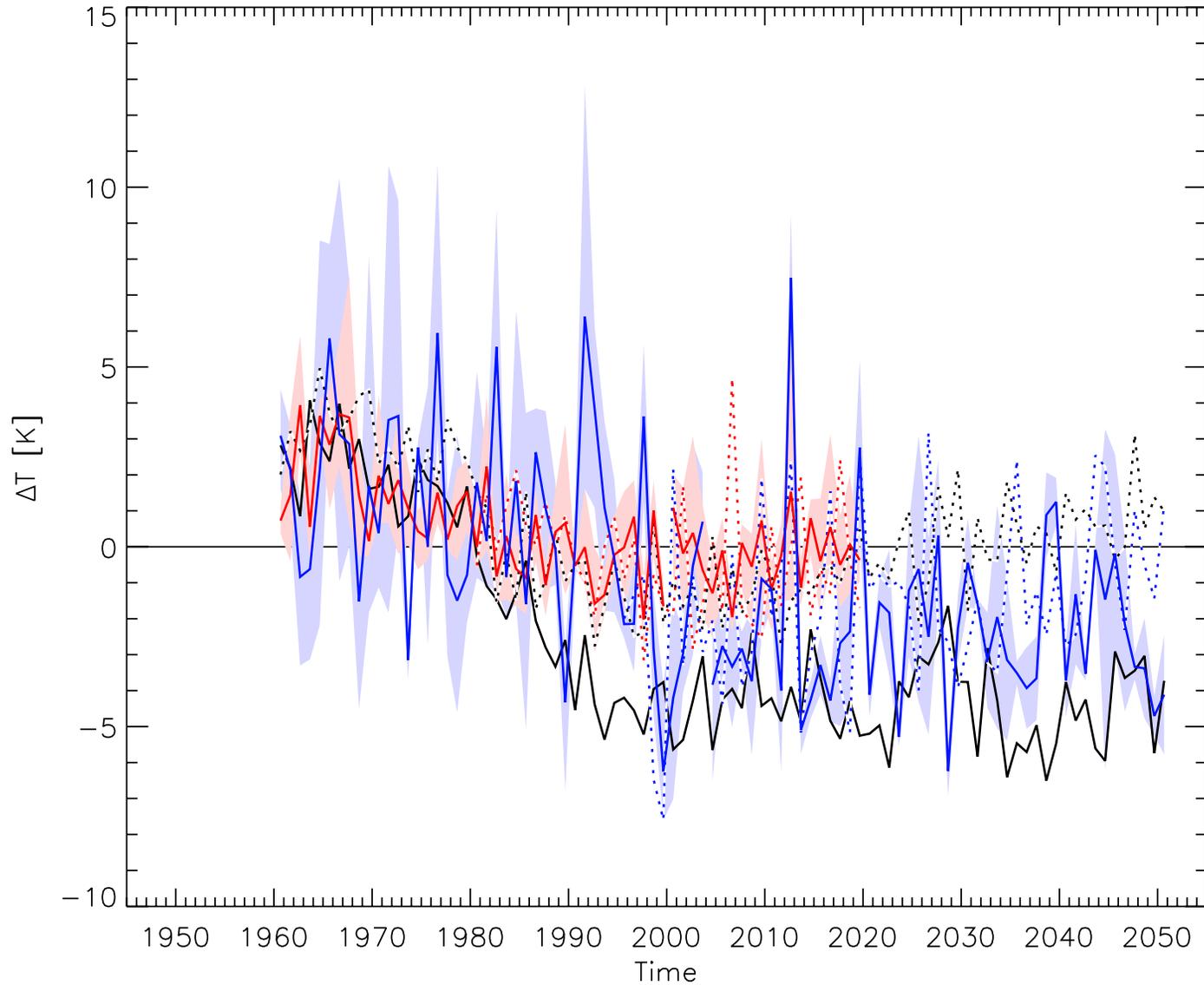


Neue Simulationen und Ergebnisse

- Unklar ist das Ergebnis auch in der südpolaren Region (50 hPa, 60°-90°S, nächste Abbildung).
- E39C zeigt keine offensichtlichen Unterschiede zwischen den beiden Simulationen, wogegen die WACCM Ergebnisse etwas höhere und ULAQ viel höhere Temperaturen in den NCC Simulationen zeigen.

Neue Simulationen und Ergebnisse

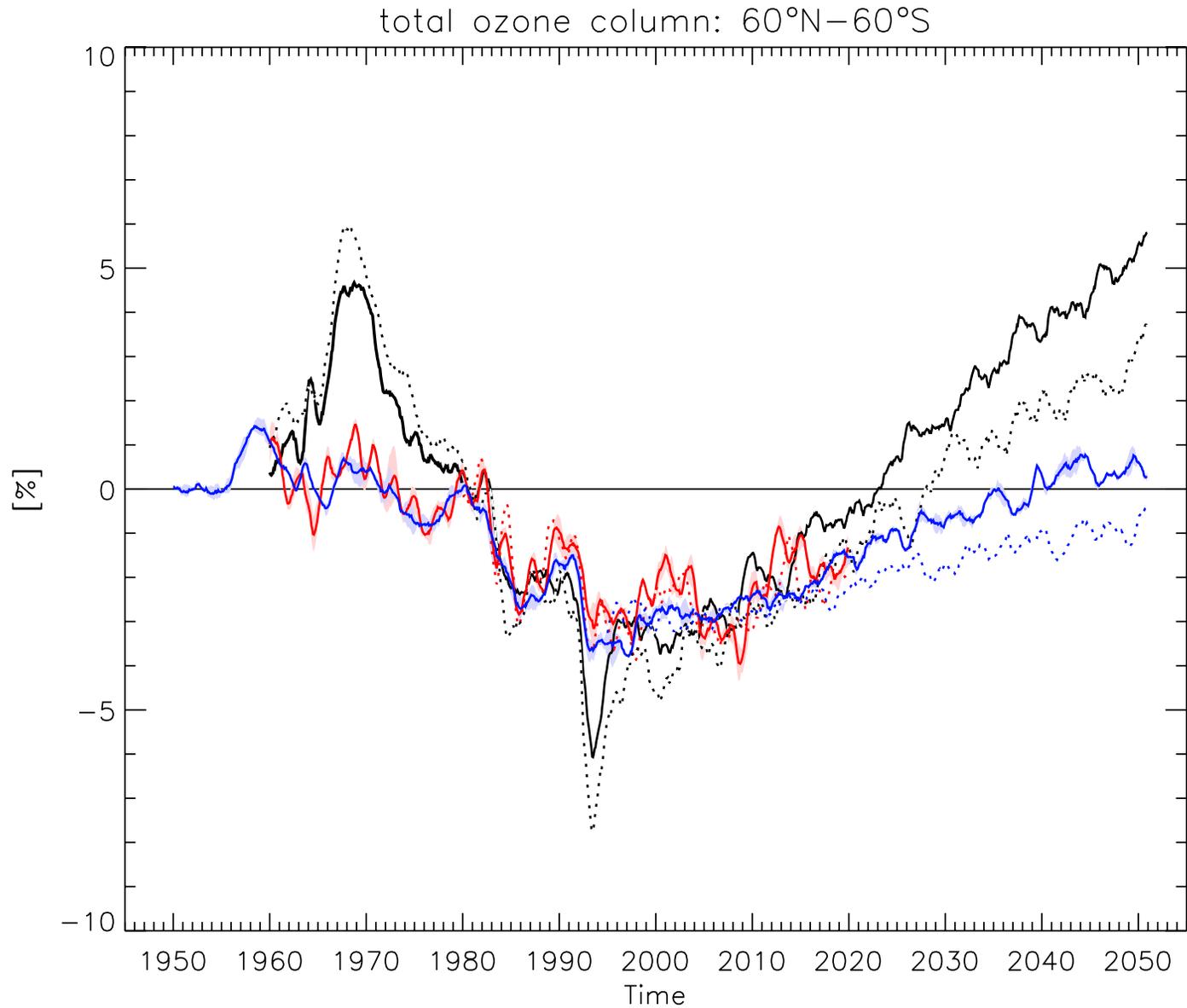
T 50hPa: 60°S–90°S



Neue Simulationen und Ergebnisse

- Untersuchungen der CCM Ergebnisse zeigen keinen klaren Einfluss der Klima- (=Temperatur-) änderungen auf Größen wie die "minimale Ozonsäule" in der polaren Stratosphäre oder die "maximale Fläche des Ozonlochs", weder in der Nord- noch der Südhemisphäre.
- Diese "Größen" sind offensichtlich nicht sensitiv für Temperaturänderungen von weniger als 1°C.
- Aber die nachfolgende Abbildung zeigt deutlich, dass die Erholung der Ozonschicht (Gesamtozon) für den Bereich zwischen 60°N und 60°S in einem sich ändernden Klima schneller abläuft:

Neue Simulationen und Ergebnisse



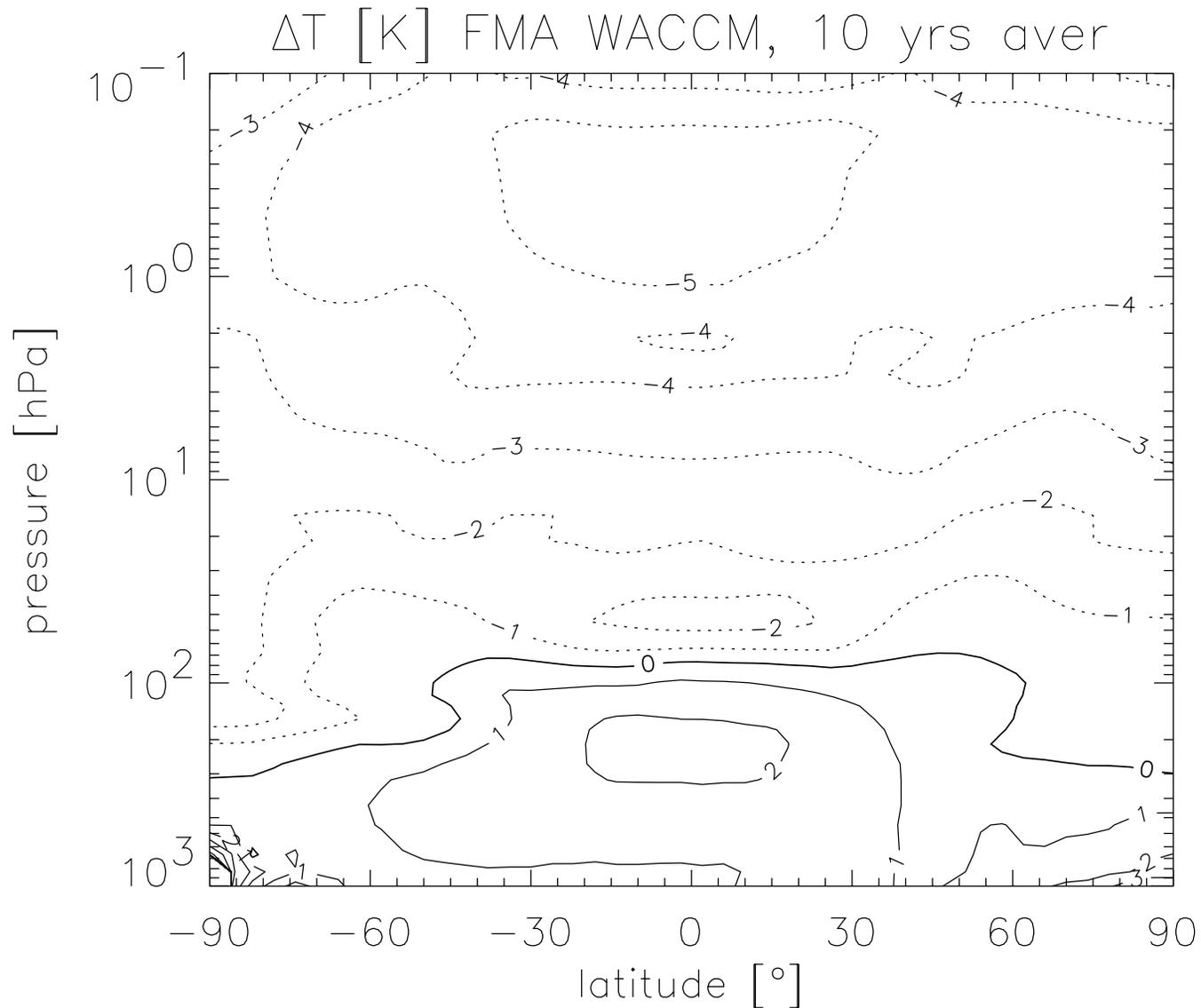
Neue Simulationen und Ergebnisse

- Da die globale Stratosphäre photochemisch kontrolliert wird (bestimmt durch die Gasphasen-Reaktionszyklen), verlangsamten sich die Ozon abbauenden Zyklen in der Stratosphäre (vor allem O_x) mit zurückgehenden Temperaturen.
- Wenn der Klimawandel berücksichtigt wird, zeigen ULAQ und WACCM eine um 10 bis 15 Jahre schnellere Rückkehr zu den Ozonwerten, die um 1980 beobachtet wurden.
- Dies stimmt mit den früher erzielten Ergebnisse von 2D Modellstudien überein (siehe oben).
- Die Simulationslänge von E39C war nicht ausreichend, um ein entsprechendes Ergebnis zu erzielen.

Neue Simulationen und Ergebnisse

- Die Ergebnisse von ULAQ und WACCM zeigen, dass um das Jahr 2050 die mittlere und obere Stratosphäre in den Referenzsimulationen um etwa 5°C bis 10°C kälter ist, als in den NCC Simulationen (siehe Abbildung, Beispiel WACCM).

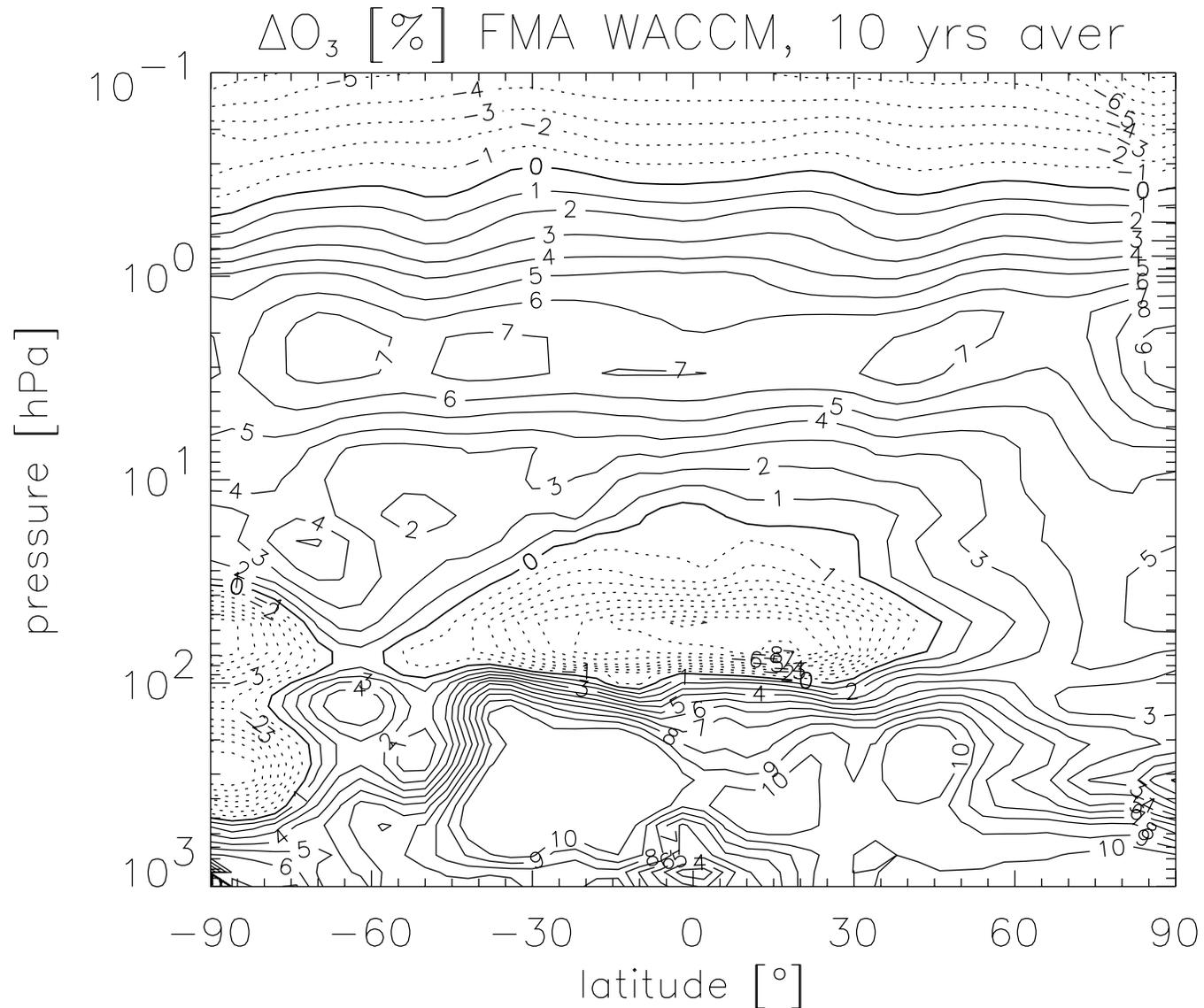
Neue Simulationen und Ergebnisse



Neue Simulationen und Ergebnisse

- Ein Ergebnis dieser Abkühlung ist, dass die Ozonmischungsverhältnisse in der mittleren und oberen Stratosphäre in der Referenzsimulation höher sind als in der NCC-Simulation (um bis zu 15% unterhalb der Stratopause). Siehe nachfolgende Abbildung.
- Der wichtigste Einfluss geht über den Temperatureffekt auf die Ozonverlustrate!

Neue Simulationen und Ergebnisse



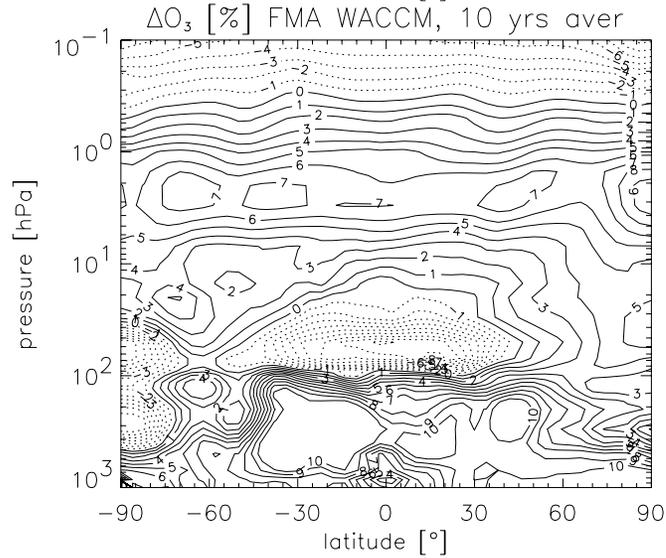
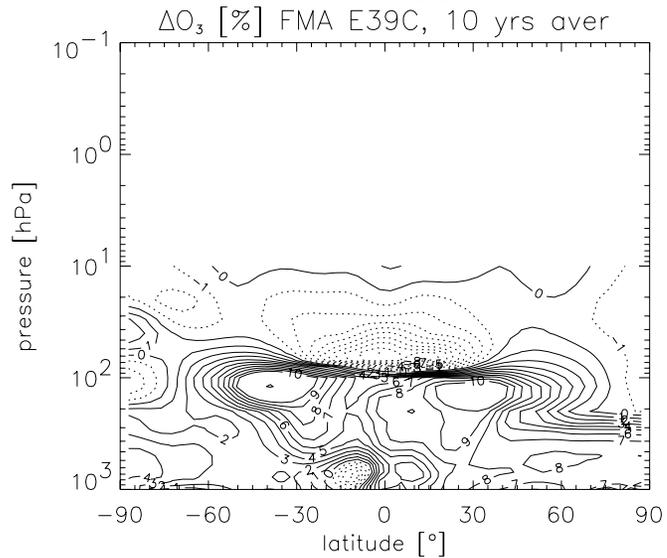
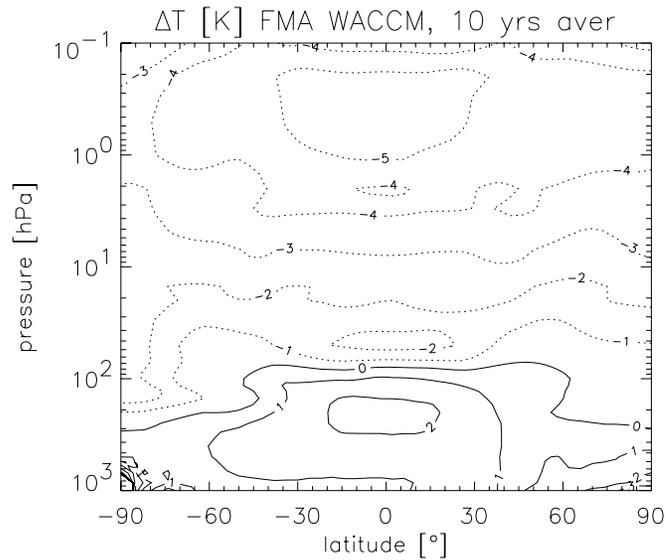
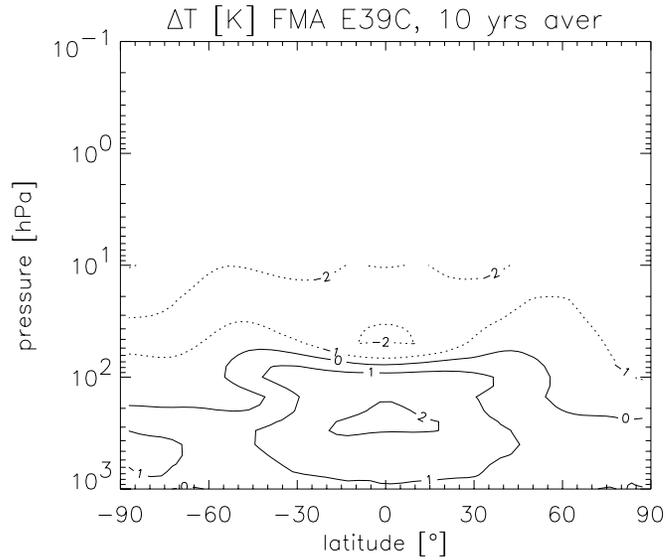
Neue Simulationen und Ergebnisse

- Unterhalb von 10 hPa zeigen alle drei CCMs ein konsistentes Verhalten.
- Diese Ergebnisse deuten auf eine Verzögerung in der Erholung der Ozonschicht in der antarktischen unteren Stratosphäre durch eine "intensivierte" heterogene Chemie, die durch niedrigere Temperaturen in der polaren unteren Stratosphäre verursacht ist.
- Die Änderungen in der arktischen unteren Stratosphäre sind statistisch nicht signifikant.

Neue Simulationen und Ergebnisse

- Interessanterweise zeigen alle Modelle in der tropischen unteren Stratosphäre für den Referenzlauf deutlich weniger Ozon, was möglicherweise auf ein verstärktes Aufsteigen von Luftmassen in den Tropen (intensivierte Brewer-Dobson Zirkulation) in der Referenzsimulation hindeutet (siehe Abbildung und spätere Diskussion).

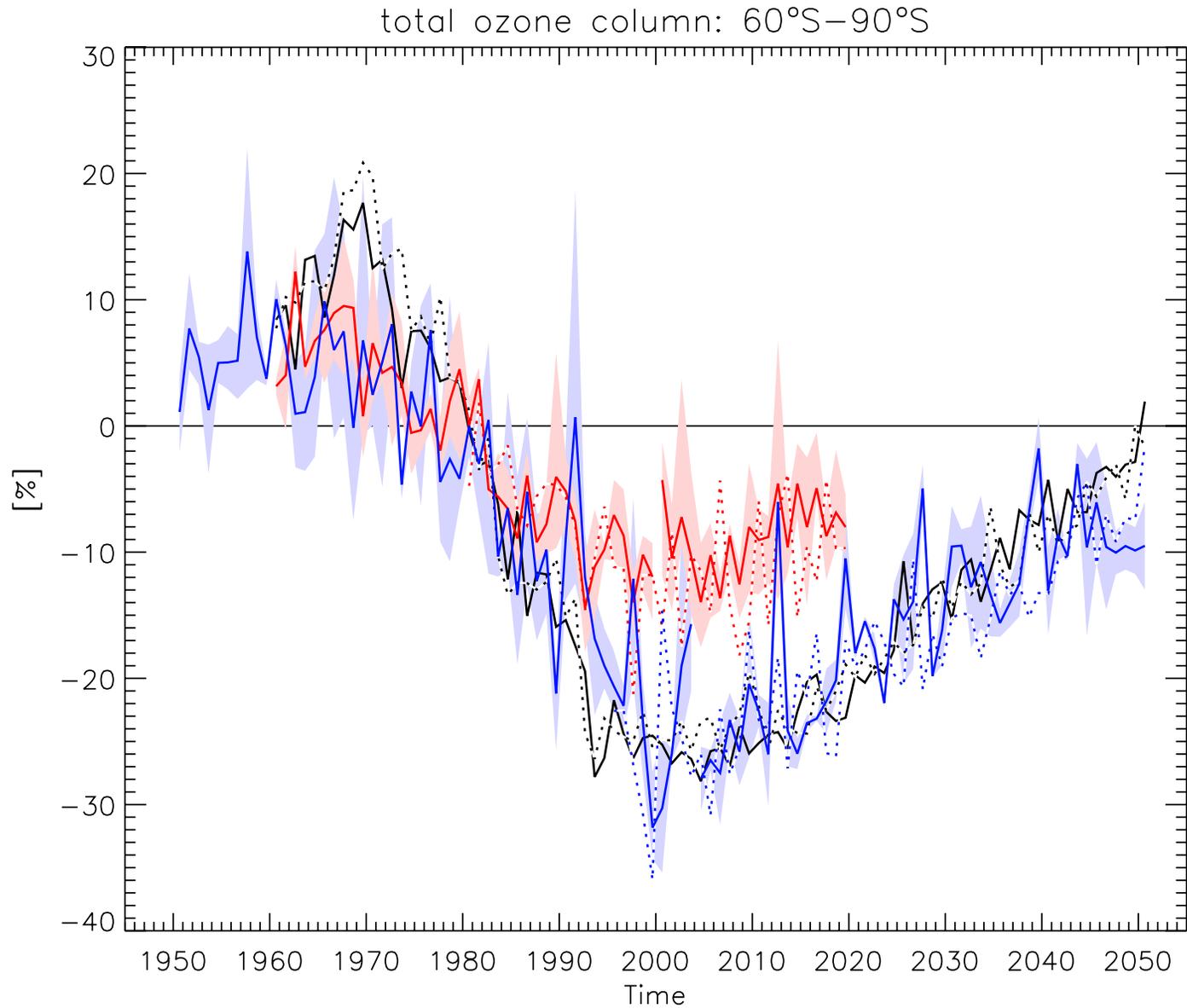
Neue Simulationen und Ergebnisse



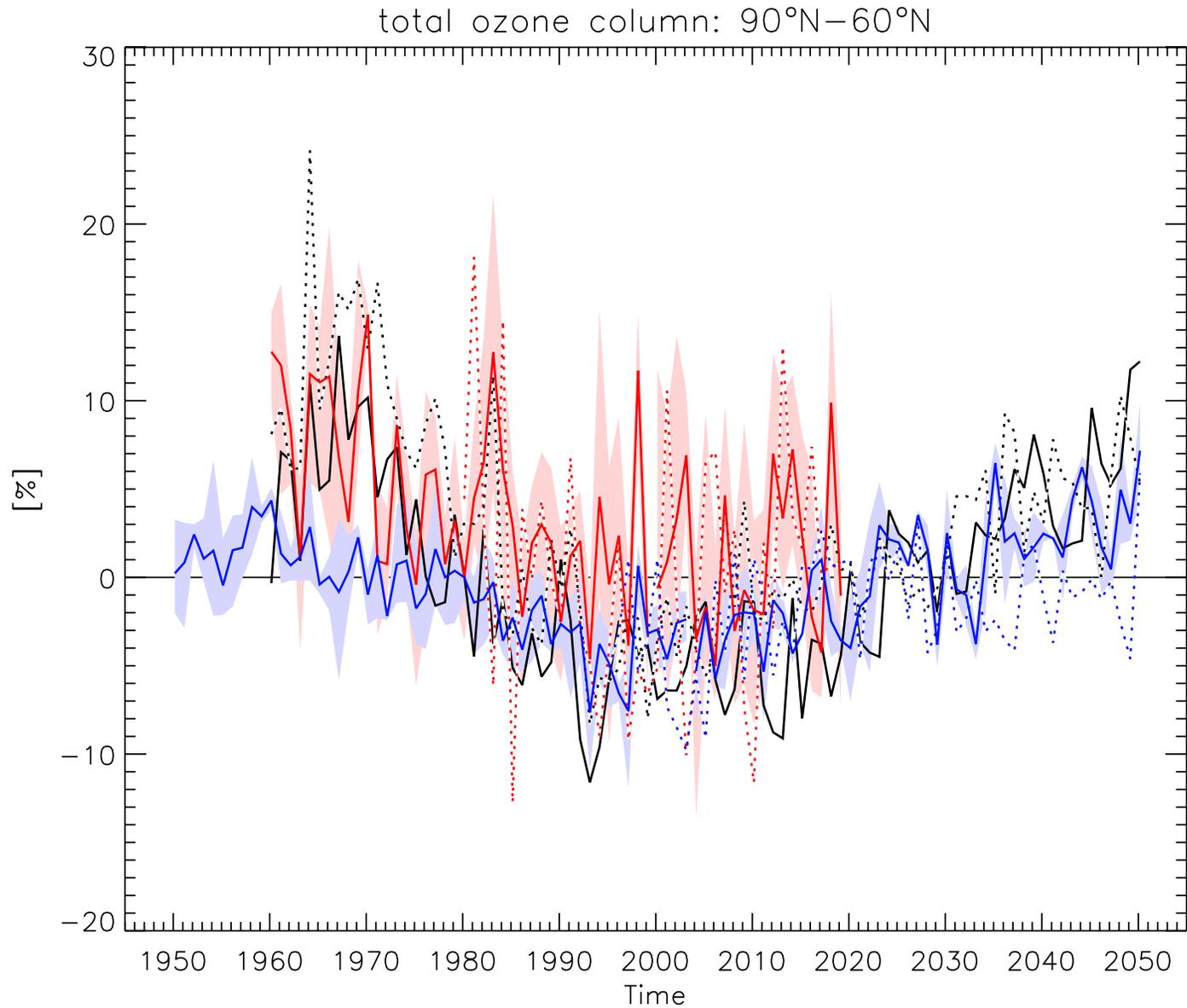
Neue Simulationen und Ergebnisse

- Qualitativ ist die Entwicklung der Gesamtozonsäule und der Temperatur in der unteren Stratosphäre (hier 50 hPa) in den Polregionen (60° - 90°) sehr ähnlich in den Referenz- und NCC-Simulationen (siehe nächste beiden Abbildungen).

Neue Simulationen und Ergebnisse



Neue Simulationen und Ergebnisse



Neue Simulationen und Ergebnisse

- Die Ergebnisse scheinen anzudeuten, dass der Gesamteinfluss veränderter Konzentrationen gut durchmischter Treibhausgase und der SSTs auf die Ozongesamtsäule in der arktischen Stratosphäre möglicherweise etwas größer ist, als in der antarktischen Stratosphäre.
- Unterschiede in der Ozongesamtsäule, die aus den Ergebnissen der Referenz- und NCC-Simulationen abgeleitet wurden, sind in der polaren Südhemisphäre nicht offensichtlich.
- Die Ergebnisse des WACCM Modells deuten darauf hin, dass in der polaren Nordhemisphäre nach dem Jahr 2020 die Ozongesamtsäule im Referenzlauf systematisch höher sind .

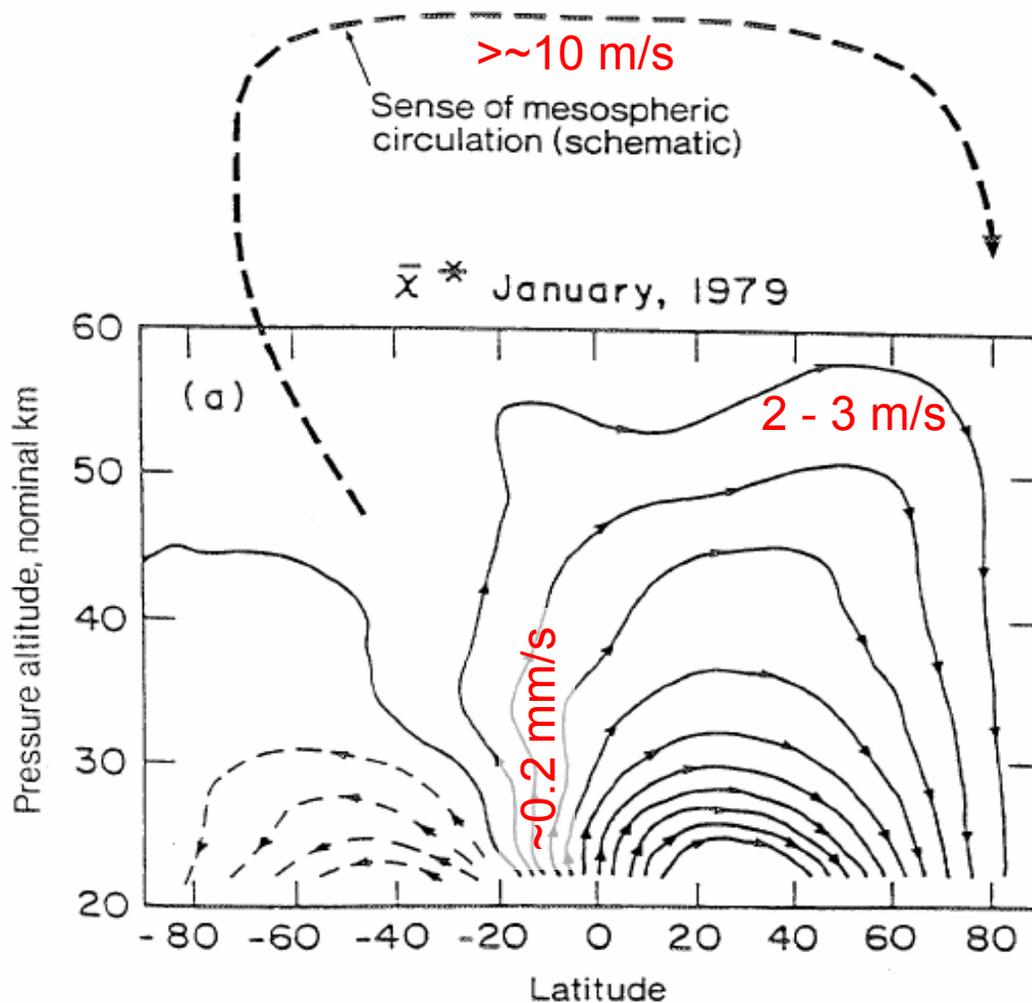
Neue Simulationen und Ergebnisse

- Somit bleibt festzuhalten, dass niedrigere Temperaturen in den Ozonverlustregionen der hohen Breiten (= polare untere Stratosphäre) einen entgegengesetzten Effekt haben als niedrigere Temperaturen in den Ozonproduktionsregionen in den Tropen.
- Nichtsdestotrotz kann es sein, dass in der nördlichen Hemisphäre der Transport ozonreicherer Luftmassen in hohe Breiten durch eine verstärkte Brewer-Dobson Zirkulation über den Effekt erhöhter Br/Cl Katalyse von Ozon in der Polregion dominiert.

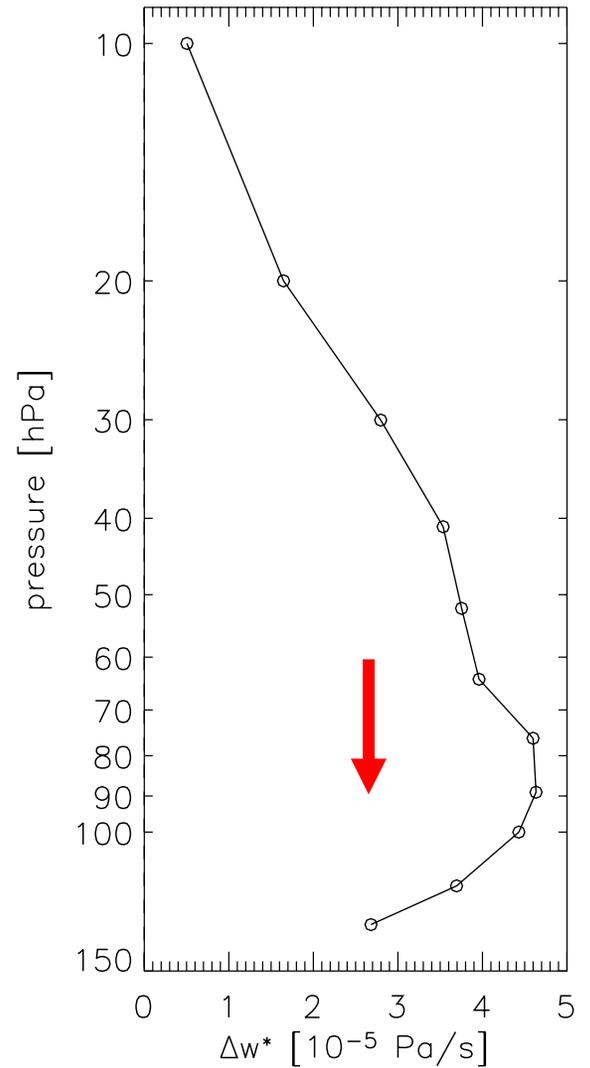
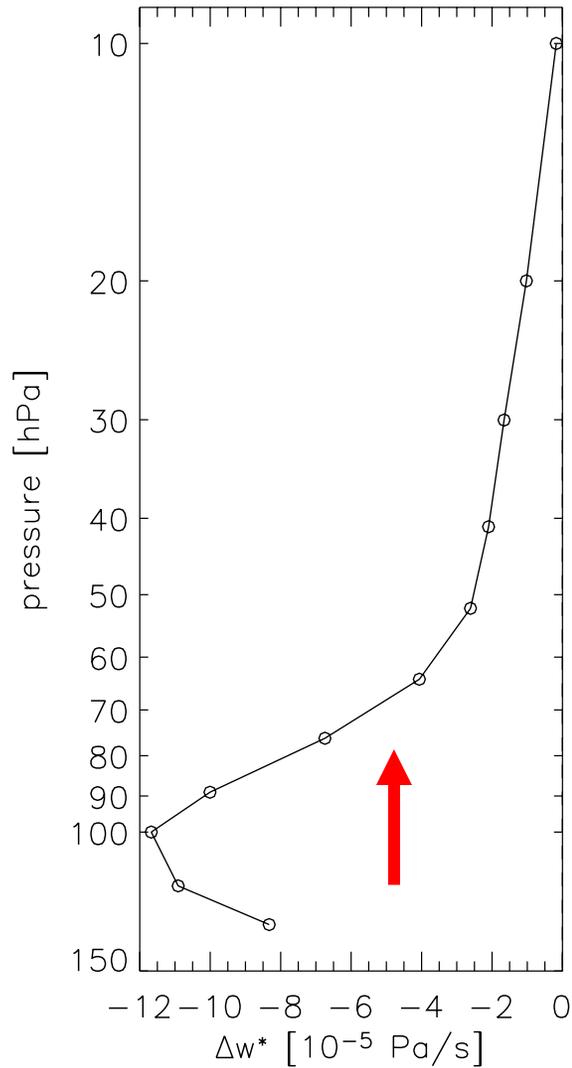
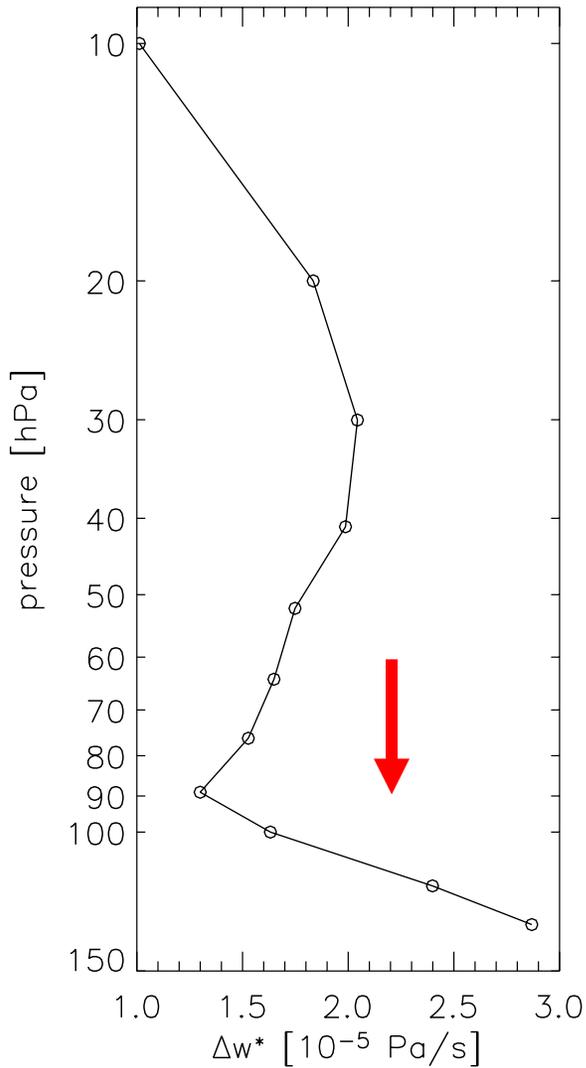
Interpretation und Erklärungsversuche

- ✓ CCMs zeigen in konsistenter Weise, dass die Erholung der Ozonschicht in einigen Regionen schneller von statten geht, wenn die Stratosphärentemperatur weiter sinkt; dies gilt nicht für die Polregionen.
- ✓ Dort führen niedrigere Temperaturen zu einer stärkeren Bildung von polaren Stratosphärenwolken (PSCs).
- ⇒ Die Erholung der Ozonschicht verläuft möglicherweise regional unterschiedlich. Sie ist keine simple Umkehrung des Abbaus.
- ✓ Die modellierte Intensivierung des Aufsteigens von Luftmassen in der tropischen unteren Stratosphäre (GCMs, Klimamodelle, CCMs) ist ein deutliches Indiz für eine veränderte Zirkulation.
- ? Bis heute sind die Gründe und Mechanismen unbekannt, die diese Veränderungen verursachen.

Darstellung des Massenflusses durch die mittlere residuale Meridionalzirkulation: $[\chi^*] = 2\pi a/g \psi$

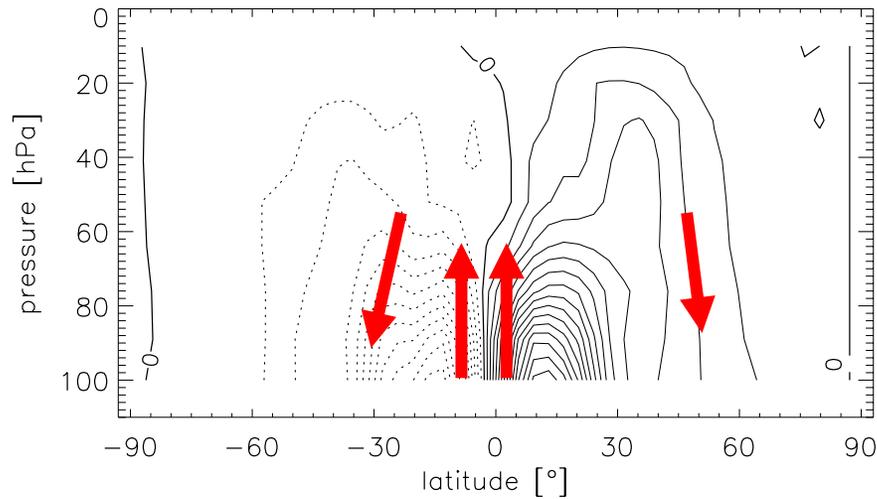


Einfluss des Klimawandels auf die B-DZ (REF-NCC)

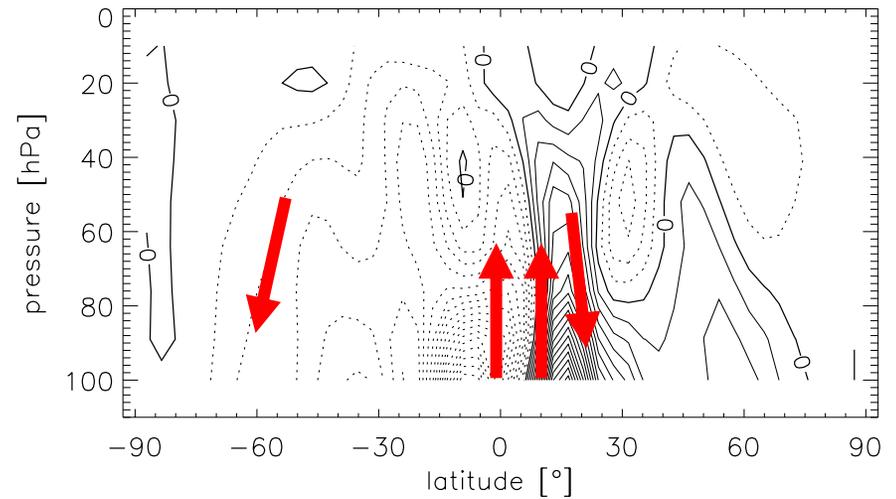


Änderung des Massenflusses durch die mittlere residuale Meridionalzirkulation (REF-NCC)

Dezember/Januar



Juli/August



Definition des Eliassen-Palm (EP) Flussvektors \underline{F}

Der EP-Vektor \mathbf{F} $(0, F_\varphi, F_z)$ mit den Komponenten

$$F_\varphi = \rho_0 a \cos\varphi \{ \partial[u]/\partial z [v'\theta'] / \partial[\theta]/\partial z - [v'u'] \}$$

$$F_z = \rho_0 a \cos\varphi \{ (f - 1/ a \cos\varphi \partial([u] \cos\varphi)/\partial\varphi) [v'\theta'] / \partial[\theta]/\partial z - [w'u'] \}$$

liefert Informationen über Richtung und Intensität des Energietransfers.

Quasi-geostrophische Skalierung:

$$F_\varphi = -\rho_0 a \cos\varphi [u'v']$$

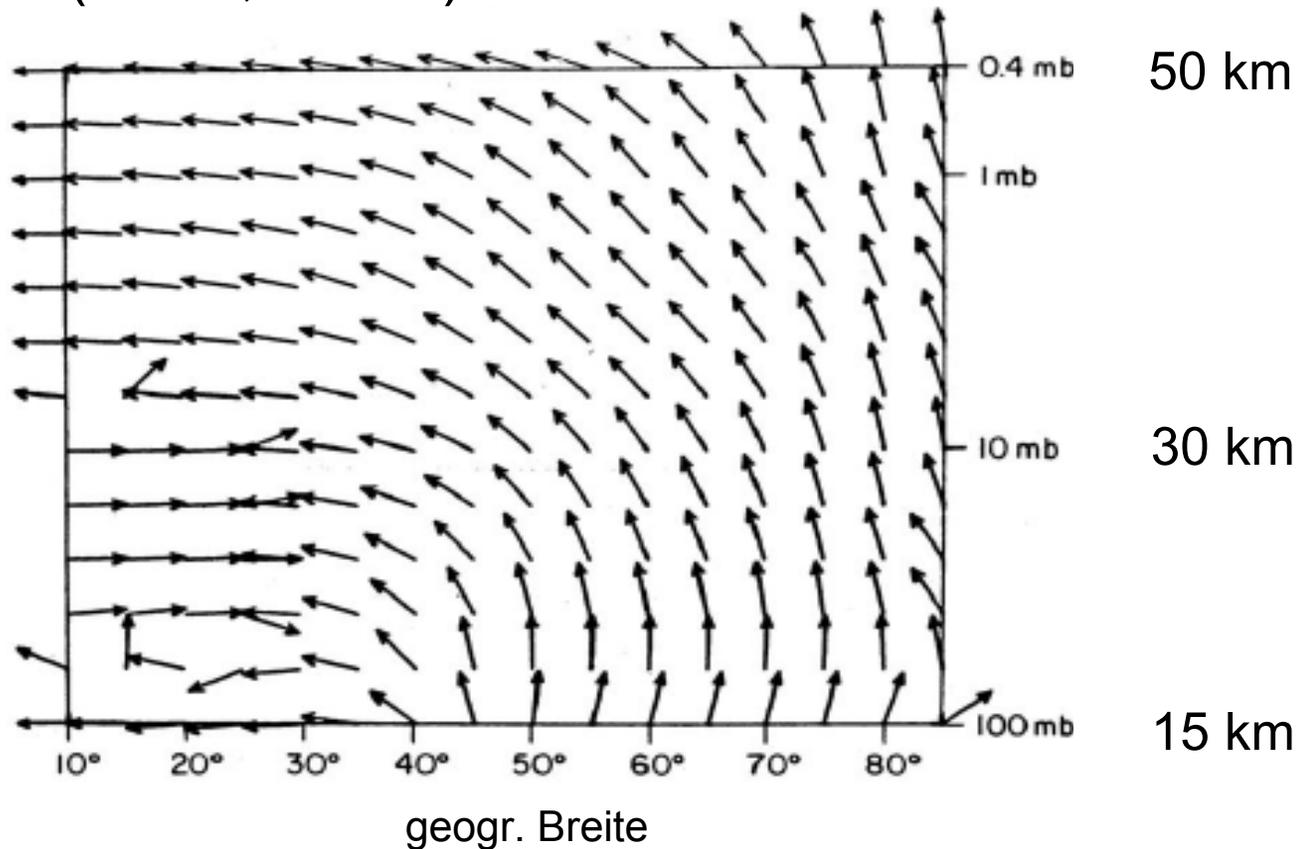
$$F_z = \rho_0 a \cos\varphi f [v'\theta'] / \partial[\theta]/\partial z$$

Die Divergenz des EP-Vektors \mathbf{F} ist ein Maß für die Beschleunigung des Grundstroms durch Störungen (Wellen):

$$\text{div } \mathbf{F} = 1/a \cos\varphi \partial/\partial\varphi (F_\varphi \cos\varphi) + \partial/\partial z F_z$$

EP-Flussvektoren

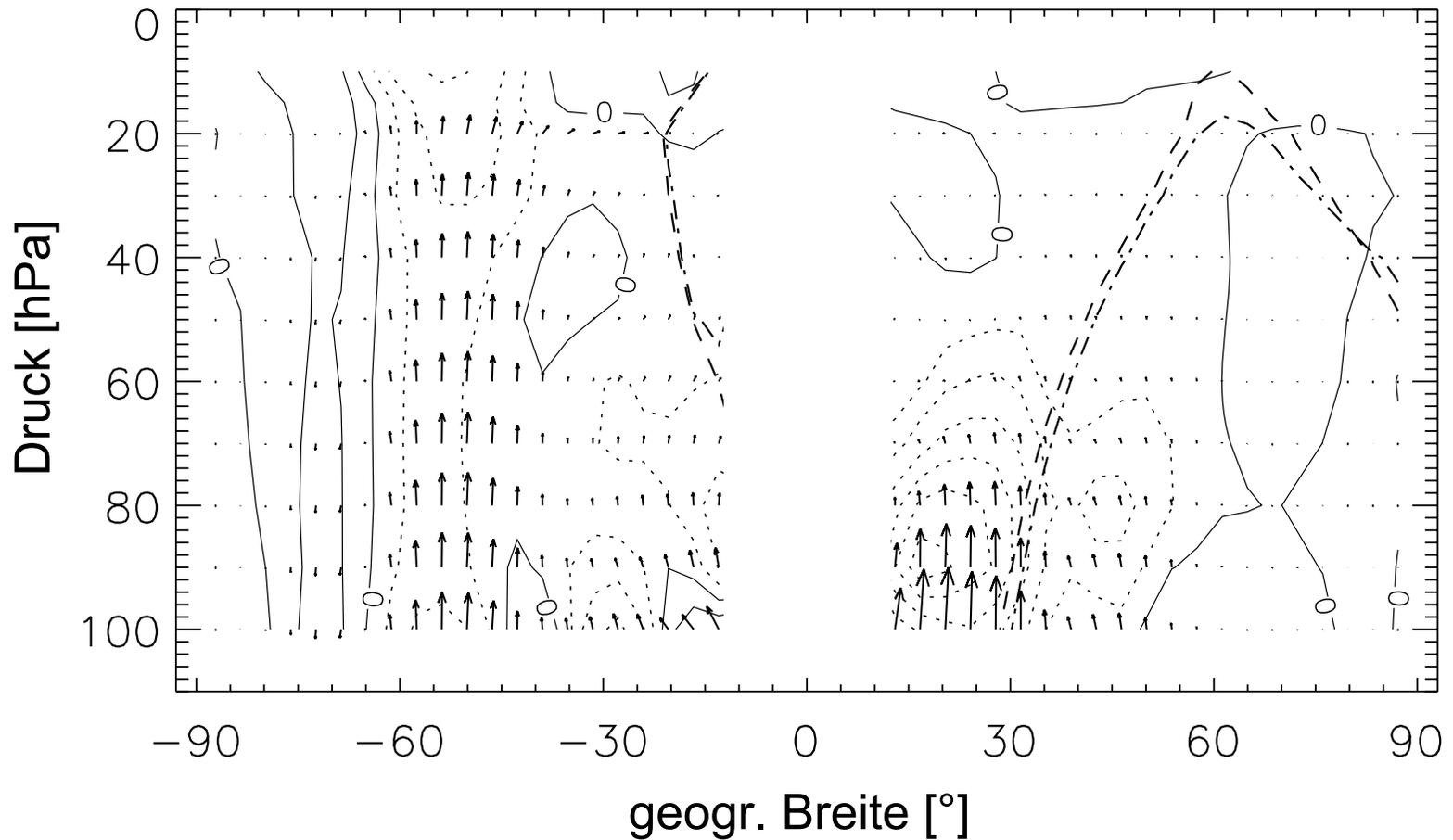
Die EP-Flüsse sind ein Maß für den Transfer von Wellenenergie von einem Ort (Höhe, Breite) zu einem anderen Ort.



Nordhemisphäre, Januar, 4-Jahresmittel

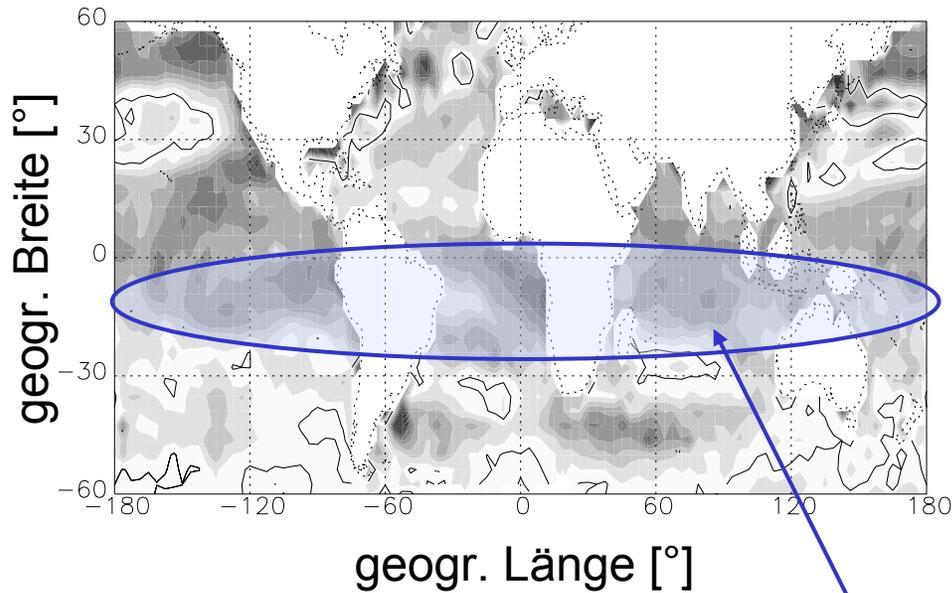
Einfluss des Klimawandels auf die B-DZ (REF-NCC)

Änderung der Wellenaktivität im Juli/August

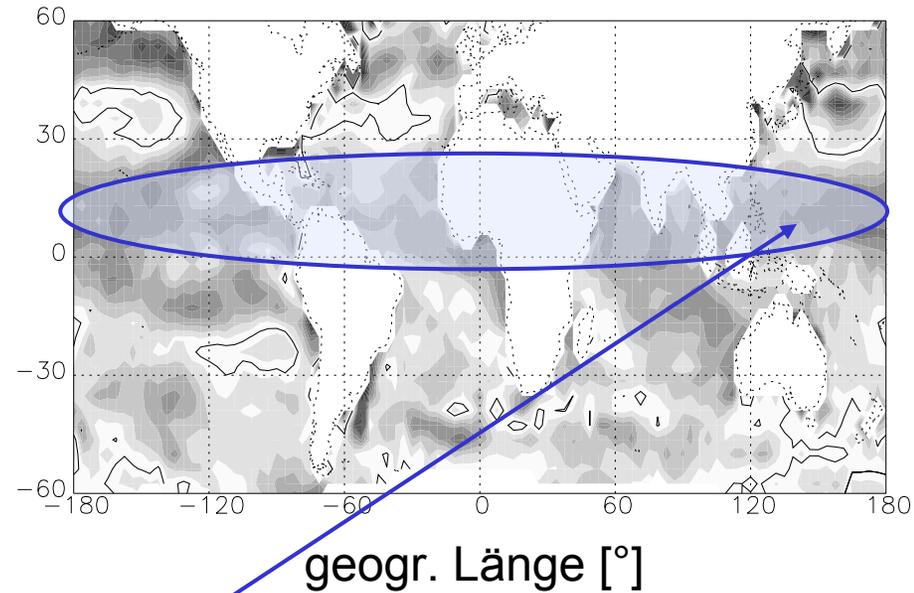


Änderung der Meeresoberflächentemperatur, SST (REF-NCC)

Änderung der SST im Dezember/Januar



Änderung der SST im Juli/August

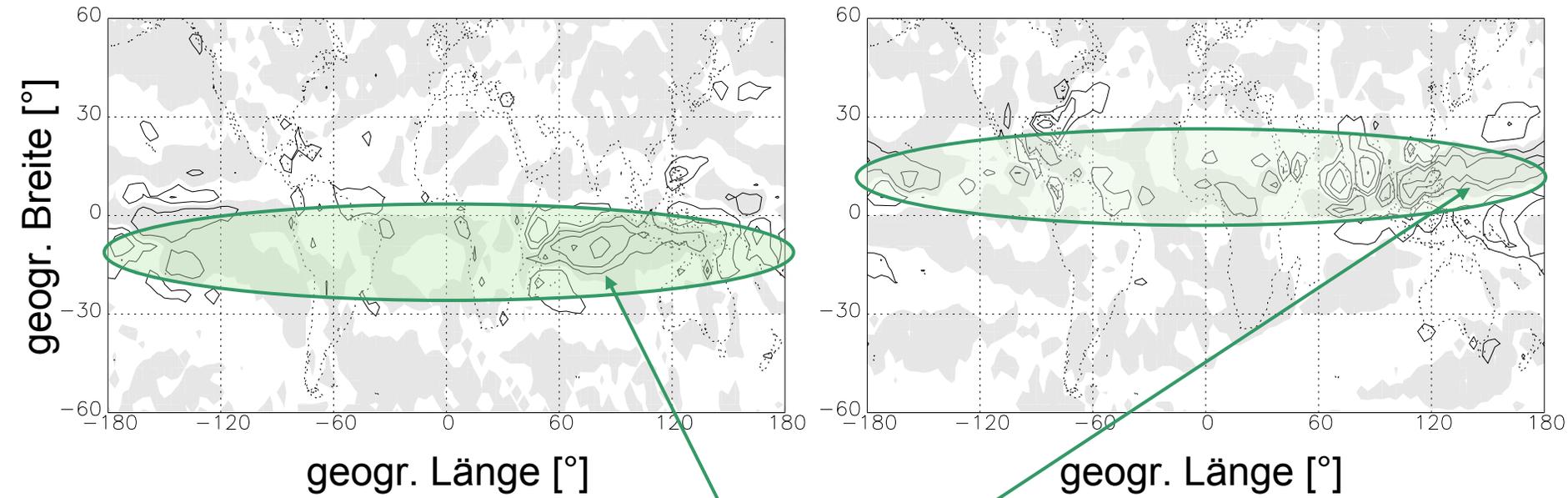


$$\Delta(\text{SST})_{\text{max}} \approx +1^{\circ}\text{C}$$

Änderung des konvektiven Niederschlags (REF-NCC)

Dezember/Januar

Juli/August



$$\Delta(\text{konvektiver Niederschlag})_{\text{max}} \approx +7\%$$

Zusammenfassung

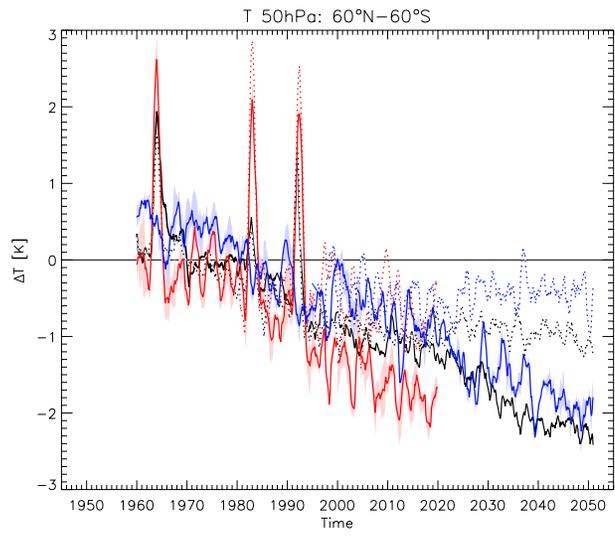
- ✓ Die vorgeschriebenen tropischen Meeresoberflächen-temperaturen sind in der jeweiligen Sommerhemisphäre in REF regional um bis zu 1°C höher als in NCC.
- ✓ Dort ist der **konvektive Niederschlag** deutlich **erhöht**.
- ✓ Dies erzeugt eine **verstärkte Freisetzung latenter Wärme** und führt im Folgenden zu einer **gesteigerten Anregung von stationären Wellen** und einem **verstärktem Aufsteigen von Luftmassen** in der tropischen oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre.
- ✓ Noch ist nicht klar, ob die Änderungen in der außertropischen Wellenaktivität damit direkt im Zusammenhang stehen, oder ob diese ihre Ursachen in den mittleren Breiten haben.

Stand des Wissens

- ✓ Prognostische Modellstudien zeigen, dass sich in der Zukunft die thermische Struktur sowie die Zirkulation der Troposphäre und Stratosphäre deutlich verändern werden.
- ? Die Ursachen und Mechanismen, die diese Veränderungen bewirken, sind bislang kaum untersucht und verstanden.
- ? Die Auswirkungen dieser Veränderungen auf
 - die Kopplung der beiden Atmosphärenschichten,
 - den Transport und die Verteilung von Spurengasen und
 - die chemische Zusammensetzung der Atmosphäresind aufgrund der verschiedenen Rückkopplungsmechanismen vielfach unklar.

Forschungsziele

- ★ Identifizierung und Quantifizierung der Auswirkungen troposphärischer Veränderungen auf die Stratosphäre.
- ★ Detaillierte Untersuchung der Kopplungsprozesse von Troposphäre und Stratosphäre in einem sich ändernden Klima.
- ★ Bestimmung der Einflüsse stratosphärischer Veränderungen (Dynamik und Chemie) auf das Klimasystem.
- ★ Verbesserung langfristiger (saisonaler) Wettervorhersagen durch die Berücksichtigung stratosphärischer Prozesse.



Ende Kapitel 14