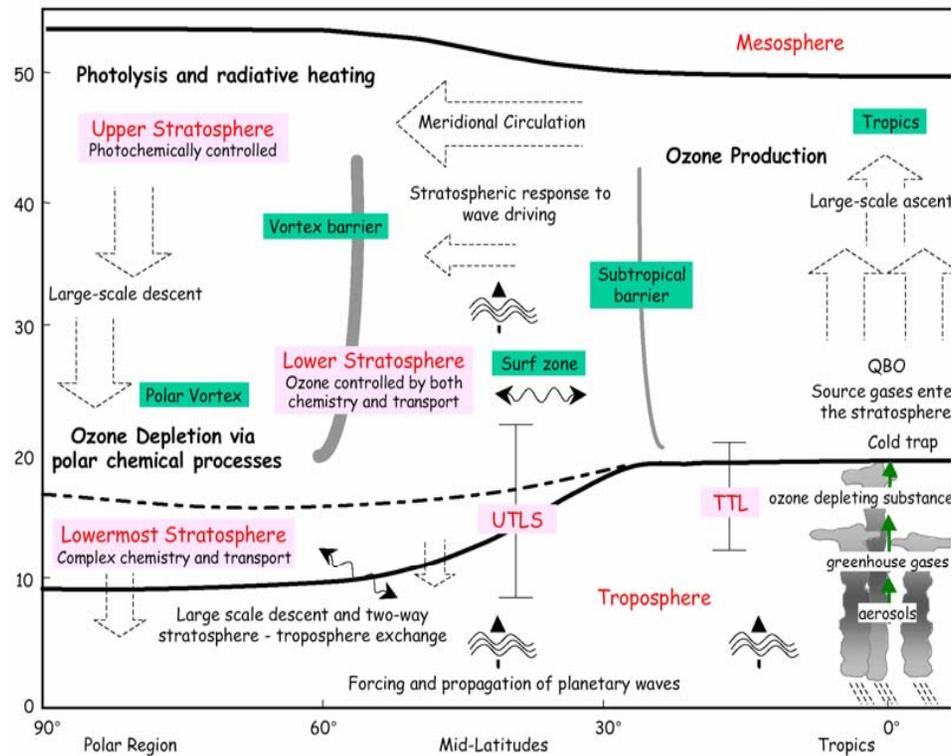


Kapitel 11

Änderungen in der tropischen und extra-tropischen Tropopausenschicht



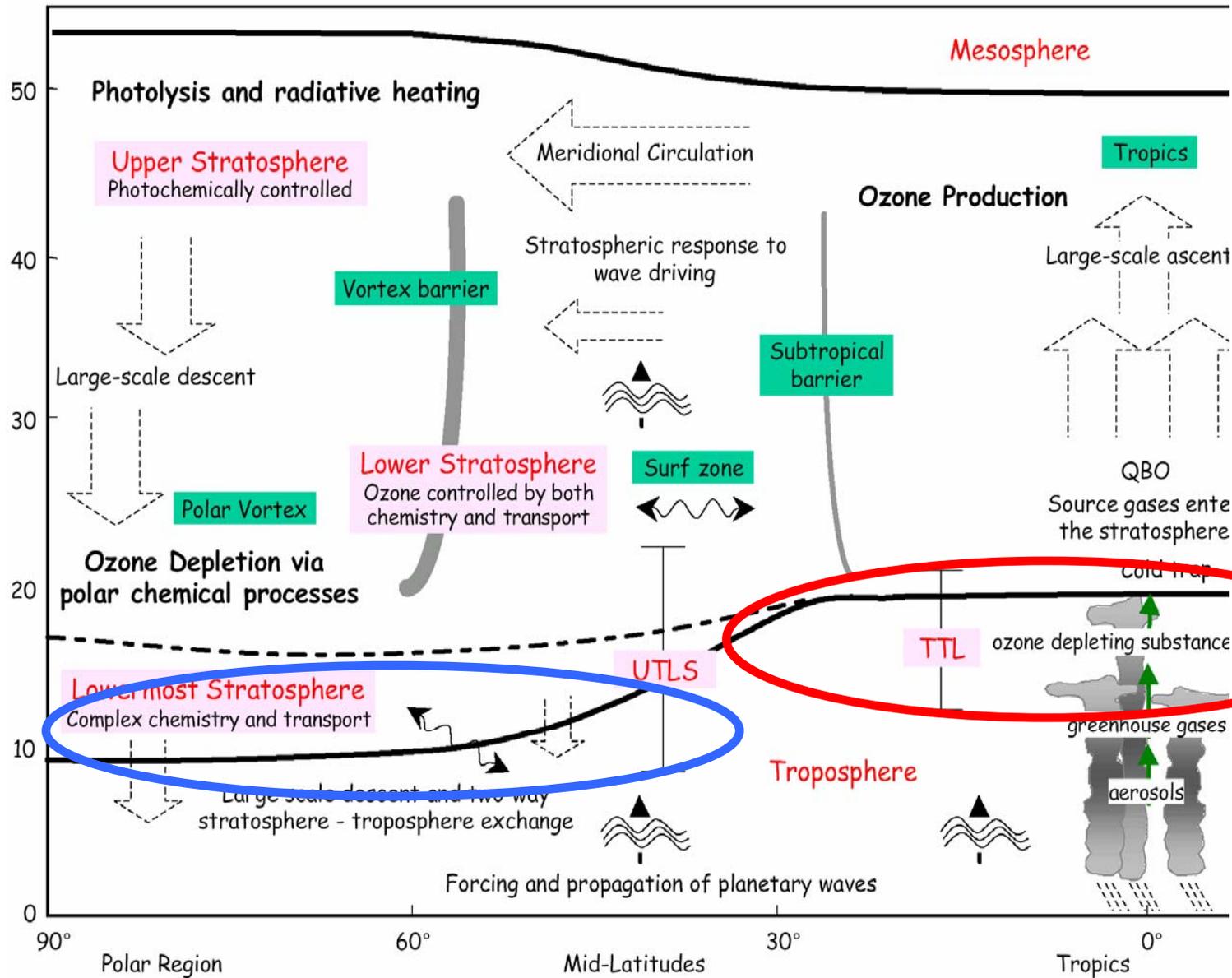
Kapitel 11: Gliederung

- Einleitung
- Die tropische Tropopausenschicht (engl. Tropical Tropopause Layer, TTL)
- Die extra-tropische Tropopausenschicht (engl. Extra-Tropical Tropopause Layer, ExTL)

Die Tropopausenregion

- Die Region direkt unterhalb der tropischen **Tropopause** steht nur in langsamen Austausch mit anderen Bereichen der Atmosphäre und wird daher zunehmend eigenständig als **Tropical Tropopause Layer (TTL)** bezeichnet.
- Die TTL spielt eine besondere Rolle im Klimasystem der Erde
- Sie ist die einzige Region der Atmosphäre, in der Luftmassen aus den unteren Bereichen der Atmosphäre langsam über 18 km Höhe hinaus aufsteigen können.

TTL und ExTL



Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Die TTL (siehe Sherwood und Dessler, 2001) ist typischerweise als der Atmosphärenbereich definiert, der sich ausdehnt von der Region des Minimums des vertikalen Temperaturgradienten in etwa 11-13 km (Gettelman und Forster, 2002) bis zu der Schicht, in der noch konvektives überschießen gefunden wird, unmittelbar oberhalb der sogenannten "Kältepunkt" (engl. cold point) Temperatur (CPT) in etwa 16-17 km.

Sherwood, S.C., und A.E. Dessler, A model for transport across the tropical tropopause, *J. Atmos. Sci.*, 58 (7), 765-779, 2001.

Gettelman, A., und P.M.F. Forster, A climatology of the tropical tropopause layer, *J. Met. Soc. Japan*, 80 (4B), 911-924, 2002.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Dies umfasst die Schicht von "zero net radiative heating" (z_0), die den Übergang von strahlungsbedingter Abkühlung zu strahlungsbedingter Erwärmung markiert und die die TTL in eine untere und eine obere TTL einteilt. Ihre Lage hängt auch davon ab, ob Wolken existieren (Corti et al., 2005).

Corti, T., B.P. Luo, T. Peter, H. Vömel, und Q. Fu, Mean radiative energy balance and vertical mass fluxes in the equatorial upper troposphere and lower stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 32 (6), L06802, 2005.

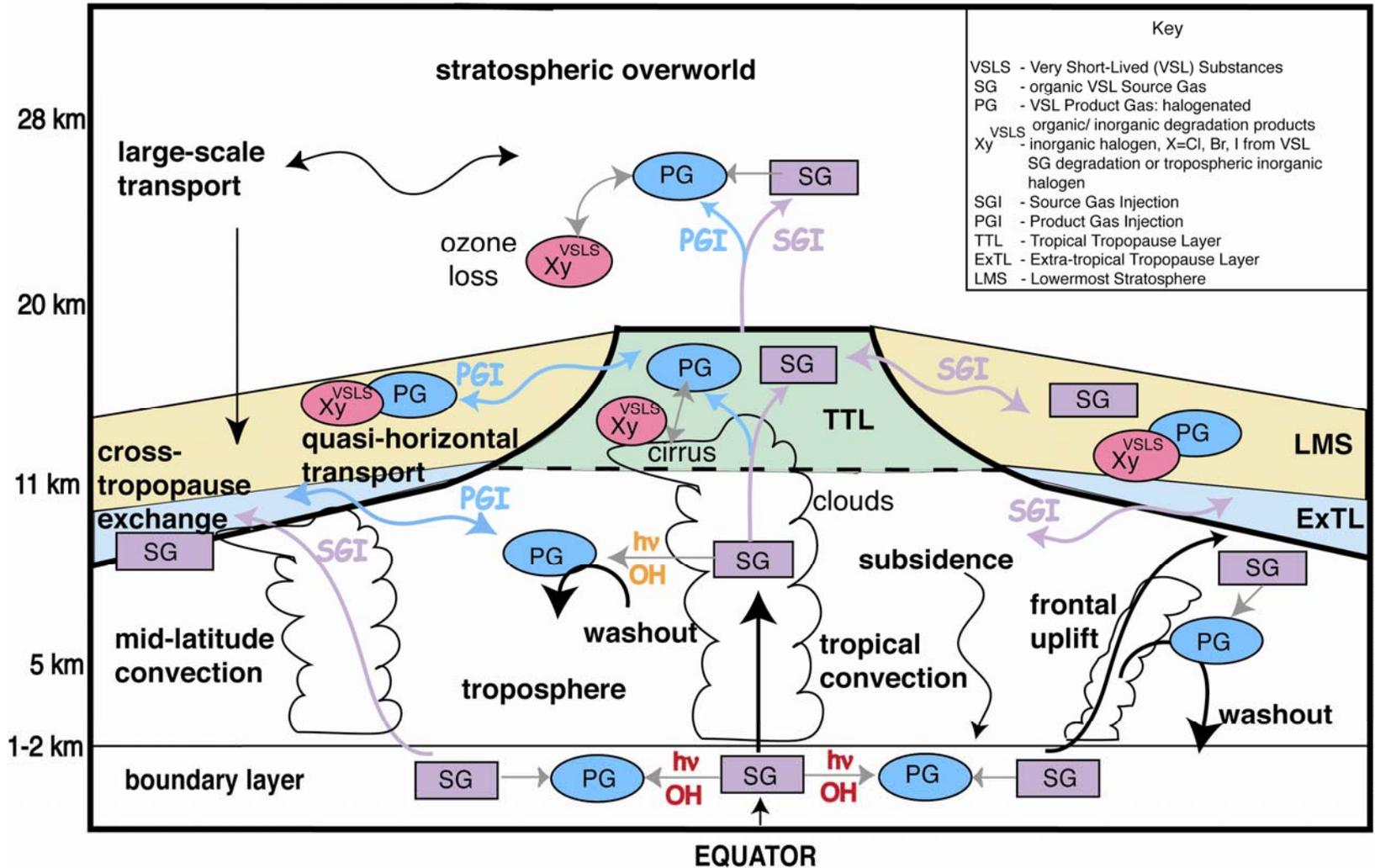
- Unterhalb von z_0 , sinkt die abgekühlte Luft zurück in die Troposphäre, oberhalb von z_0 steigt die erwärmte Luft auf, eventuell erreicht sie sogar die Stratosphäre.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Die TTL agiert als die Quellregion für sowohl für die mittlere und obere Stratosphäre ('stratospheric overworld') als auch für die extra-tropische untere Stratosphäre (siehe Abbildung).
- Der Nettotransfer von aus der TTL in die Stratosphäre wird durch das großräumige Aufsteigen über die Brewer-Dobson Zirkulation bestimmt; die Stärke dieser Zirkulation wird durch großskalige dynamische Prozesse kontrolliert (siehe auch Kapitel 3).

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

Chemical and Dynamical Processes Affecting VSLS



Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Die chemische Zusammensetzung dieser auf- oder abgestiegenen Luftmassen hängt von der Verweilzeit in der TTL ab (Folkins et al., 1999; Thuburn und Craig, 2002; Bonazzola und Haynes, 2004; Fueglistaler et al., 2004).

Folkins, I., M. Loewenstein, J. Podolske, S.J. Oltmans, und M. Proffitt, A barrier to vertical mixing at 14 km in the tropics: Evidence from ozonesondes and aircraft measurements, *J. Geophys. Res.*, 104 (D18), 22095-22102, 1999.

Thuburn, J., und G.C. Craig, On the temperature structure of the tropical stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 107 (D2), 4017, 2002.

Bonazzola, M., und P.H. Haynes, A trajectory-based study of the tropical tropopause region, *J. Geophys. Res.*, 109, D20112, doi: 10.1029/2003JD004356, 2004.

Fueglistaler S., H. Wernli, T. Peter, Tropical troposphere-to-stratosphere transport inferred from trajectory calculations, *J. Geophys. Res.*, 109, D03108, doi:10.1029/2003JD004069, 2004.

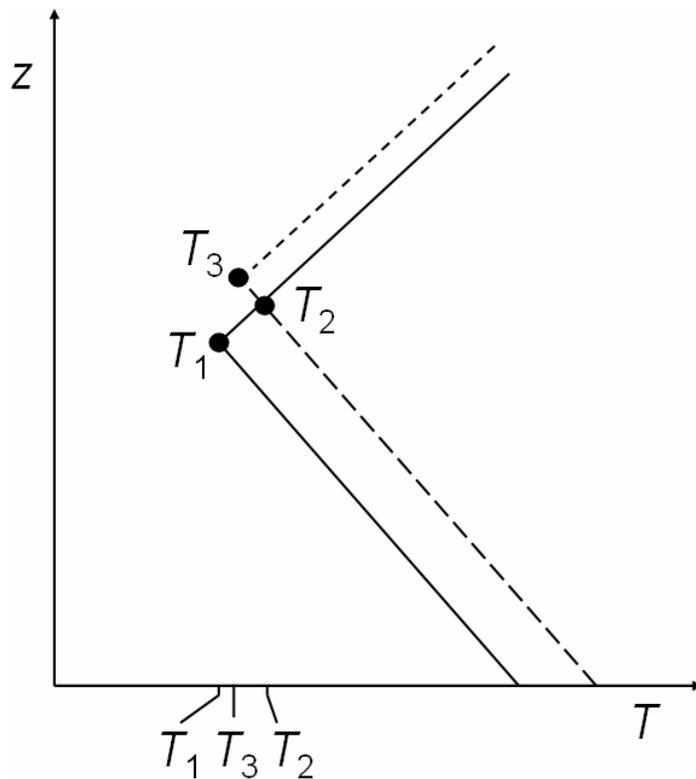
Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Ferner ist zu beachten, dass die Minimumtemperatur, die die Luftmasse entlang des Transportweges durch die TTL erfahren hat, eine herausragende Rolle bei der Dehydrierung spielt und damit auch für die Feuchte der Stratosphäre (siehe auch Kapitel 6 und 12).
- Änderungen, die die TTL während der vergangenen Dekaden durchlaufen hat, sind nur unzureichend bekannt und verstanden. Die Möglichkeiten der Abschätzungen zukünftiger Entwicklungen sind stark eingeschränkt.
- Es gibt keinen belastbaren Referenzdatensatz langzeitlicher globaler Temperaturbeobachtungen aus diesem Höhenbereich.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Die TTL ist "eingeklemmt" zwischen einer sich erwärmenden Troposphäre und einer abkühlenden Stratosphäre.
- Dies macht die theoretische Abschätzung der Reaktion der CPT und des stratosphärischen Wasserdampfgehalts auf den Klimawandel besonders schwierig.
- Ein sehr vereinfachtes, konzeptionelles Bild ist in der nachfolgenden Abbildung gezeigt:

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)



Simplified sketch of the sensitivity of the tropopause temperature and height with regard to changes of temperature in the stratosphere and troposphere. Solid lines: reference profile with cold point **T_1** . Long-dashed line with solid line: perturbed profile reflecting tropospheric warming with cold point **T_2** . Long-dashed line with short-dashed line: perturbed profile reflecting tropospheric warming and stratospheric cooling with cold point **T_3** .

- Nimmt man eine konvektiv kontrollierte Troposphäre mit einem konstanten Temperaturgradienten an, dann führt eine troposphärische Erwärmung zu einem Ansteigen und einer Erwärmung der Tropopause (die CPT steigt von T_1 auf T_2). Eine Abkühlung der Stratosphäre hebt die Tropopause weiter an, führt aber zu einer Abkühlung (von T_2 zu T_3).

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Derzeit scheint es wahrscheinlich, dass die troposphärische Erwärmung der dominierende Effekt ist, da die erhöhte infrarote (IR) Abkühlung durch höhere Treibhausgaskonzentrationen eher gering ist und zwar aufgrund der sehr niedrigen Temperaturen nahe der Tropopause.
- Die beobachteten Temperaturtrends unmittelbar oberhalb der tropischen Tropopause ergeben eine Abkühlung von weniger als 0.4 K/Dekade, aber sie sind statistisch nicht signifikant (Kapitel 4 in WMO, 2003).
- Das generelle Konzept hinter vorheriger Abbildung wurde durch sogenannte *AGCM time-slice* (Shepherd, 2002) und *transiente* Simulationen (Santer et al., 2003) bekräftigt.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Die Entwicklung der TTL Temperaturen wird des weiteren dadurch komplizierter, dass es eine troposphärische Verstärkung der Erwärmung des Bodens gibt (Santer et al., 2005).
- Die Variabilität der tropischen Temperaturen auf der Basis von Monatswerten ist in der Troposphäre größer als an der Erdoberfläche. Diese "Verstärkung" ist konsistent mit der grundlegenden Theorie (Stichwort: Trägheit des Bodens).

Santer, B.D., T.M.L. Wigley, C. Mears, F.J. Wentz, S.A. Klein, D.J. Seidel, K.E. Taylor, P.W. Thorne, M.F. Wehner, P.J. Gleckler, J.S. Boyle, W.D. Collins, K.W. Dixon, C. Doutriaux, M. Free, Q. Fu, J.E. Hansen, G.S. Jones, R. Ruedy, T.R. Karl, J.R. Lanzante, G.A. Meehl, V. Ramaswamy, G. Russell, und G.A. Schmidt, Amplification of surface temperature trends and variability in the tropical atmosphere, *Science*, 309 (5740), 1551-1556, doi: 10.1126/science.1114867, 2005.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Umgekehrt würde eine Verstärkung der Brewer-Dobson Zirkulation, wie sie in numerischen Klimastudien mit erhöhten Treibhausgaskonzentrationen gefunden werden, eine Absenkung der TTL Temperaturen mit sich bringen (Butchart and Scaife, 2001; Rind et al., 2002a, 2002b; Sigmond et al., 2004; Eichelberger and Hartmann, 2005).
- Seidel et al. (2001) erhielten ein Ansteigen der Höhe der CPT von etwa 40 m und einen Rückgang des Druckes von etwa 1 hPa im Zeitraum von 1978 bis 1997.

Seidel, D.J., R.J. Ross, J.K. Angell, und G.C. Reid, Climatological characteristics of the tropical tropopause as revealed by radiosondes, *J. Geophys. Res.*, 106 (D8), 7857-7878, 2001.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Sowohl Seidel et al. (2001) als auch Zhou et al. (2001) fanden eine Abkühlung der tropischen Tropopause von etwa 1 K während dieser Periode, was zu einer Reduktion des Sättigungsmischungsverhältnisse von Wasser um etwa 0.5 ppmv zwischen 1978 und 1997 führte.

Zhou, X.-L., M.A. Geller, und M.H. Zhang, The cooling trend of the tropical cold point tropopause temperatures and its implications, *J. Geophys. Res.*, 106, 1511-1522, 2001.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

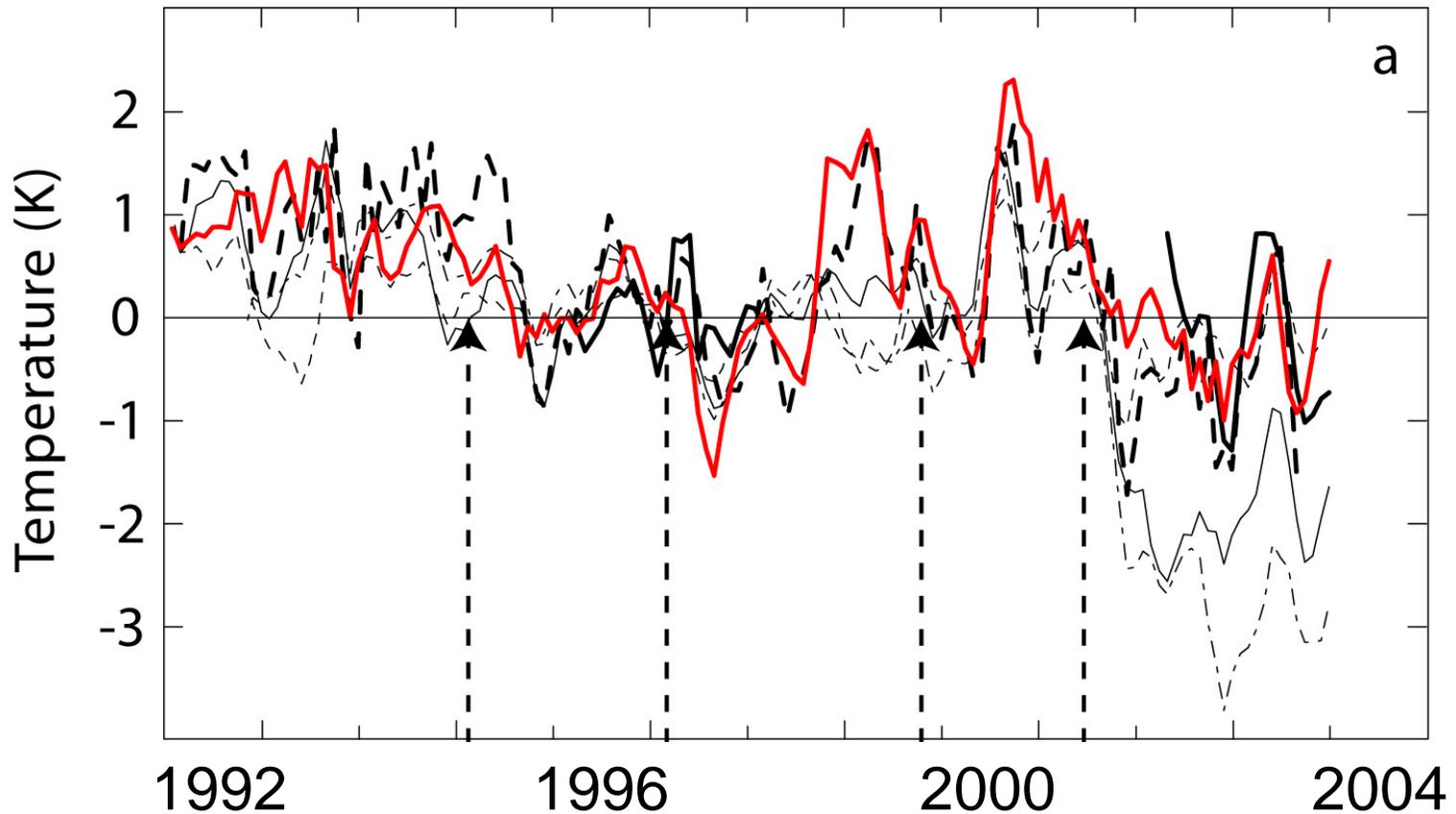
- Diese Temperaturentwicklung passt nicht mit der troposphärischen Erwärmung zusammen, die nach dem konzeptionelle Bild die Reaktion der CPT dominiert.
- Im Gegenteil wird vorgeschlagen, dass die CPT weitestgehend durch eine intensivierete Brewer-Dobson Zirkulation und eine verstärkte Konvektion kontrolliert wird (Zhou et al., 2001).
- Zhou et al. (2004) zeigten ferner, wie QBO und El Niño-Southern Oscillation (ENSO) Effekte extrem hohe und tiefe tropische CPT Temperaturen produzieren können.

Zhou, X.-L., M.A. Geller, und M.H Zhang, Temperature fields in the tropical tropopause transition layer, *J. Clim.*, 17, 2901-2908, 2004.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Nachfolgende Abbildung zeigt einen sehr kleinen negativen Trend der tropischen Temperatur auf dem 100 hPa Druckniveau über die letzte Dekade, der sich zwischen 2001 und 2003 deutlich verstärkt.
- Die Gründe für diese Entwicklung sind derzeit nicht verstanden.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

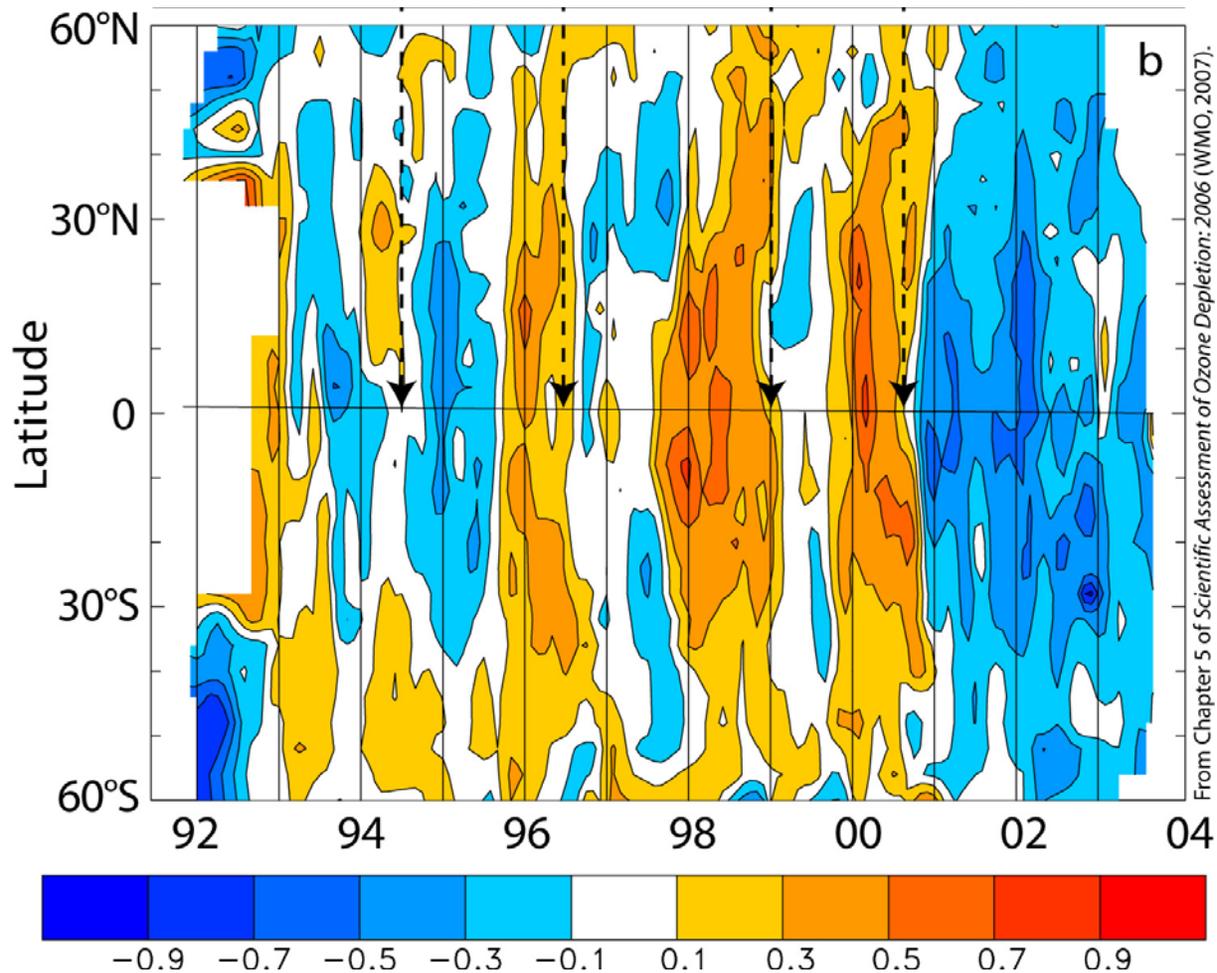


Time series of deseasonalized 100 hPa temperature anomalies over 10°N-10°S, showing results from six different datasets (red = radiosondes, thick black = GPS, and various model results).

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

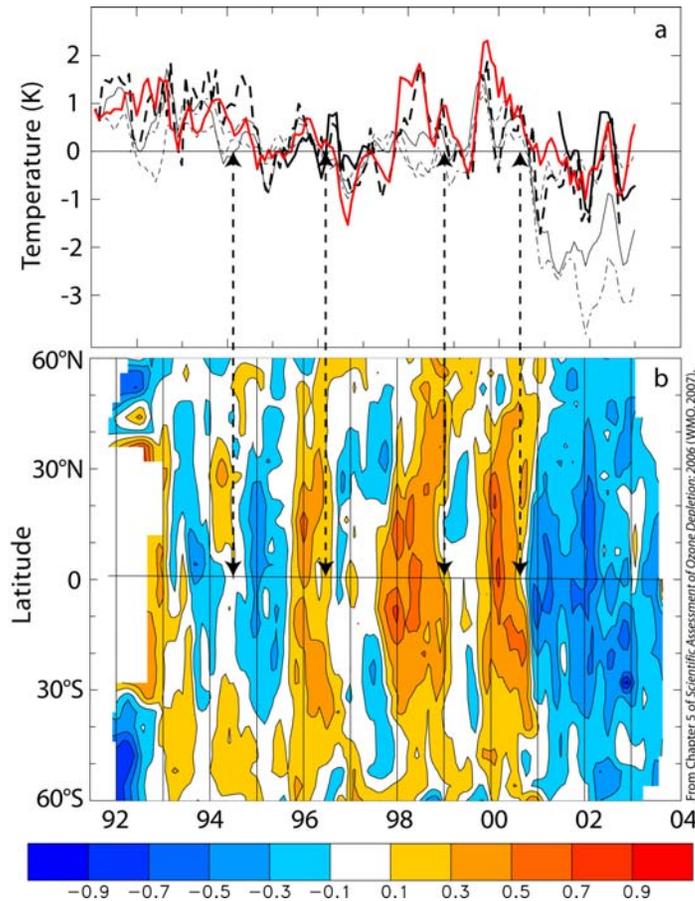
- Die nächste Abbildung zeigt den stratosphärischen Gesamtwassergehalt. Große Anomalien sind in den Tropen zu erkennen und sie sind in Phase mit den tropischen Temperaturen in 100 hPa.
- Die niedrigen Wasserdampf-anomalien nach 2001 (bis 2003) überdecken nahezu den gesamten Globus.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)



Latitude-time cross sections at 82 hPa of deseasonalized anomalies in H₂O + 2 × CH₄ from HALOE measurements. Contours are ± 0.1, 0.3, ... ppmv.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)



Dashed vertical lines show the onsets of various cold phases ascribed to the quasi-biennial oscillation and El Niño-Southern Oscillation.

- Die beobachteten starken saisonalen und Jahr-zu-Jahr T-H₂O Korrelationen deuten darauf hin, dass der stratosphärische Gesamtwassergehalt vor allem durch die Temperaturen zwischen dem 100 hPa Niveau und der CPT bestimmt ist.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Änderungen im Bereich der TTL können auch die Menge vieler anderer stratosphärischer Spurengase beeinflussen.
- Dies kann kurzlebige chemische Substanzen betreffen, wie biogene Bromverbindungen, die in die Stratosphäre transportiert wurden, zuerst durch konvektive Ereignisse (sog. tiefe Konvektion) gefolgt von einem Transport durch die TTL (Abbildung).
- Änderungen in der tiefen Konvektion können außerdem auch den Transport von längerlebigen Spezies beeinflussen, zum Beispiel Methylbromid (CH_3Br) aus Biomasseverbrennung (Andreae und Merlet, 2001).

Andreae, M.O., und P. Merlet, Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochem. Cycles*, 15 (4), 955-966, 2001.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Zu guter letzt können chemische Spezies besonders durch den Bereich der tropischen Tropopause nach oben transportiert werden, zum Beispiel organische schwefelhaltige Spezies (Notholt et al., 2005).
- Man weis sehr wenig über diese Prozesse; über den Einfluss des Klimawandels auf diese Prozesse weis man deshalb erst recht sehr wenig.

Notholt, J., B.P. Luo, S. Fueglistaler, D. Weisenstein, M. Rex, M.G. Lawrence, H. Bingemer, I. Wohltmann, T. Corti, T. Warneke, R. von Kuhlmann, und T. Peter, Influence of tropospheric SO₂ emissions on particle formation and the stratospheric humidity, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L07810, doi: 10.1029/2004GL022159, 2005.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

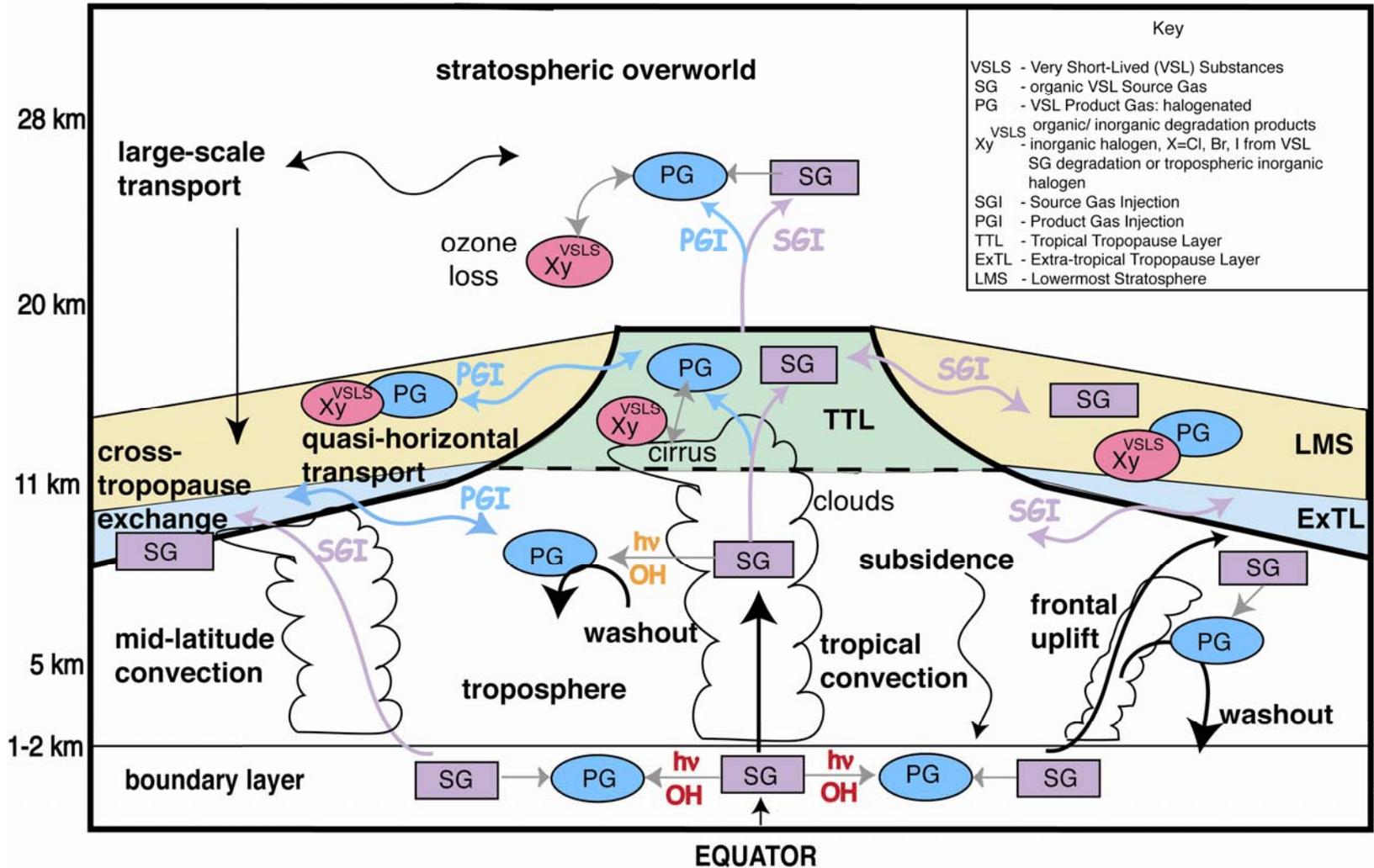
- Zusammenfassend lässt sich sagen, dass, bei den derzeitigen Unsicherheiten im Verständnis der Mechanismen im Bereich der TTL und ihrer diversen Veränderungen, Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung der TTL in punkto Prozesse und Transport mit großen Unsicherheiten belegt sind.
- In einer zukünftigen Atmosphäre mit höheren Treibhausgaskonzentrationen erwartet man eine wärmere Troposphäre mit einer verstärkten tiefen Konvektion, d.h. einem effektiveren Transport aus der Troposphäre in die Stratosphäre.

Die tropische Tropopausenschicht (TTL)

- Aber aus den vorher genannten Gründen bleibt es spekulativ, dass dies zu einer wärmeren Tropopause führt, höheren Wasserdampfmischungsverhältnissen und in der weiteren Folge zu einer feuchteren Stratosphäre mit einer langsameren Erholung der Ozonschicht.
- Die vergangenen Dekaden deuten auf die Dominanz anderer Prozesse hin, die möglicherweise im Zusammenhang mit Änderungen der Brewer-Dobson Zirkulation stehen.
- Weitere Überraschungen sind also nicht ausgeschlossen.

Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

Chemical and Dynamical Processes Affecting VSLS



Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

- Die ExTL ist eine Luftschicht, die oben an die (lokale) extra-tropische thermische Tropopause angrenzt und die entweder als Ergebnis einer irreversiblen Mischung von troposphärischer Luft in die unterste Stratosphäre interpretiert wird (Hoor et al., 2004; Hegglin et al., 2005) oder als Ergebnis von einem Stratosphären-Troposphärenaustausch in beiden Richtungen (Pan et al., 2004).

Hoor, P., C. Gurk, D. Brunner, M.I. Hegglin, H. Wernli, und H. Fischer, Seasonality and extent of extratropical TST derived from in-situ CO measurements during SPURT, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 1427-1442, 2004.

Hegglin, M.I., D. Brunner, H. Wernli, C. Schwierz, O. Martius, P. Hoor, H. Fischer, U. Parchatka, N. Spelten, C. Schiller, M. Krebsbach, U. Weers, J. Staehlin, und T. Peter, Tracing troposphere-to-stratosphere transport above a mid-latitude deep convective system, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 741-756, 2004.

Pan, L.L., W.J. Randel, B.L. Gary, M.J. Mahoney, and E.J. Hints, Definitions and sharpness of the extratropical tropopause: A trace gas perspective, *J. Geophys. Res.*, 109, D23103, doi: 10.1029/2004JD004982, 2004.

Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

- Die Herkunft von Ozon in der ExTL ändert sich ausgesprochen deutlich mit der Jahreszeit, mit einer im Sommer dominierenden photochemischen Produktion vor Ort und einem dominierenden Transport aus der Stratosphäre während der Winter- und Frühlingsmonate.
- Ein genereller positiver Trend (Ansteigen) der extra-tropischen Tropopause wurde gefunden und konnte u.a. auch der Änderung (Abnahme) der Ozonsäule zugeordnet werden (Steinbrecht et al., 1998; Varotsos et al., 2004).

Steinbrecht, W., H. Claude, U. Köhler, und K.P. Hoinka, Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes, *J. Geophys. Res.*, 103 (D15), 19183-19192, 1998.

Varotsos, C., C. Cartalis, A. Vlamakis, C. Tzanis, und I. Keramitsoglou, The long-term coupling between column ozone and tropopause properties, *J. Clim.*, 17 (19), 3843-3854, 2004.

Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

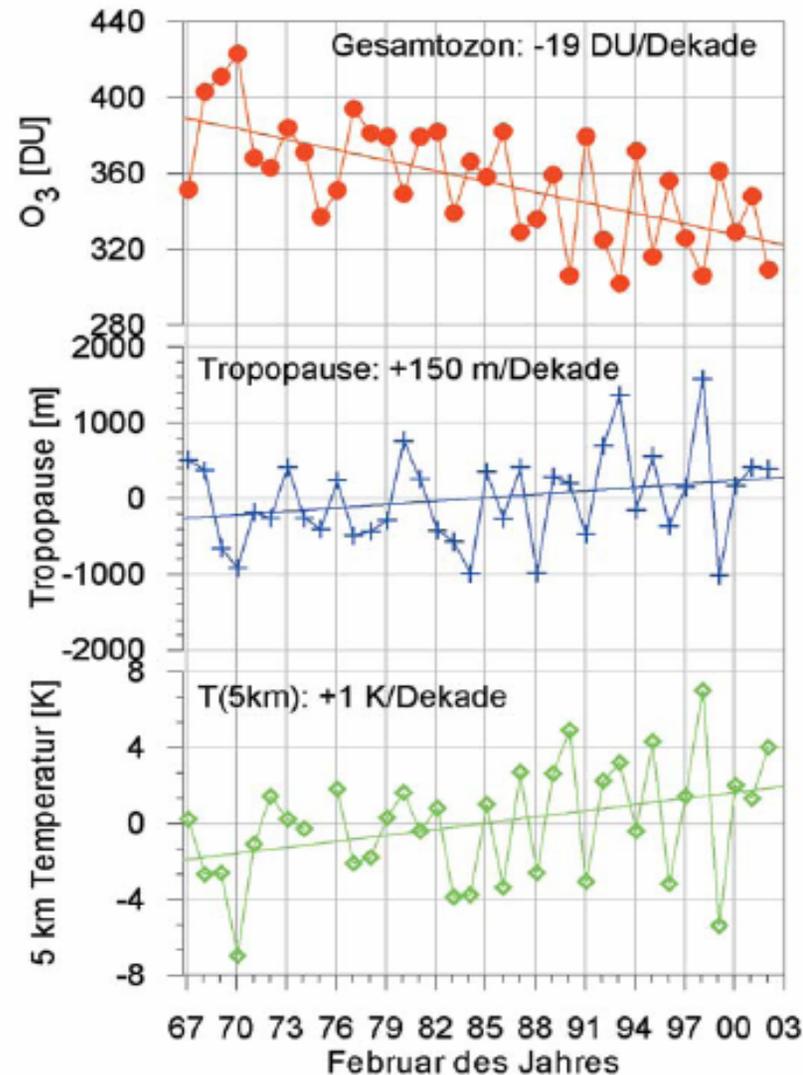


Abb. 3 Hohenpeißenberger Februar Monatsmittel des Gesamtozons, sowie Abweichung von Tropopausenhöhe und Temperatur in 5 km Höhe vom vieljährigen Mittel.

Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

- Diese langzeitlichen Änderungen sind ein Indiz für des Einfluss des Menschen auf das Klima (Santer et al., 2004) und haben möglicherweise einen Bezug zu der obigen konzeptionellen Abbildung.
- Trotzdem ist bisher nicht klar, wie diese Änderungen die dominierenden Transportwege von Luftmassen zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre auf synoptischer oder der Meso-Skala bisher beeinflusst haben oder in Zukunft beeinflussen werden.

Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

- Mögliche zukünftige Änderungen der Zirkulation in mittleren Breiten – Intensivierung der Brewer-Dobson Zirkulation (z.B. Butchart und Scaife, 2001), Änderungen der Aktivität synoptisch-skalige Eddies (z.B. Schneider, 2004), Änderungen der Konvektion in mittleren Breiten (z.B. IPCC, 2001) – würden wahrscheinlich alle zu Änderungen der Ozonkonzentration in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre führen.

Schneider, T., The tropopause and the thermal stratification in the extratropics of a dry atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 61, 1317-1340, 2004.

- Unser sehr begrenztes Wissen über die relevanten Prozesse im Bereich der ExTL verhindert eine solide Vorhersage der künftigen Entwicklung der ExTL.

Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

- Im besonderen sind die relativen Beiträge des isentropen (quasi-horizontalen) und konvektiven (vertikalen) Transports von troposphärischer Luft in die unterste Stratosphäre nur unzureichend bekannt, obwohl es Anzeichen dafür gibt, dass vertikales Mischen (sowohl konvektiv als auch durch Strahlung angetrieben) möglicherweise einen deutlichen Einfluss auf die großräumige Spurengasverteilung in der untersten Stratosphäre hat (Hegglin et al., 2005).

Hegglin, M.I., D. Brunner, T. Peter, J. Staehelin, V. Wirth, P. Hoor, und H. Fischer, Determination of eddy diffusivity in the lowermost stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13812, 2005.

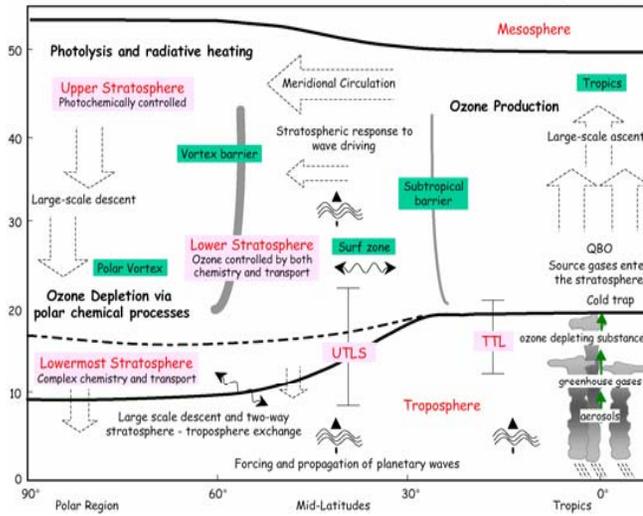
Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

- Wenn sich die Frequenz oder die Intensität der tiefen Konvektion in mittleren Breiten in einem zukünftigen, wärmeren Klima ändern würde, könnte dies die unterste Stratosphäre und damit die Ozonschicht in mittleren Breiten beeinflussen.
- Simulationen des 20. Jahrhunderts mittels der IPCC Klimamodelle (AOGCMs) zeigen generell eine Abnahme der Gesamtzahl extra-tropischer Stürme in beiden Hemisphären bei einem gleichzeitigen Ansteigen der Zahl der stärksten Stürme (Lambert und Fyfe, 2006).

Lambert, S.J., und J.C. Fyfe, Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: Results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise, *Clim. Dyn.*, 26 (7-8), 713-728, doi: 10.1007/s00382-006-0110-3, 2006.

Die extra-tropische Tropopausenschicht (ExTL)

- Vorhersagen der sich daraus abzuleitenden Auswirkungen für die Dynamik und die Chemie der ExTL erfordern weitere Untersuchungen, sie sind bisher nur unzureichend bekannt und verstanden.



Ende Kapitel 11