

Ozonforschungsprogramm

Prognosemodelle

Abschlußbericht

Globales Modell zur Vorhersage der Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht mit Berücksichtigung von Klimaeffekten und heterogener Chemie

Ch. Brühl, B. Steil

MPI für Chemie, Abt. Luftchemie, POB. 3060, 55020 Mainz

in Zusammenarbeit mit

E. Manzini

MPI für Meteorologie, Hamburg

M. Dameris, V. Grewe

DLR Oberpfaffenhofen

NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA

Universität Wuppertal

NASA JPL, California, USA

gefördert durch

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen 01 LO 9517/4

Projektzeitraum 1.10.1996 – 30.4.2000

August 2000

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Modellbeschreibung	3
Atmosphäre der neunziger Jahre, Validierung mit Satellitendaten	9
Atmosphäre der sechziger Jahre, Trends	41
Prognose für 2030	53
Zusammenfassung und Ausblick	65
Literatur	66

Es ist geplant, eine überarbeitete Version dieses Berichts bei *Journal of Geophysical Research* einzureichen.

1 Einleitung

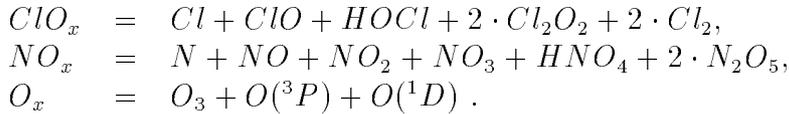
Ziel dieses Projektes war es, ein Modell zu entwickeln, das belastbare Aussagen über die Zukunft der Ozonschicht besonders über der Nordhemisphäre gestattet. Arbeiten an gekoppelten Chemie-Klima-Modellen sind weltweit im Gange, allerdings wurden bis jetzt meistens nur Integrationen über wenige Jahre durchgeführt oder das Modell lief als CTM, d.h. angehängt an meteorologische Analysen (z.B. Douglass et al, 1999; Eckman et al, 1996; Austin et al 1997). Shindell et al (1998) fanden in ihren Modellsimulationen, daß die Abkühlung der Stratosphäre und die Veränderung von Zirkulationsmustern durch die Zunahme von Treibhausgasen wie CO₂ eine Erholung der Ozonschicht durch Rückgang der Chlorkonzentration als Folge des Montrealer Protokolls zur FCKW-Beschränkung stark verzögert bzw. die Wahrscheinlichkeit antarktischer Verhältnisse im Norden erhöht. Das diesem Bericht zugrunde liegende Chemie-Klima-Modell für Troposphäre, Stratosphäre und Mesosphäre MA-ECHAM-CHEM ist wesentlich detaillierter als das für Shindell's Studien verwendete. Es gibt viele Gemeinsamkeiten zu der von Dameris et al (1998) für erste Prognosen verwendeten Version, die nur die Atmosphäre unterhalb 30km behandelt. Zur Validierung des hier vorgestellten Modells wurden umfangreiche Vergleiche mit Satellitenbeobachtungen von Temperatur und Spurenstoffen durchgeführt. Die in Kapitel 3 diskutierten Beispiele zeigen, daß das Modell sowohl die mittleren Verteilungen als auch die räumliche und zeitliche Variabilität zufriedenstellend wiedergibt. Hierzu wurden 15 Jahre Modellsimulation mit festen Randbedingungen mit 9 Jahren UARS-Satellitendaten und anderen Beobachtungen verglichen. Kapitel 4 zeigt die Veränderungen seit den sechziger Jahren im Vergleich mit Beobachtungen, wieder unter Verwendung eines 15-Jahre-Laufs mit den 'Vor-Ozonloch'-Randbedingungen. Die Rechnungen für die Zukunft in Kapitel 5 zeigen eine Zunahme der Variabilität in mittleren Breiten, aber keine erhöhte Wahrscheinlichkeit für ein Nordozonloch, im Gegensatz zu Shindell et al (1998). In der Antarktis sorgt der Rückgang des Chlors für einen Rückgang des Ozonlochs.

2 Modellbeschreibung

MA-ECHAM-CHEM ist ein spektrales allgemeines Zirkulationsmodell (GCM) mit interaktiver Chemie vom Boden bis in etwa 80km Höhe basierend auf der 'Middle Atmosphere version of the European Center model in HAMBURG' (Roeckner et al, 1996). Die horizontale Auflösung ist T30 oder etwa 6°, die vertikale in der freien Atmosphäre etwa 2 – 3km (39 Schichten, σ -p-System bis 0.01hPa). Der Zeitschritt für die Integration der Meteorologie ist 15 Minuten, prognostische Variablen sind: Vorticity und Divergenz des Windfeldes, Boden- druck, Temperatur, Wasserdampf, Wolkenwasser und chemische Spurenstoffe. Das Modell enthält die Schwerewellenparametrisierung von Manzini und McFarlane (1998) in leicht modifizierter Version (1998), die dafür sorgt, daß die Temperaturen und die mittlere Zirkulation in der Stratosphäre etwa den Beobachtungen entsprechen. Die Advektion von Spurenstoffen erfolgt mit dem massenerhaltenden Flußschema Spitfire (Rasch und Lawrence, 1998) auf einem zum Spektralschema passenden Gitter mit Auflösung $3.75^\circ \times 3.75^\circ$. Mit diesem Schema lassen sich beobachtete filamentartige Strukturen sowie die starken Spurenstoffgradienten an den Rändern der Polarwirbel reproduzieren.

Die folgenden 18 Spurenstoffe und Stofffamilien werden transportiert (Steil et al, 1998):

N_2O , CH_4 , H_2 , CO , CH_3O_2H , H_2O_2 , HCl ,
 $ClONO_2$, $F11$, $F12$, CH_3Cl , CH_3CCl_3 , CCl_4 ,
 HNO_3 + Typ I PSC ($NAT : HNO_3 \times 3H_2O$),
Typ II PSC (Eis),



Diagnostisch berechnet werden

Methanoxidation: CH_2O , CH_3O_2 , CH_3O
und: $HO_x = H + OH + HO_2$

Diese kurzlebigen Spurenstoffe sowie die Familienbestandteile werden analytisch bzw. durch implizite numerische Integration der zugehörigen chemischen Differentialgleichungen bestimmt. Das System enthält insgesamt 110 photochemische Reaktionen, Photolyseraten werden 'on-line' mit dem schnellen aber genauen Schema von Landgraf und Crutzen (1998), das die berechneten Veränderungen bei Wolken und Ozonsäulen berücksichtigt, berechnet. Das Schema enthält eine auf Krämer et al (2000) zurückgehende Extrapolation für sehr tiefe Sonnenstände bis zu Zenitwinkeln von 94° , was vor allem im Polarfrühling wichtig ist. Bei langlebigen Quellgasen werden die Mischungsverhältnisse am Boden vorgegeben, bei kurzlebigen Emission und Trockendeposition. Am Oberrand des Modells gilt außer für NO_x , daß kein vertikaler Fluß vorhanden sein soll. Bei NO_x wird zur Berücksichtigung der Quelle in der Thermosphäre am Oberrand und in der Schicht darunter die von UARS/HALOE (Gordley et al, 1996) beobachtete Verteilung mit Breite, Höhe und Jahreszeit vorgegeben. Diese Randbedingung sorgt in den Abwindgebieten der Polarwirbel auch für Verbesserungen bei NO_y in der unteren Stratosphäre. Heterogene Chemie auf polaren Stratosphärenwolken (PSC) und stratosphärischem Sulfataerosol einschließlich des Effekts der Sedimentation von Eispartikeln ist enthalten. Es werden nur feste PCS-Partikel (Salpetersäuretrihydrat [NAT] und Eis) berücksichtigt, ihre Oberflächen ergeben sich bei vorgegebener Anzahlkonzentration aus Temperatur, Wasserdampf- und HNO_3 -Konzentration nach Hanson und Mauersberger (1988). Brühl et al (1998b, 1998c) zeigten durch Vergleich von Boxtrajektorienrechnungen und Satellitendaten, daß man großräumig und über Zeitskalen von Monaten im Hinblick auf die chemische Ozonzerstörung in den Polargebieten mit dem alten 'klassischen' Schema zu ähnlichen Resultaten kommt wie mit einem Schema, das auch flüssige PSC-Partikel aus ternären Lösungen berücksichtigt. Das chemische Lösungsverfahren gestattet einen Zeitschritt von 45 Minuten bei im Vergleich zu quasi-exakten aber extrem aufwendigen Verfahren (z.B. FACSIMILE, Curtis und Sweetenham, 1987) hoher Genauigkeit und ist damit extrem effizient.

Das Modell ist voll interaktiv, d.h. Veränderungen bei der Chemie bewirken Veränderungen bei Strahlungserwärmungsraten und Dynamik und umgekehrt. Da ein frei laufendes gekoppeltes GCM besonders im Winter und Frühling hoher und mittlerer Breiten eine starke Variabilität zwischen einzelnen Jahren zeigt, ist es erforderlich, sowohl bei den Rechnungen als den Beobachtungen einen längeren Zeitraum mit festen Randbedingungen auszuwerten und ähnliche Situationen zu vergleichen. Man darf nicht erwarten, daß die Folge von kalten und warmen Wintern zwischen Modell und Beobachtungen übereinstimmt, wohl aber die Häufigkeit bestimmter Muster. Die Randbedingungen dieser sogenannten 'Zeitscheibenexperimente' sind in Tabelle 1 gegeben.

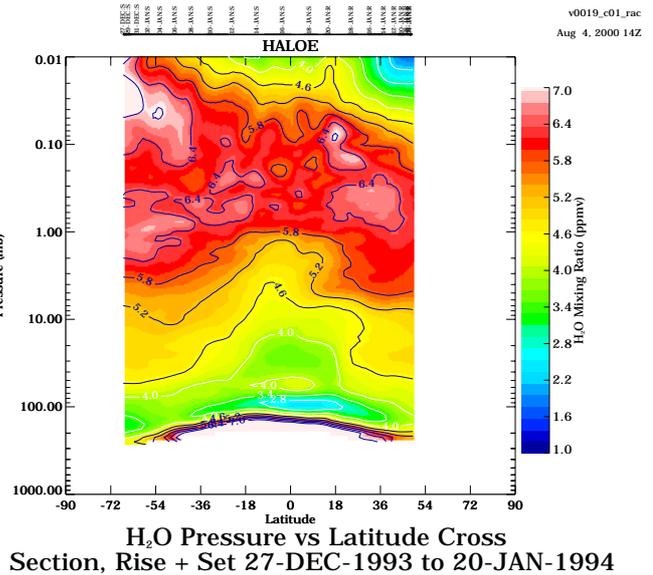
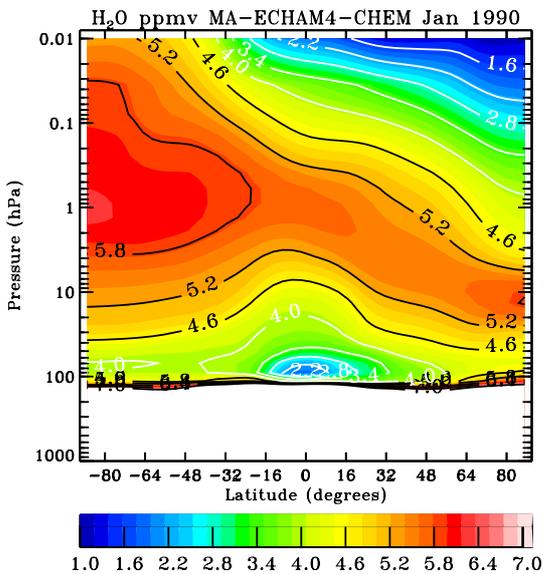
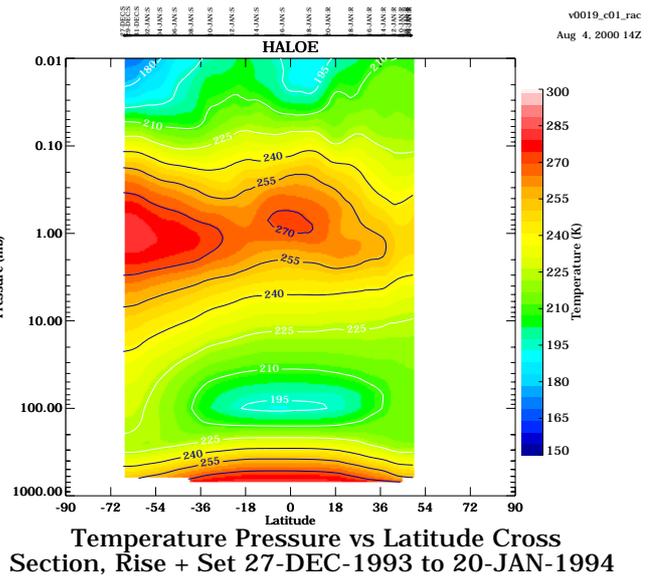
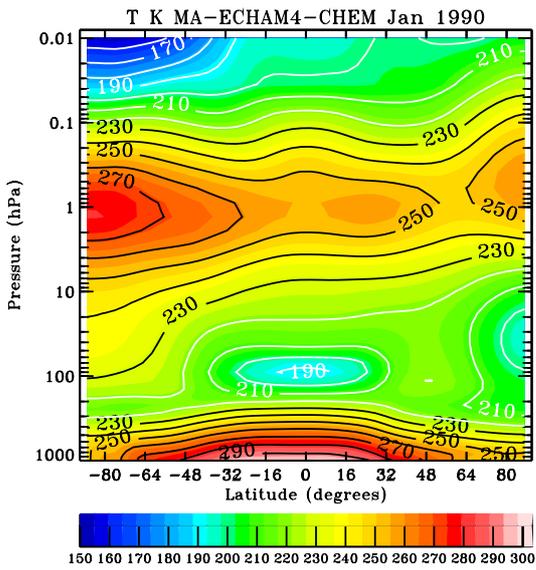
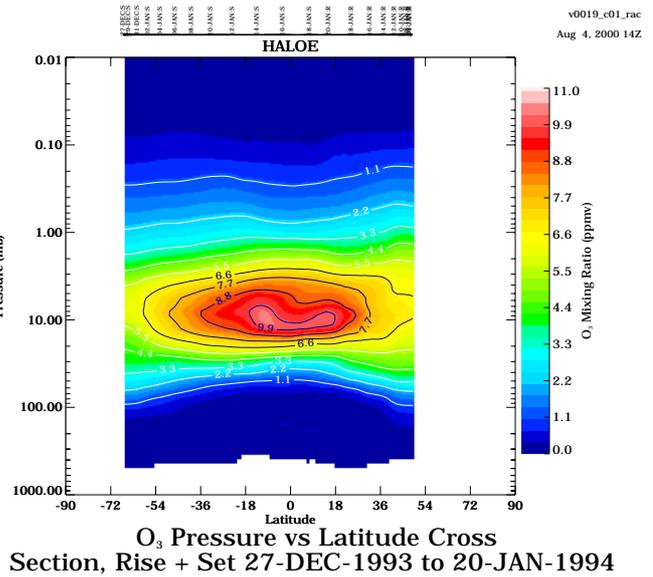
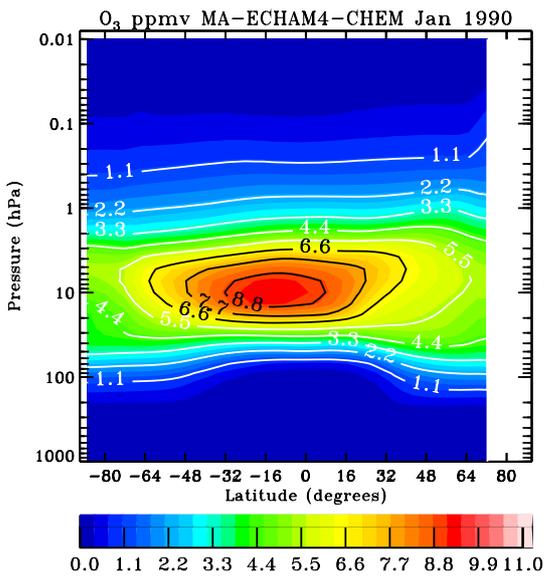


Bild 1a: Mit MA-ECHAM-CHEM berechnete 15-Jahres-Mittel für Januar im Vergleich zu UARS-HALOE-Beobachtungen, Ozon, Temperatur und Wasserdampf; Höhe gegen geographische Breite.

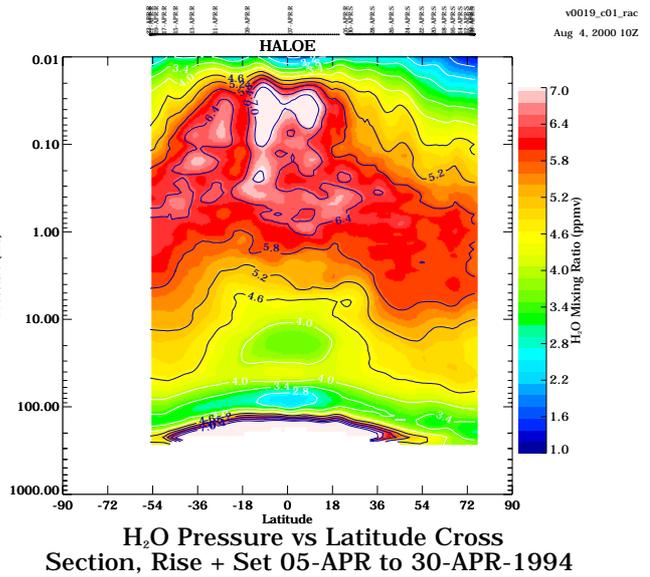
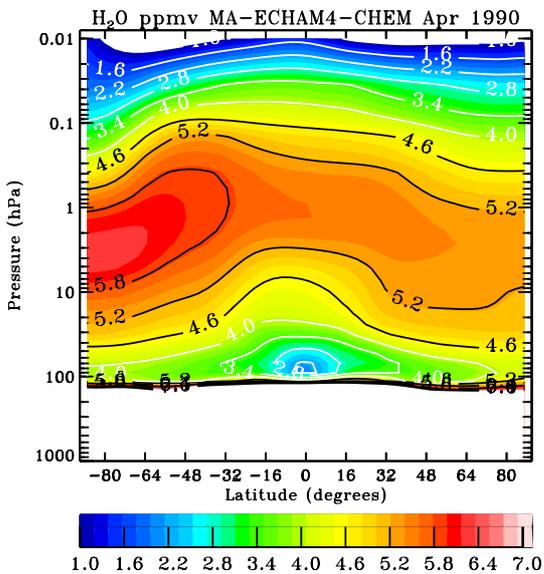
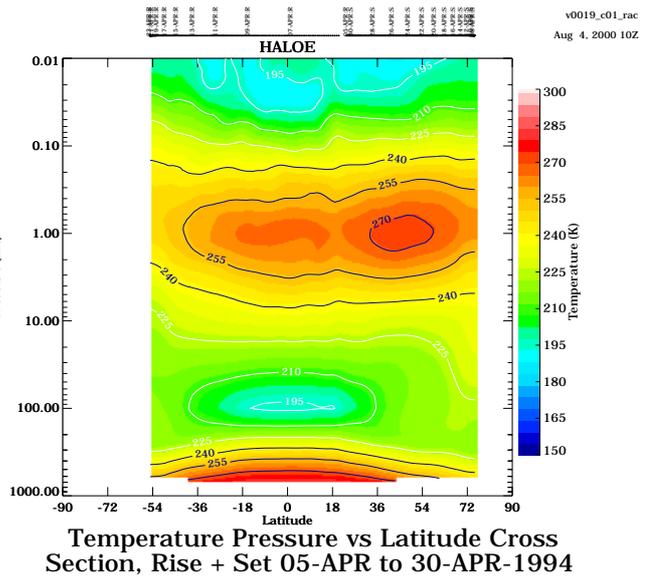
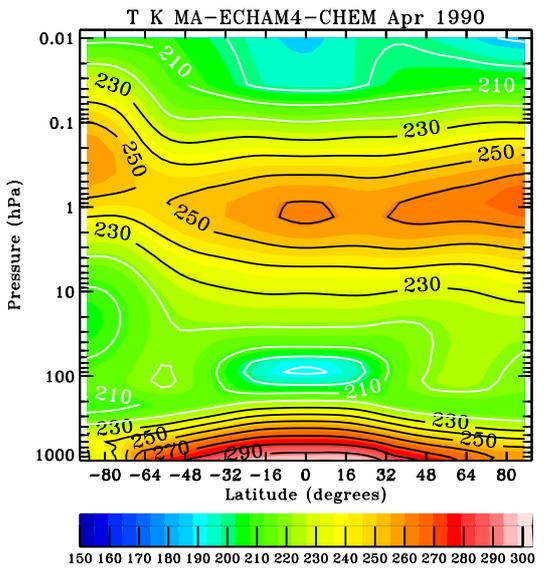
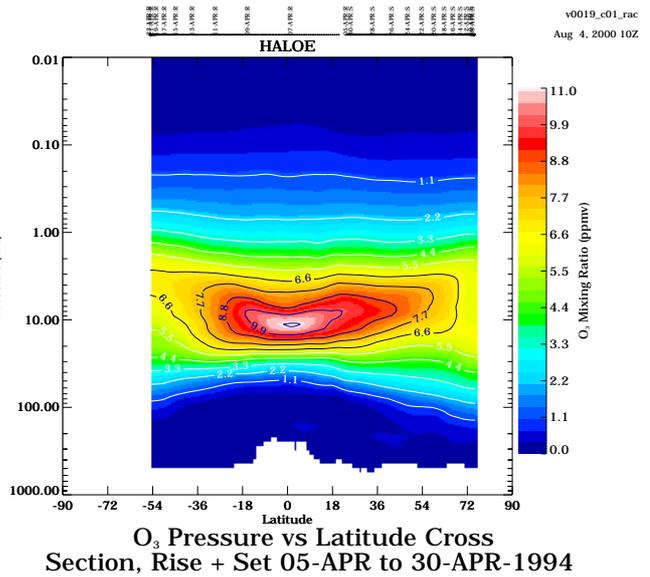
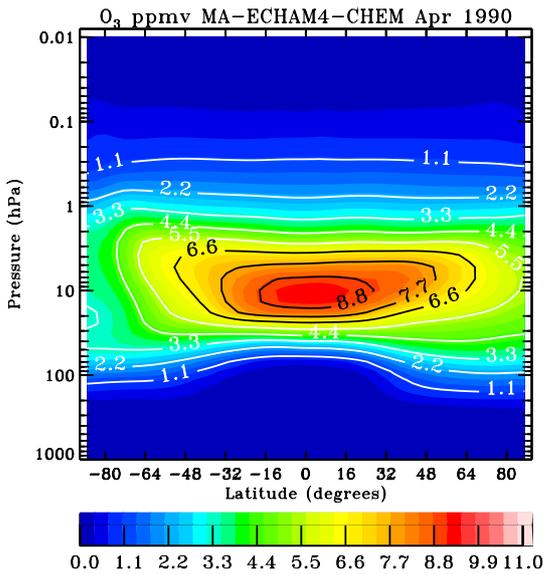


Bild 1b: Wie 1a, aber April.

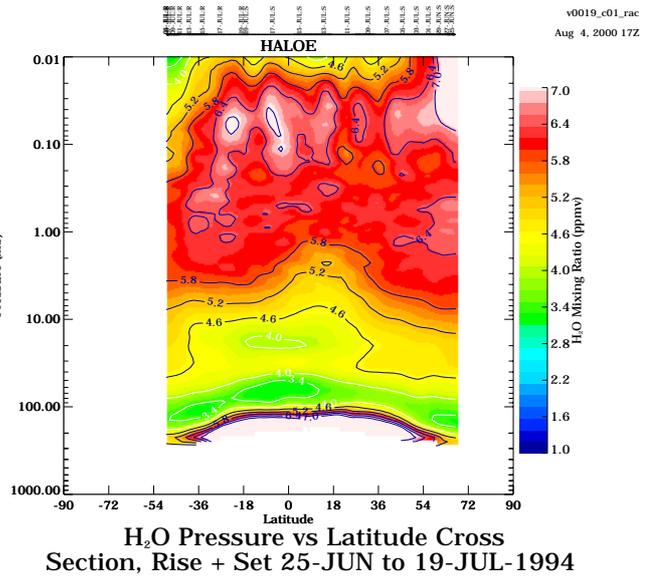
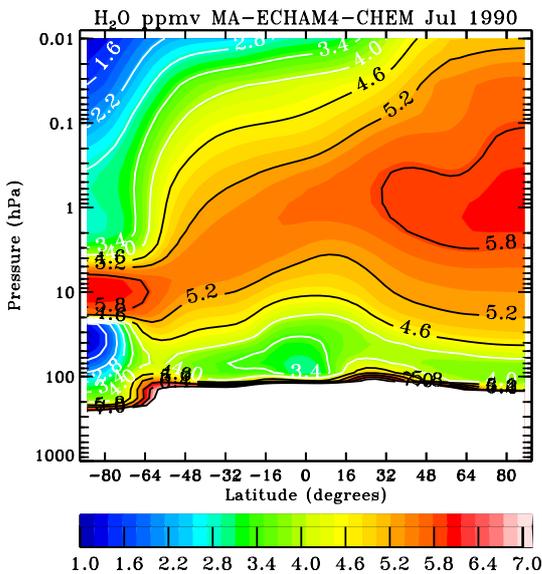
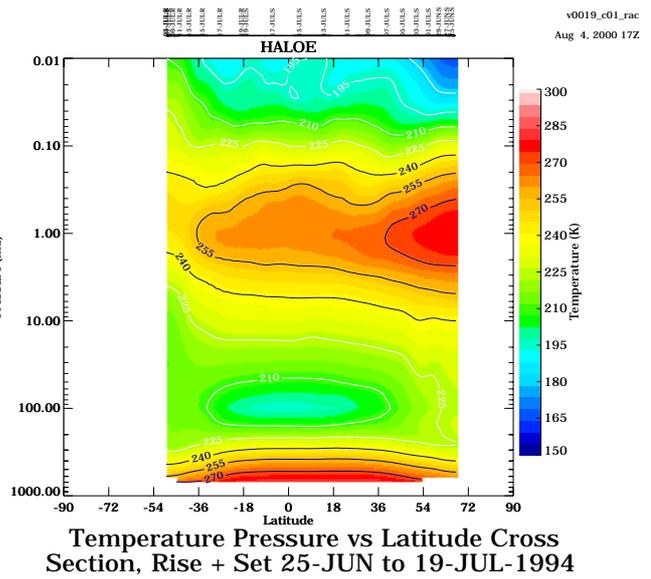
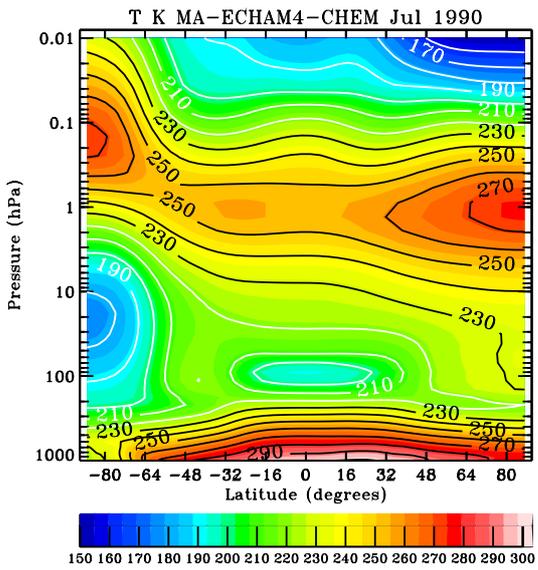
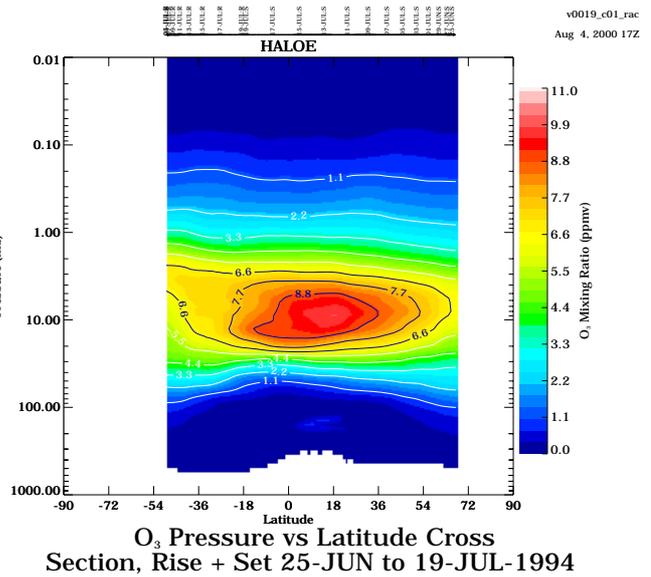
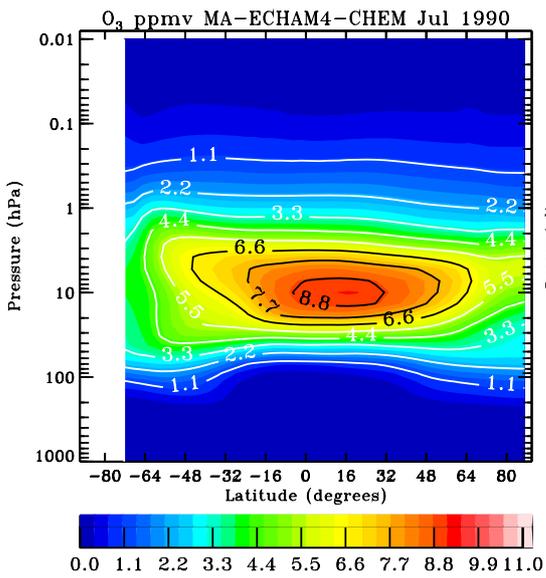


Bild 1c: Wie 1a, aber Juli.

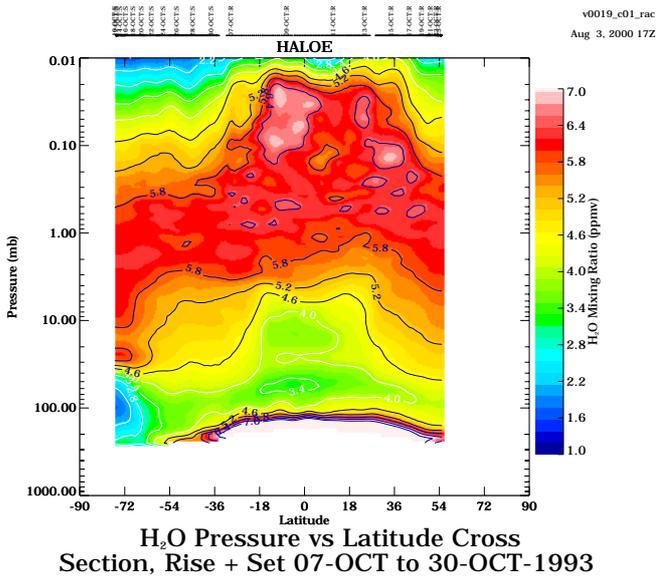
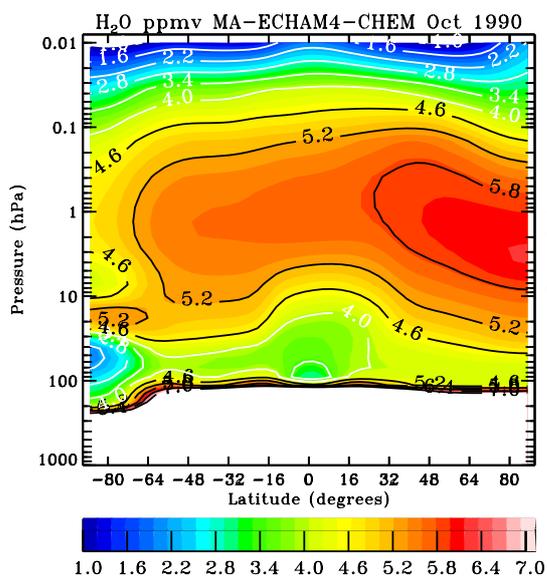
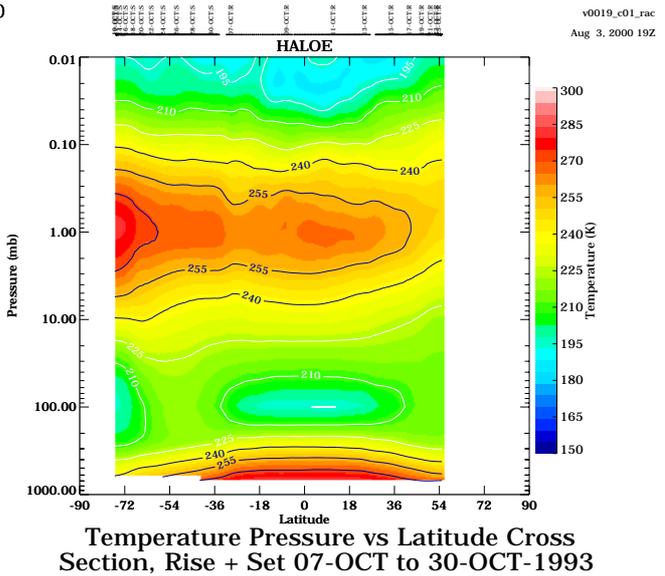
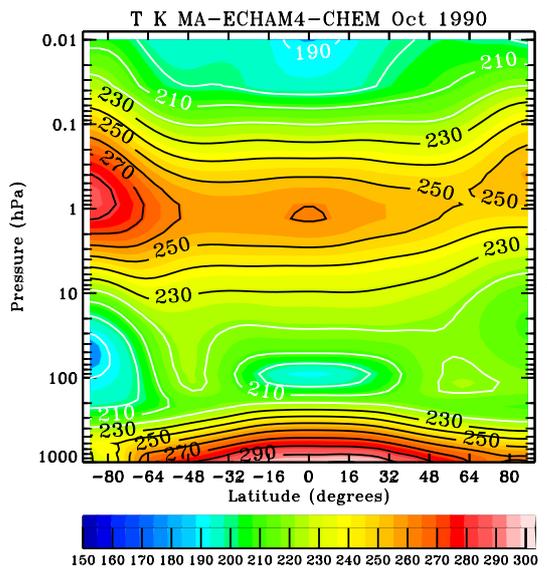
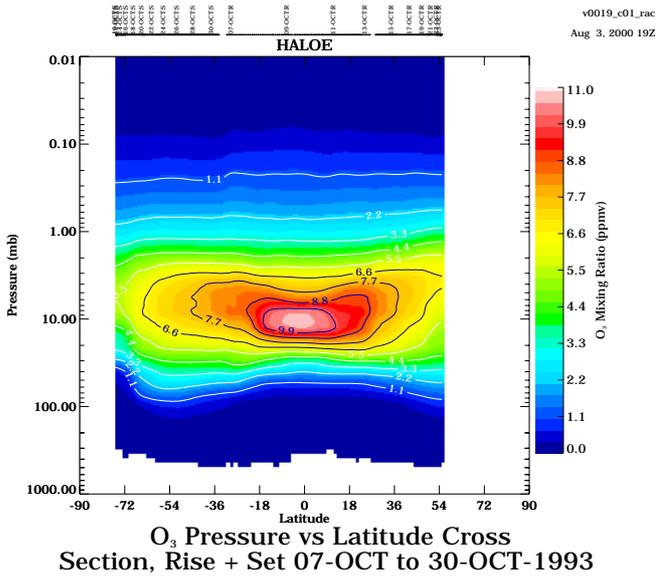
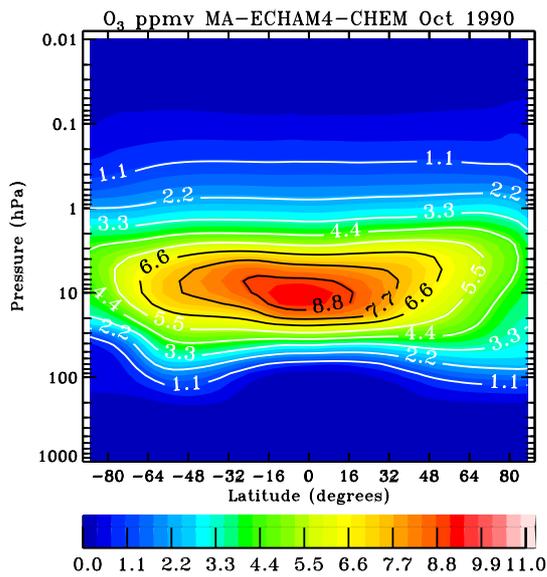


Bild 1d: Wie 1a, aber Oktober.

Tabelle 1: Untere Randbedingungen für Szenarienrechnungen der folgenden Kapitel:

	1960 15 a	1990 15 a	2030 15 a
SST (Meeresoberflächentemperatur)	GISS, HADLEY ¹ 1951 – 1960 Beobachtungen	AMIP ² 1979 – 1980 Beobachtungen	OPYC(2030-1990) ³ + AMIP AOGC Modell
Mischungsverhältnisse am Boden	WMO 1999		
CH ₄	1.26 ppmv	1.69 ppmv	1.90 ppmv
N ₂ O	295 ppbv	310 ppbv	350 ppbv
organisches Chlor	0.8 ppbv	3.4 ppbv	2.7 ppbv
CO ₂	317 ppmv	353 ppmv	446 ppmv

1: Rayner et al, Hadley Center internal note 69, 1995.

2: <http://www-pcmdi.llnl.gov/amip/AMIP2EXPDSN/BCS>.

3: Roeckner et al., 1999.

3 Atmosphäre der neunziger Jahre, Validierung mit Satellitendaten

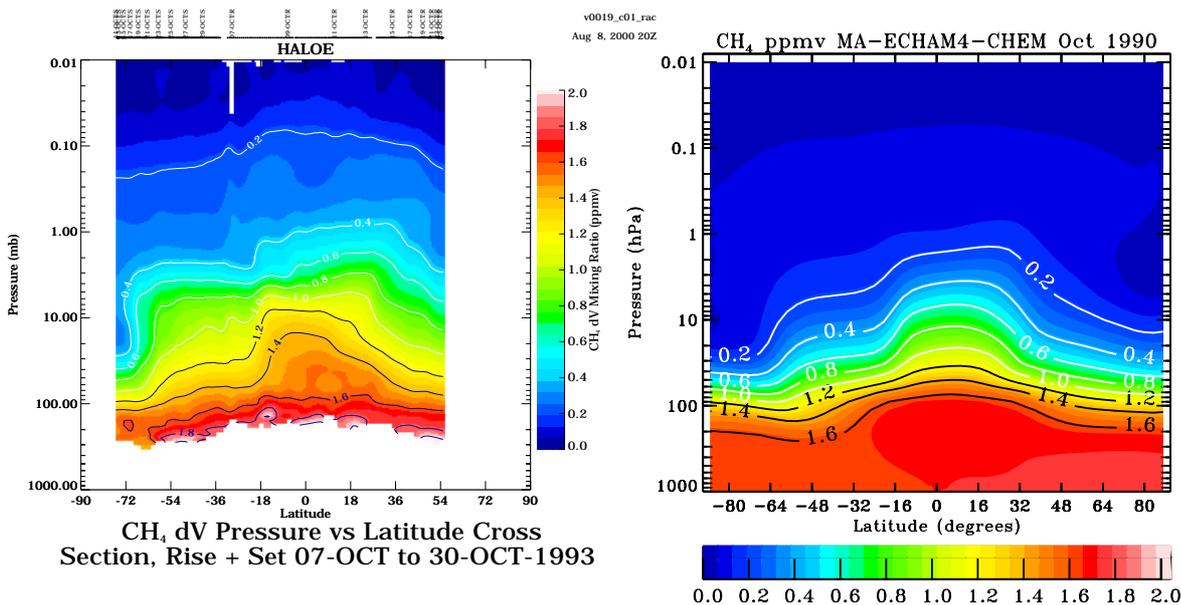


Bild 2: Modelliertes (15-Jahre-Mittel) und von HALOE beobachtetes Methan im Oktober.

Zum Vergleich mit Satellitenbeobachtungen wurden 15 Jahre Modellrechnungen mit den Randbedingungen für etwa 1990 aus Tabelle 1 sowohl für Einzeltage als auch für Monatsmittel und Standardabweichungen ausgewertet. Zum 'Einschwingen' des gekoppelten Modells wurden davor 4 Jahre gerechnet. Bild 1 zeigt für 4 Jahreszeiten die berechnete Höhenverteilung von Ozon, Temperatur und Wasserdampf im zonalen 15-Jahres-Mittel im Vergleich zu Beobachtungen mit dem HALogen Occultation Experiment HALOE; Russell et al, 1993; Brühl et al, 1996) auf dem Upper Atmosphere Research Satellite (UARS). Die bei HALOE ausgewählten Jahre sind typisch und hinsichtlich der Phase des 'Quasi-Biannual-Oszillation'

in den Tropen passend zum Modell, das permanent in der Ostphase ist. Man sieht, daß das Modell bei Temperatur und Ozon nahe bei den Beobachtungen liegt, der vor allem in der Südhemisphäre ausgeprägte 'Cold-Bias' älterer Versionen in der mittleren Stratosphäre nahe des Pols ist praktisch verschwunden (vgl. Manzini et al, 1998). Im Oktober sieht man das antarktische Ozonloch. Wasserdampf in der unteren Stratosphäre ist etwa richtig, während er weiter oben um etwa 10% unteschätzt wird, was mit zuwenig Transport von Methan in die obere Stratosphäre durch zu starke numerische Diffusion von den Tropen in mittlere Breiten in der unteren Stratosphäre zusammenhängt (Bild 2). Die hohen H₂O-Werte bei HALOE in der Mesosphäre hängen entweder an Unsicherheiten in der Invertierung oder kommen durch eine Quelle durch Meteoriten (sehr umstritten, z.B. Summers et al., 1997), die im Modell nicht enthalten ist. Das Transportproblem in der subtropischen unteren Stratosphäre sieht man auch bei Ozon in den Tropen und bei den Stickoxiden, die aufgrund von zuwenig N₂O-Eintrag in der mittleren Stratosphäre etwas zu niedrig sind (Bild 3), sowie an den zu geringen Gradienten im Bereich der subtropischen Barriere beim Wasserdampf (Bild 1). HCl einschließlich der Verringerung durch Chloraktivierung an polaren Stratosphärenwolken in der Antarktis wird etwa wiedergeben. Allerdings erfolgt die Rückbildung von HCl im antarktischen Polarwirbel nach der Ozonerstörung und der Verdunstung der PSCs im Modell etwas später als in den Beobachtungen (Bild 4).

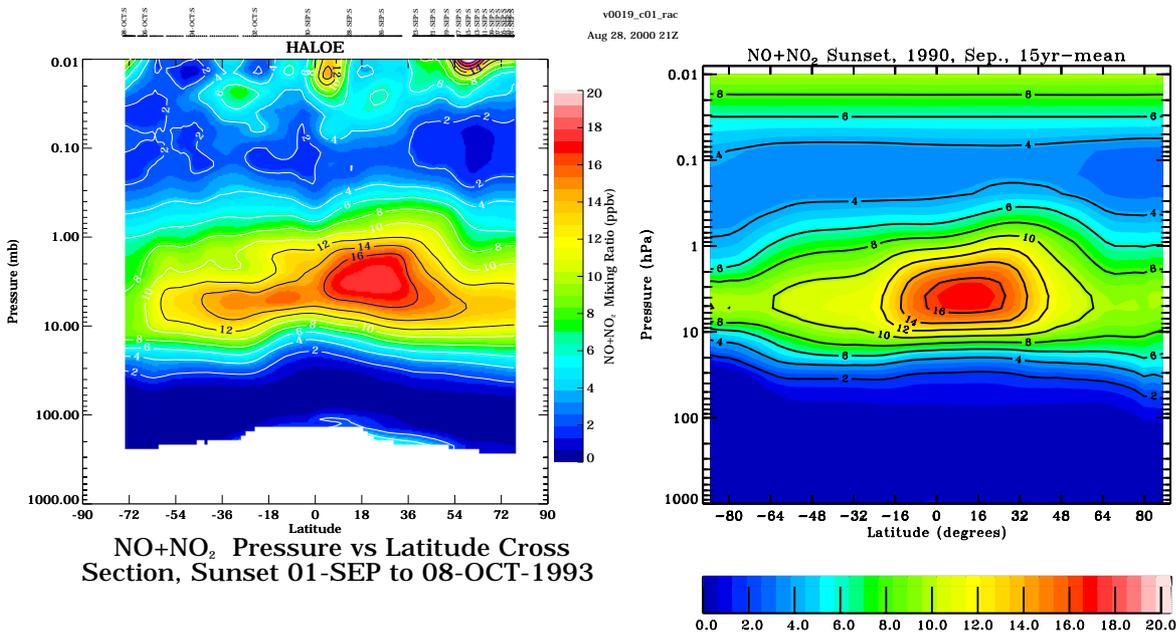


Bild 3: Modelliertes und beobachtetes NO_x, Sonnenuntergang, Folge der Tage zum Bildaufbau im Modell wie bei HALOE (rechts 1. September, links 8. Oktober).

Der modellierte Aufwärtstransport in den Tropen ist offenbar realistisch, wie die vertikale Fortpflanzung des jahreszeitlichen Signals im stratosphärischen Wasserdampf (tropical tape-recorder, Mote et al, 1998) im Vergleich zu HALOE-Beobachtungen zeigt (Bild 5). An diesem Bild sieht man deutlich, daß das Modell die 'Quasi-Biannual Oszillation' nicht enthält, das Modell simuliert nur die Jahre, wo sich das Signal schnell nach oben fortpflanzt. Das Modell reproduziert jedoch die von CRISTA (Riese et al, 1999) beobachteten filamentartigen Strukturen in der mittleren Stratosphäre mittlerer Breiten, die sogenannten Streamer, wie Bild 6 am Beispiel von Ozon zeigt. Das im Bild ausgewählte Einzeljahr aus dem Modellauf zeigt die beste Übereinstimmung auf beiden Hemisphären, der Streamer an der Ostküste Asiens tritt mehr oder weniger stark ausgeprägt in Abhängigkeit vom Polarwirbel (lila in Bild 6) in

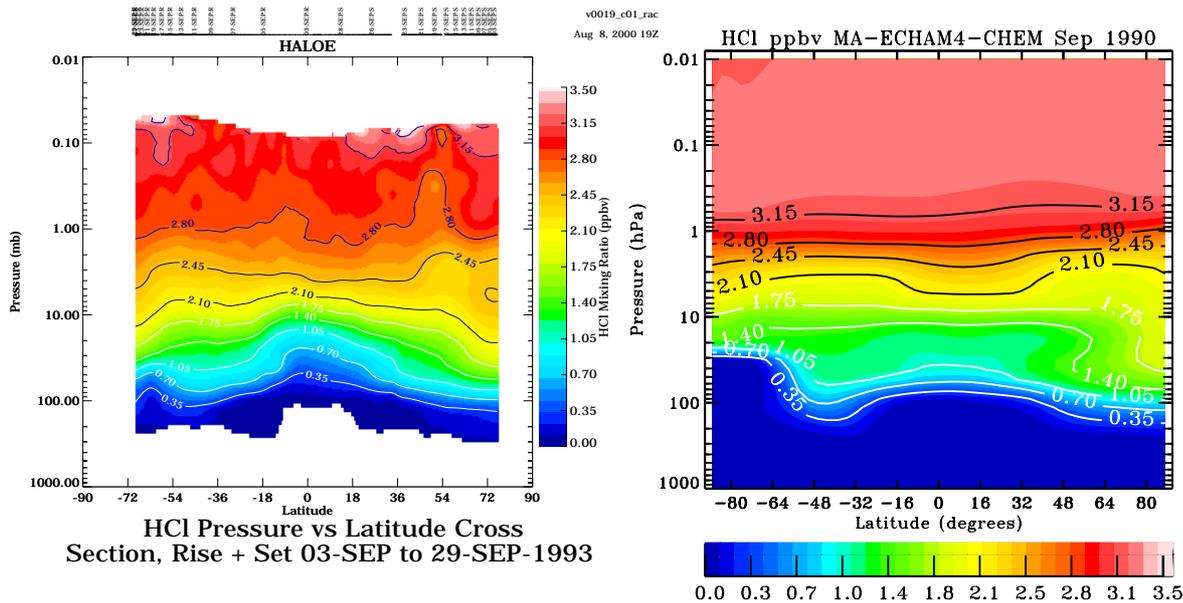


Bild 4: Modelliertes (15-Jahre Mittel) und beobachtetes HCl im September.

allen Jahren auf.

Zum Vergleich der Variabilität zwischen einzelnen Jahren in Modell und Beobachtungen wird zunächst die Spätphase des antarktischen Ozonlochs am Beispiel der 70hPa-Fläche (ca 18km) analysiert. Dieser Zeitpunkt ist auch im Hinblick auf die Rückkopplungen zwischen Ozon, Strahlung und Dynamik interessanter als eine Situation anfang Oktober, die aufgrund von weniger Sonnenstrahlung und tieferen Temperaturen weniger Variabilität zeigt. Bild 7 zeigt 3 Beispiele für HALOE-Beobachtungen ende Oktober / anfang November, Bild 8 im Vergleich dazu 15 verschiedene Realisationen von MA-ECHAM-CHEM, ergänzt um berechnetes ClONO_2 und ClO_x ($=\text{ClO}+\text{Cl}_2\text{O}_2+\text{Cl}+\text{HOCl}+\text{Cl}_2$, aktives Chlor).

Man sieht, daß die Modelltemperaturen nahe des Pols dazu tendieren, etwas zu niedrig zu sein, was dazu führt, daß sich in einzelnen Jahren PSCs bis zum 1. November halten und HCl niedrig halten bei erhöhtem aktiviertem Chlor. Das Modell reproduziert aber den starken HCl-Anstieg im Polarwirbel in Gebieten mit fast vollständiger Ozonzerstörung wo fast alles Chlor in Form von HCl vorliegt. ClONO_2 ist maximal am Rande des Polarwirbels im Einklang mit Beobachtungen der CLAES-Instruments auf UARS. Größe und Variabilität des 'Ozonlochs' entsprechen etwa den Beobachtungen, ebenso der Wasserdampf einschließlich der Dehydrierung über das Ausfallen von Eispartikeln. Methan ist im Polarwirbel generell zu niedrig als Konsequenz des Transportproblems an den subtropischen Barrieren, das schon im Zusammenhang mit den zonalen Mitteln erwähnt wurde. Aus diesem Grunde ist auch HNO_3 im Wirbel gegenüber den Beobachtungen des Microwave Limb Sounders auf UARS (MLS, Santee et al, 1995, 1999) etwas erniedrigt (Bild 9 und 10). Man beachte aber, daß sowohl bei den Beobachtungen als auch im Modell noch HNO_3 als NAT-PSC vorliegt und auch die modellierte Denitrifizierung durch Partikelsedimentation richtig erscheint.

In der Nordhemisphäre ist der März am interessantesten, da dann ausreichend Sonnenlicht vorhanden ist, um bei aktiviertem Chlor Ozon zu zerstören. In diesem Monat ist die Variabilität zwischen den Jahren sehr hoch. Bild 11a zeigt Beobachtungen der Temperatur von 1993 bis 2000 an den Stellen der HALOE-Messungen, Bild 11b und 11c die dazugehörigen ECHAM-Resultate für den 13. und 29. März. Wie man sieht, reproduziert das Modell sowohl kalte als auch warme Winter, einschließlich 'major warmings'. Die Lage des Polarwir-

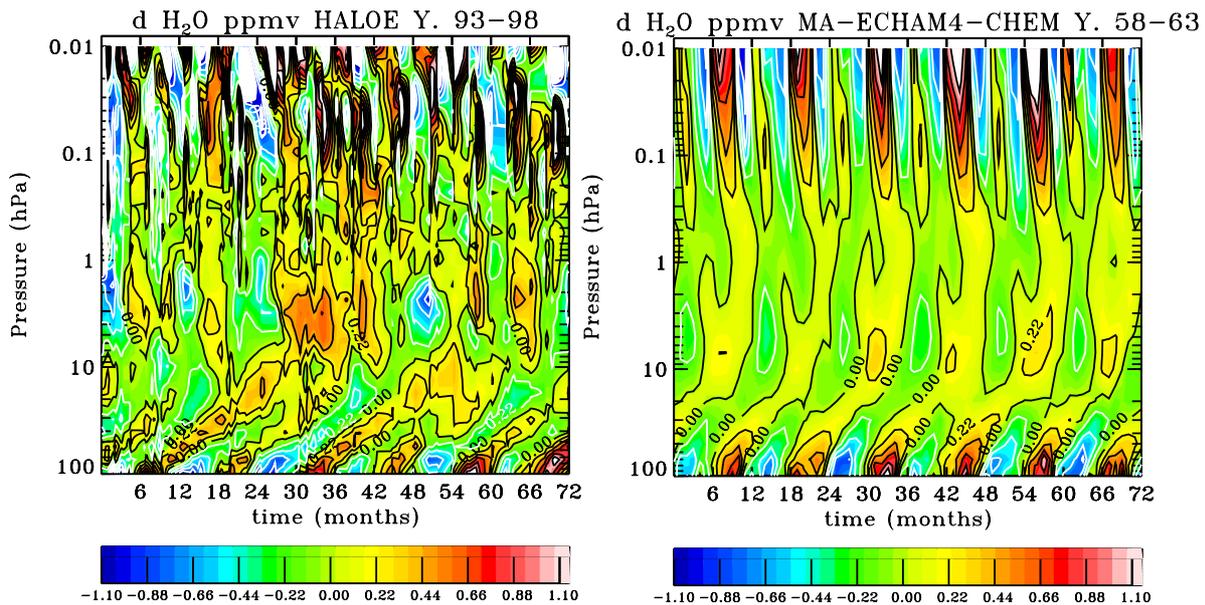


Bild 5: 'Tape recorder' beim tropischen Wasserdampf nahe des Äquators: beobachtete und modellierte Abweichungen vom Mittelwert in der entsprechenden Höhe für 6 Jahre.

bels ist wie bei den Beobachtungen vorzugsweise im europäischen Sektor. Bild 12a zeigt das zugehörige von HALOE beobachtete Ozon, Bild 12b und c die Modellresultate. Bei warmen Wintern (1998, 1999) sieht man gute Übereinstimmung während bei kalten Wintern die modellierte Ozonerstörung etwas zu langsam ist, was zum einen damit zusammenhängt, daß im Modell keine Bromchemie ist, aber auch damit, daß man im Modell wegen den Problemen mit der subtropischen Barriere mit zu hohen Ozonwerten startet. Im Modelljahr 66 ergibt sich eine Situation ähnlich wie 1997 beobachtet, wo sich der Polarwirbel bis Ende April hält und eine starke Ozonerstörung in Polnähe stattfindet, also sozusagen ein 'Nordozonloch'. Die Entwicklung sieht man deutlich bei Vergleich von Bild 12 b und c, mitte April sind die Ozonwerte so niedrig wie von HALOE 1997 und 1996 beobachtet. Die modellierte Verteilung der Chlorkomponenten paßt zu den Satellitendaten und den Beobachtungen bei den europäischen Polarkampagnen. Bild 13a zeigt dazu HALOE-HCl, Bild 13b für den 29. März modelliertes HCl, Bild 13c modelliertes aktiviertes Chlor und Bild 13d Chlornitrat. Man sieht deutlich, daß wie in den Beobachtungen Chlornitrat im Nordfrühling die dominante Komponente ist im Gegensatz zur Antarktis. Man beachte hier wieder die starke Chloraktivierung im Modelljahr 66 wo sich auch die PSCs bis in den April halten. In diesem kalten Jahr sieht man auch Dehydrierung oder zumindest vorübergehende Eisbildung, während in den anderen Jahren H_2O wie bei den Beobachtungen maximal im Bereich des Polarwirbels ist (Bild 14a und b). Bei HNO_3 hat man im Vergleich mit MLS-Beobachtungen wie in der Antarktis das Problem, daß NO_y bedingt durch zu große Durchlässigkeit der subtropischen Barriere (numerische Probleme?) für N_2O zu klein ist (Bild 15a,b). Sowohl in den Beobachtungen als auch Modell sind Gebiete, wo HNO_3 in PSC-Partikeln gebunden oder ausgefallen ist. Das Transportproblem sieht man deutlich an zu niedrigem Methan im Polarwirbel (Bild 16a und b). Teilweise könnte es damit zusammenhängen, daß die QBO nicht erfaßt wird.

Die langsame Ozonabnahme in der unteren und mittleren Stratosphäre durch Stickoxide im Sommer hoher und mittlerer Breiten (Brühl et al, 1998; Brühl und Crutzen, 2000), die auch für den Jahresgang des Gesamt Ozons verantwortlich ist, wird vom Modell wiedergegeben. Aus Bild 17 sieht man deutlich sowohl in den Satellitendaten als auch dem Modell

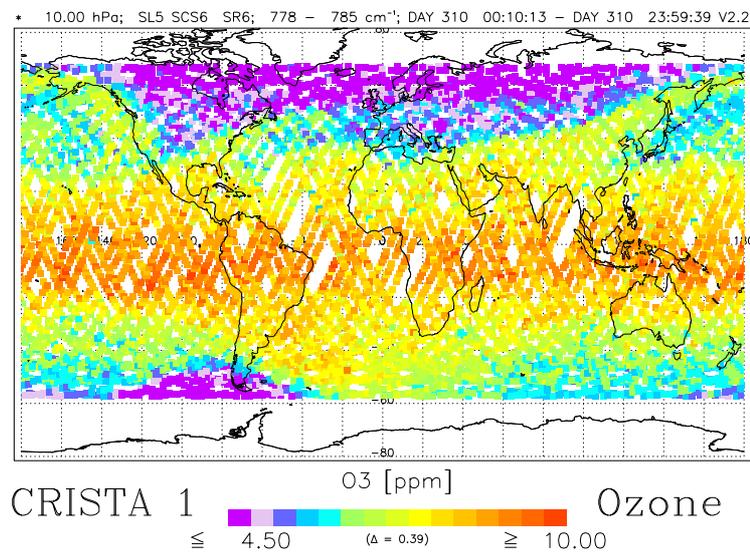
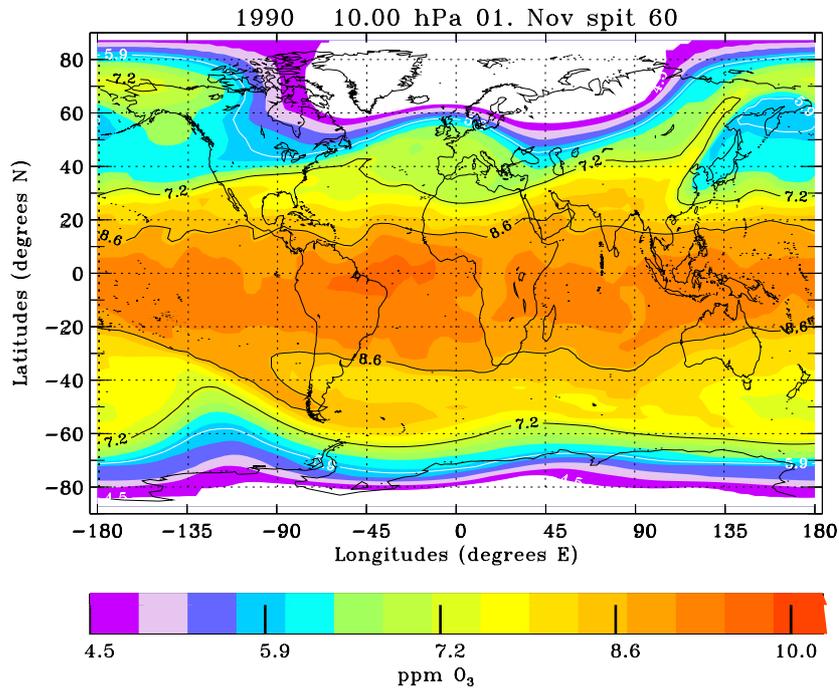


Bild 6: Mit MA-ECHAM-CHEM berechnete Ozonverteilung auf der 10hPa-Fläche (ca 30km) am 1. November (ausgewählt aus 15 Einzeljahren) im Vergleich zu CRISTA-Beobachtungen im November 1994 (lila für weniger als 4.9ppm O₃, Polarwirbel).

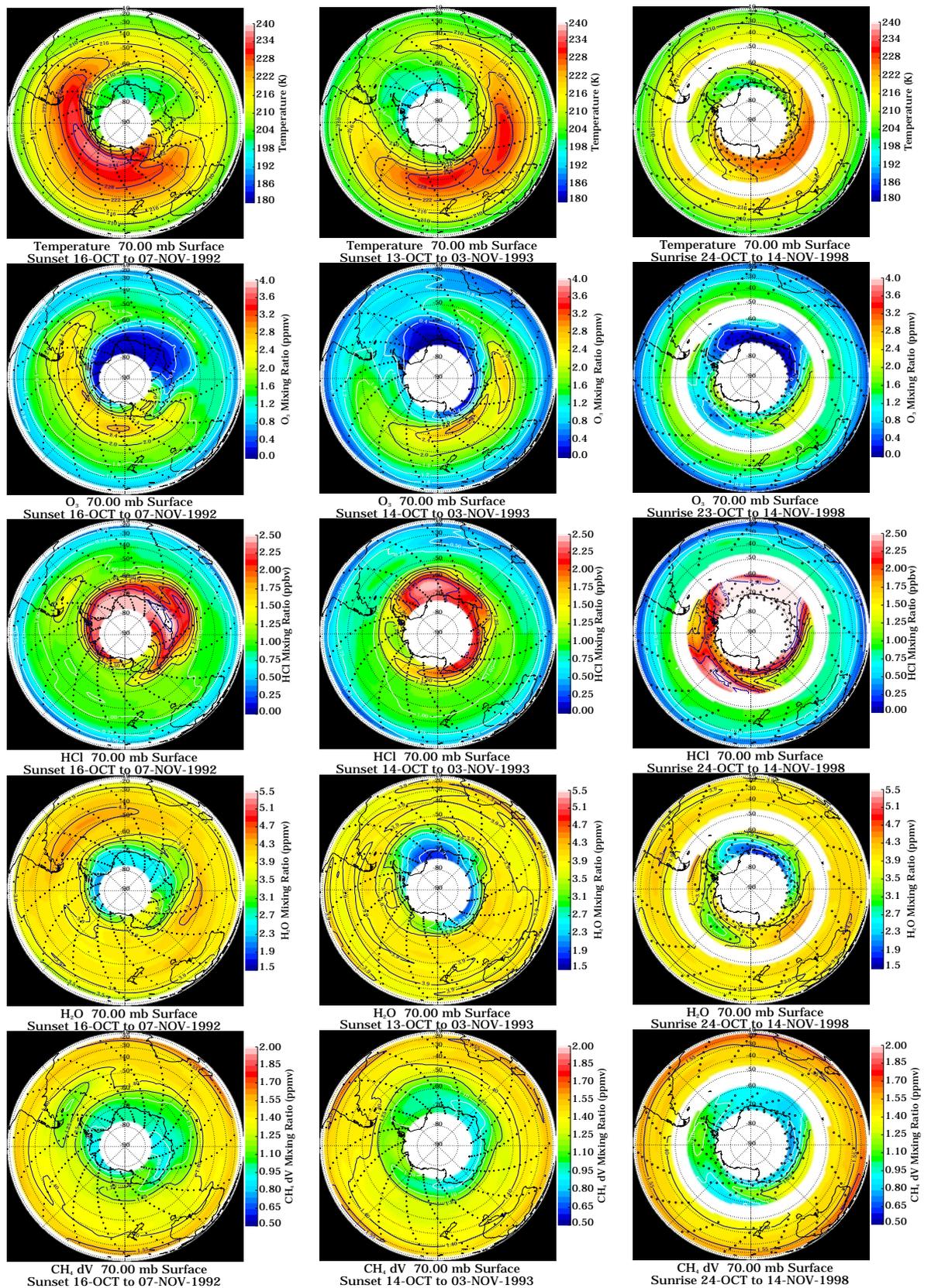
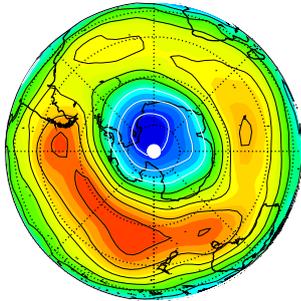
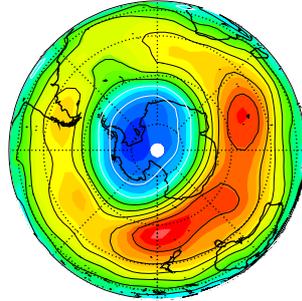


Bild 7: HALOE-Beobachtungen aus der Spätphase des antarktischen Ozonlochs, 70hPa-Fläche. Beobachtungen beginnen in hohen Breiten in 1992 und 1993 und in niederen Breiten in 1998. Weiße Flächen sind Datenlücken.

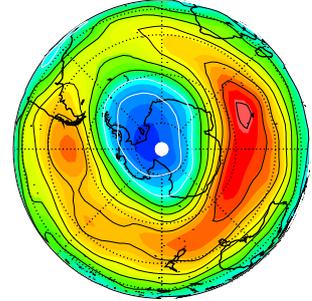
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y57



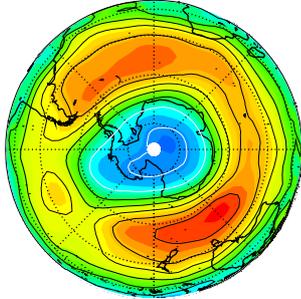
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y58



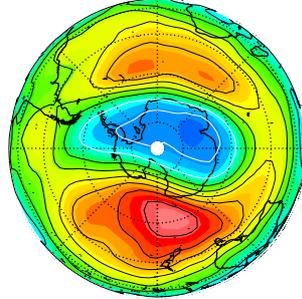
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y59



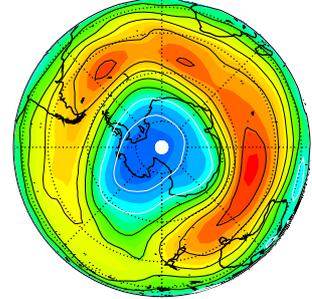
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y60



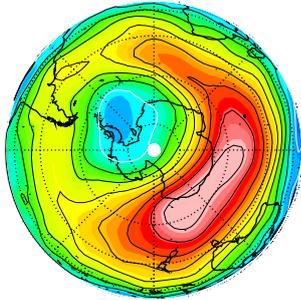
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y61



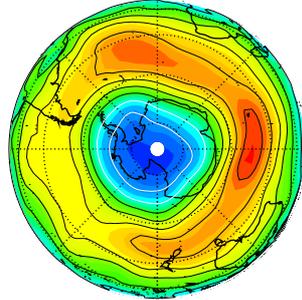
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y62



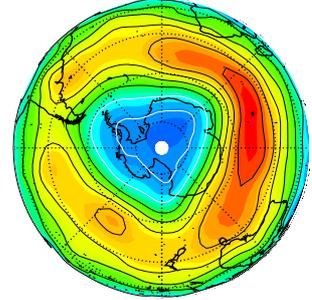
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y63



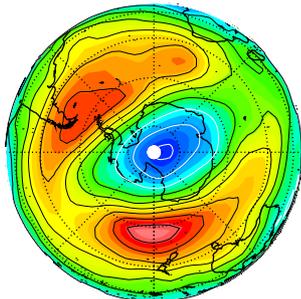
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y64



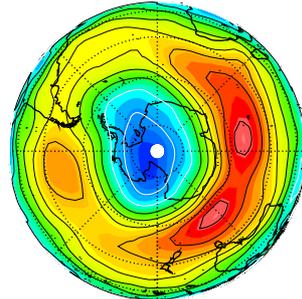
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y65



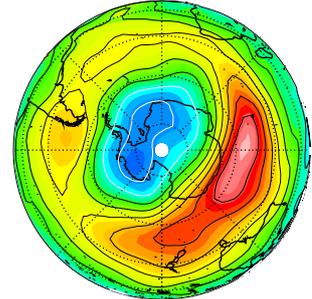
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y66



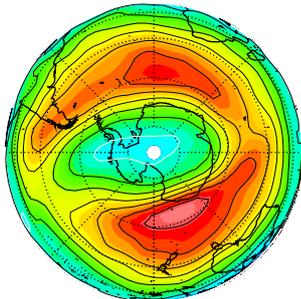
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y67



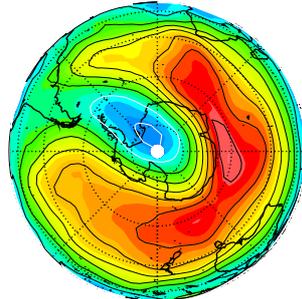
T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y68



T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y69



T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y70



T K 70.00 hPa, 1990 Nov 1 Y71

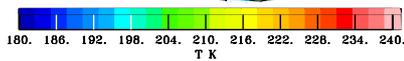
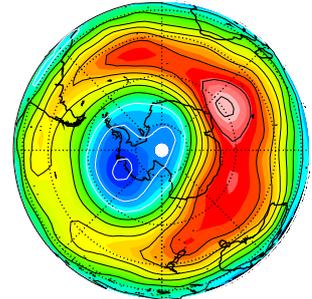
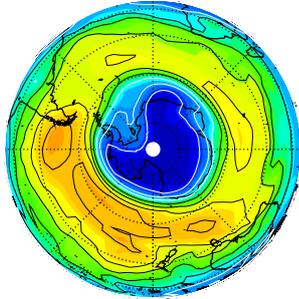
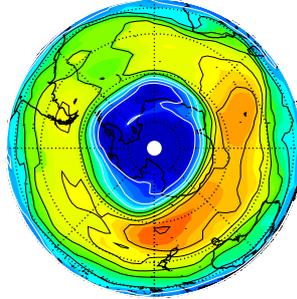


Bild 8a: Mit MA-ECHAM-CHEM berechnete Temperaturen auf der 70hPa-Fläche der Südhemisphäre, 1. November aus 15 Modelljahren mit Randbedingungen für 1990.

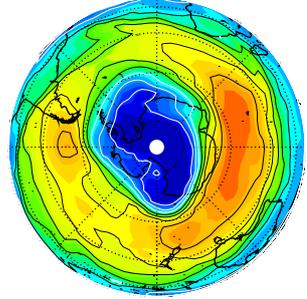
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y57



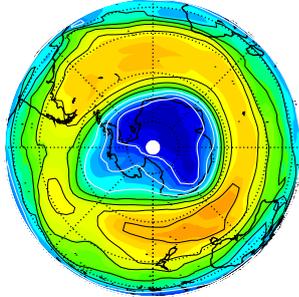
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y58



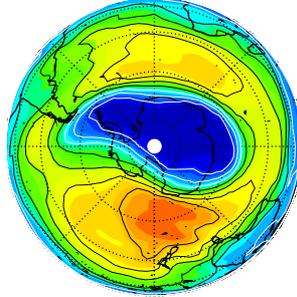
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y59



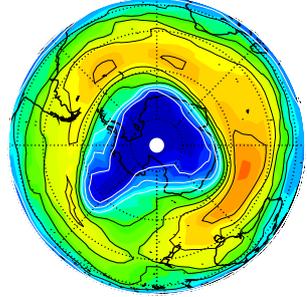
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y60



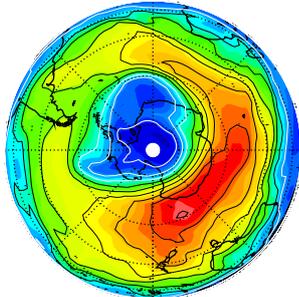
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y61



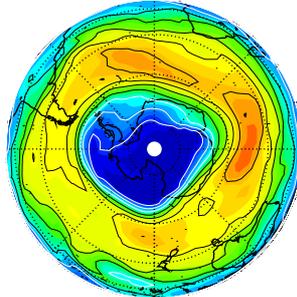
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y62



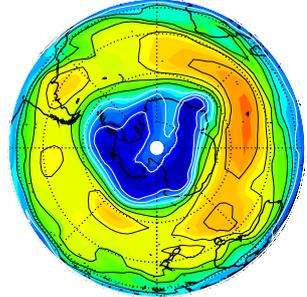
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y63



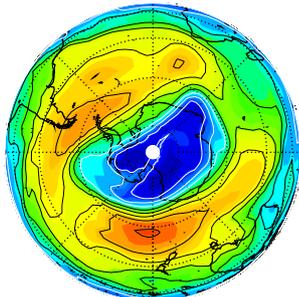
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y64



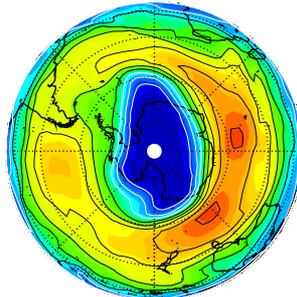
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y65



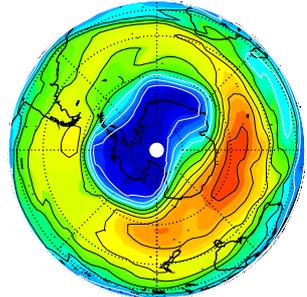
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y66



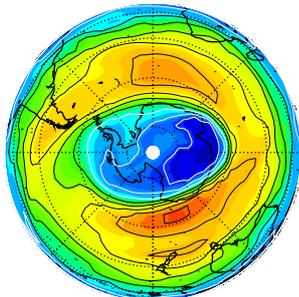
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y67



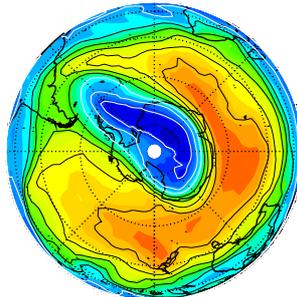
O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y68



O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y69



O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y70



O₃ 70.00 hPa, 1990Nov 1 Y71

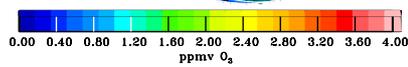
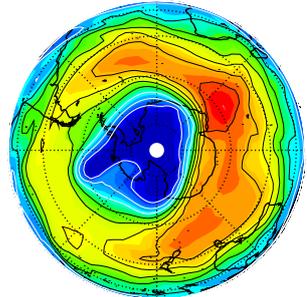


Bild 8b: Wie 8a, aber für Ozon, selbe Farbpalette wie in Bild 7.

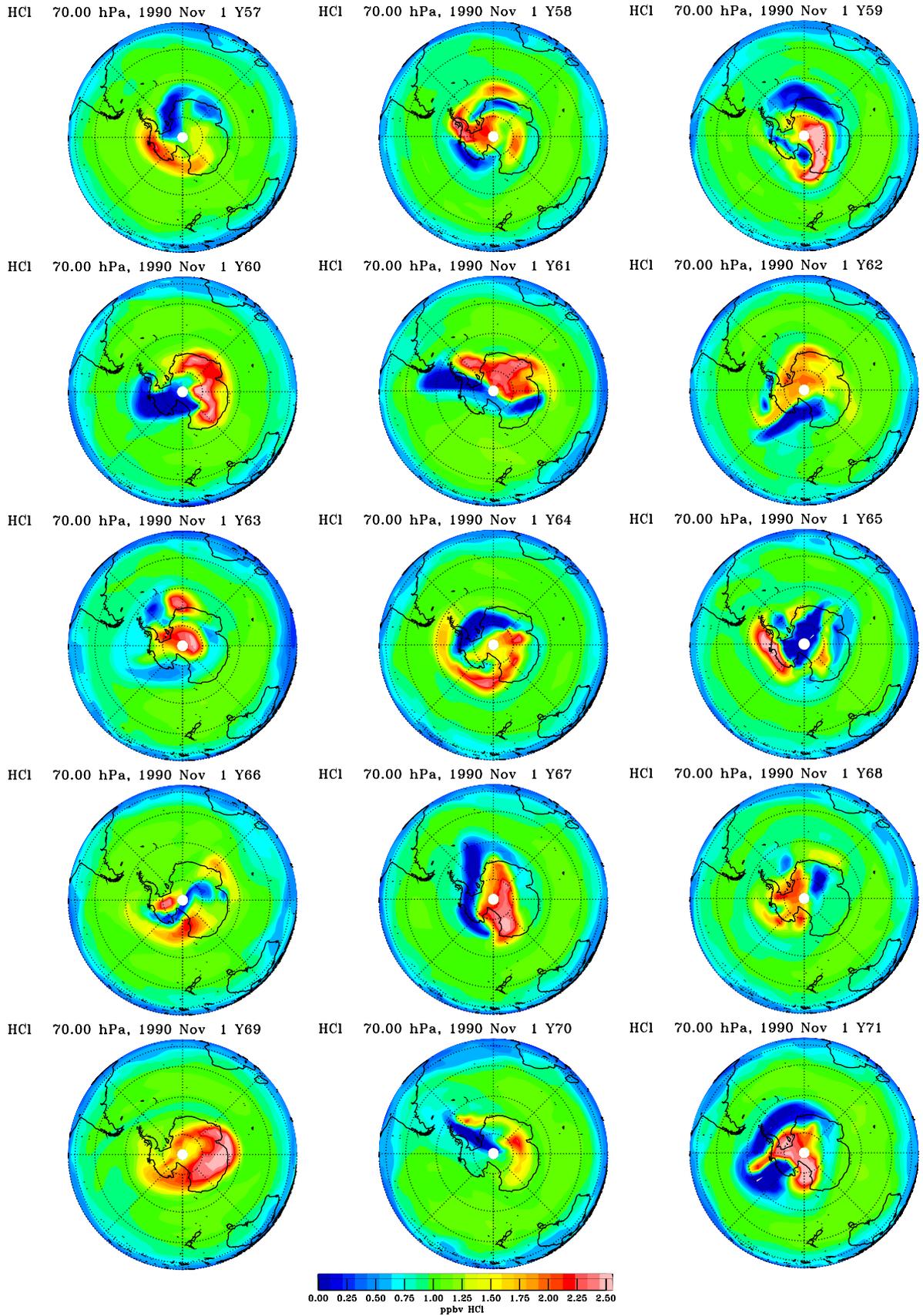


Bild 8c: Wie 8a, aber für HCl, selbe Farbpalette wie in Bild 7.

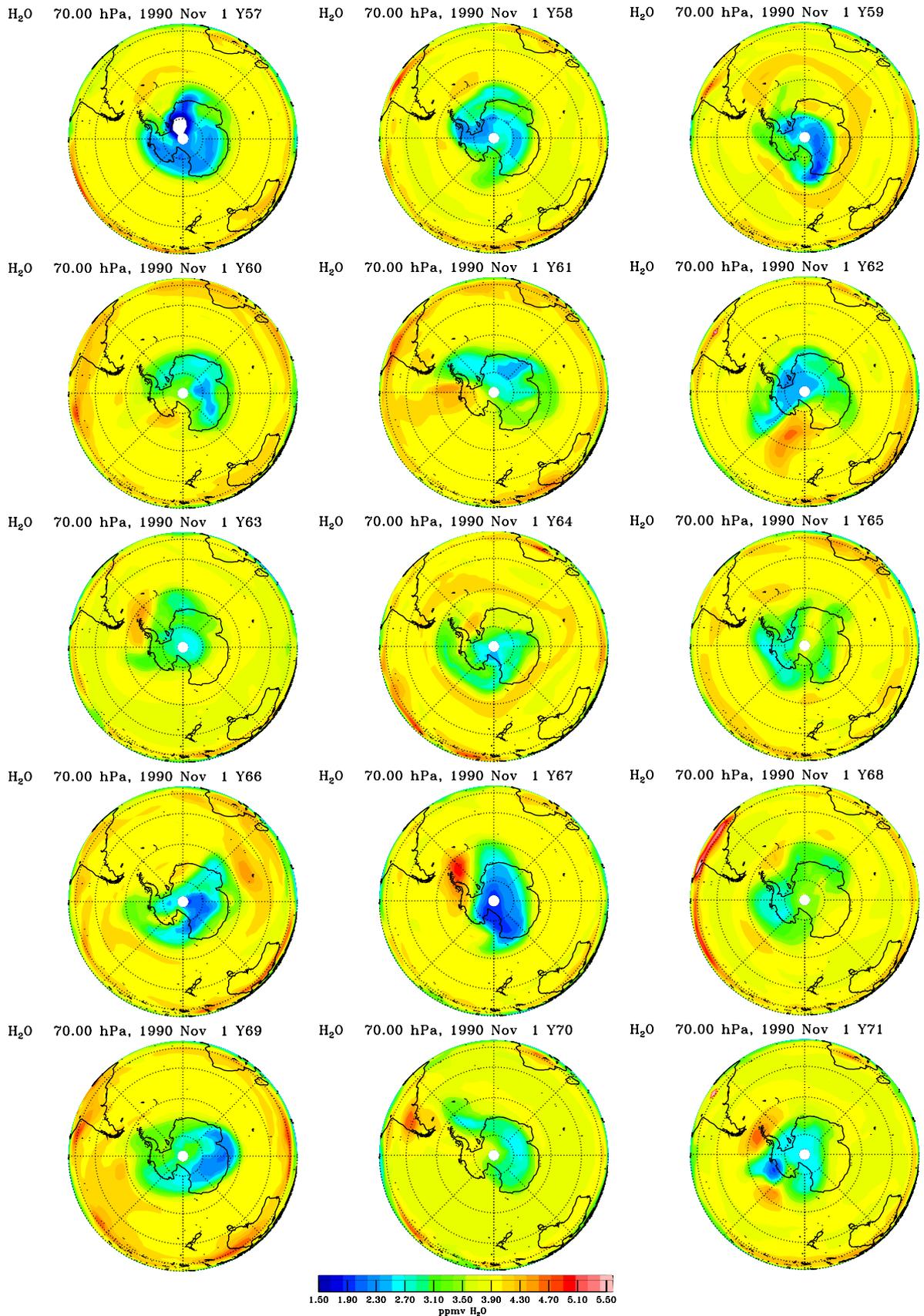


Bild 8d: Wie 8a, aber für Wasserdampf, selbe Farbpalette wie in Bild 7.

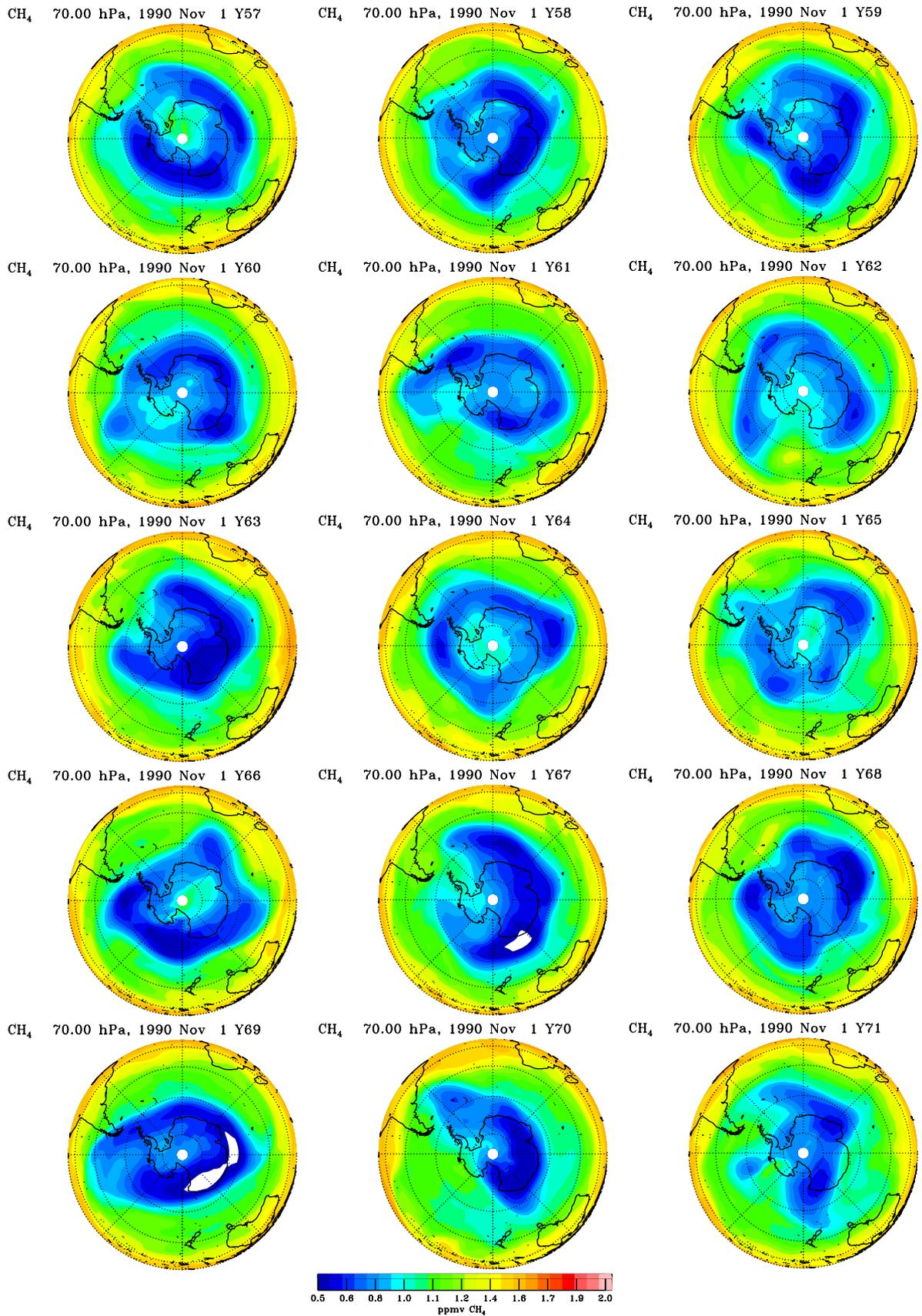


Bild 8e: Wie 8a, aber für Methan, selbe Farbpalette wie in Bild 7.

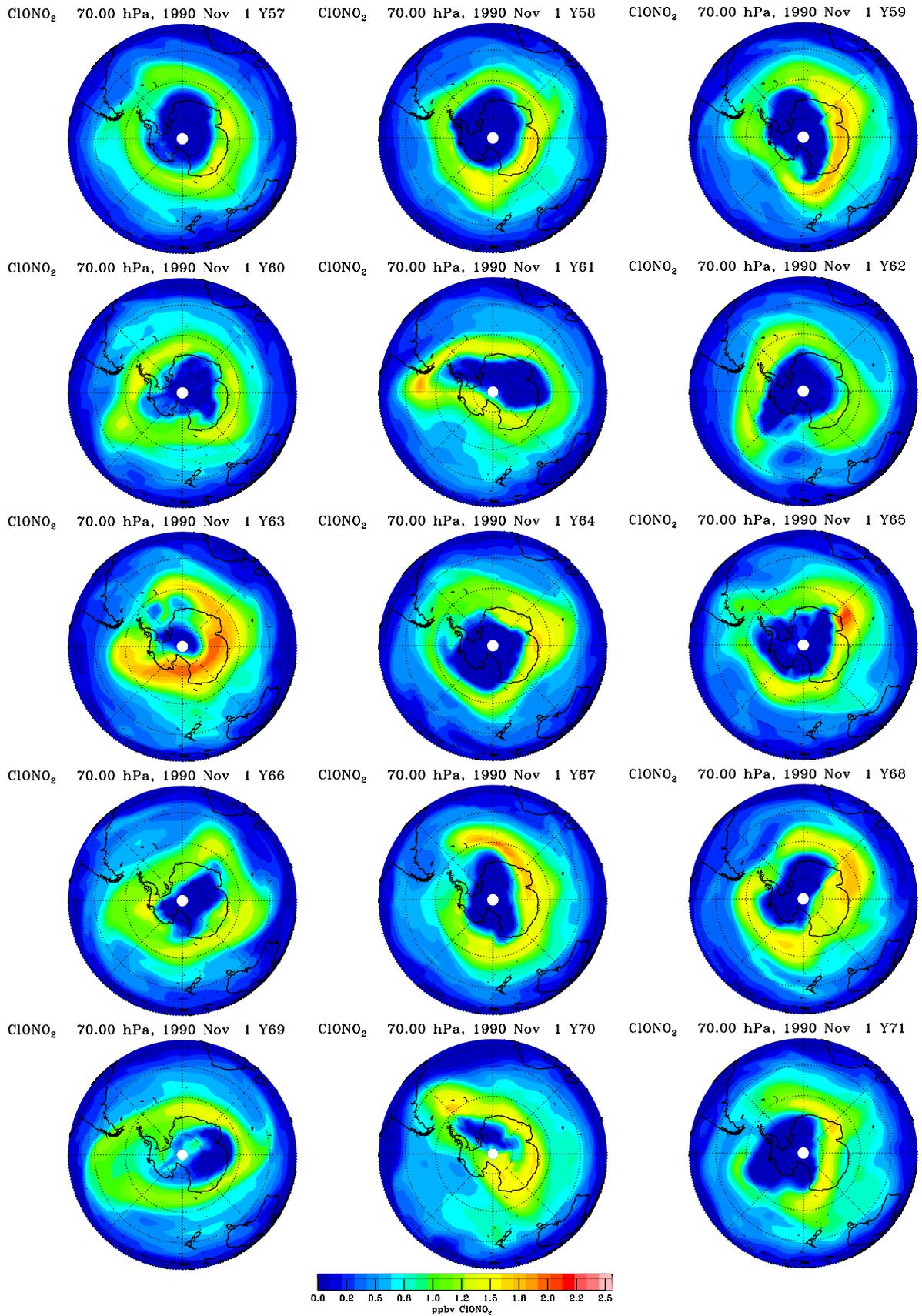


Bild 8f: Wie 8a, aber für ClONO₂.

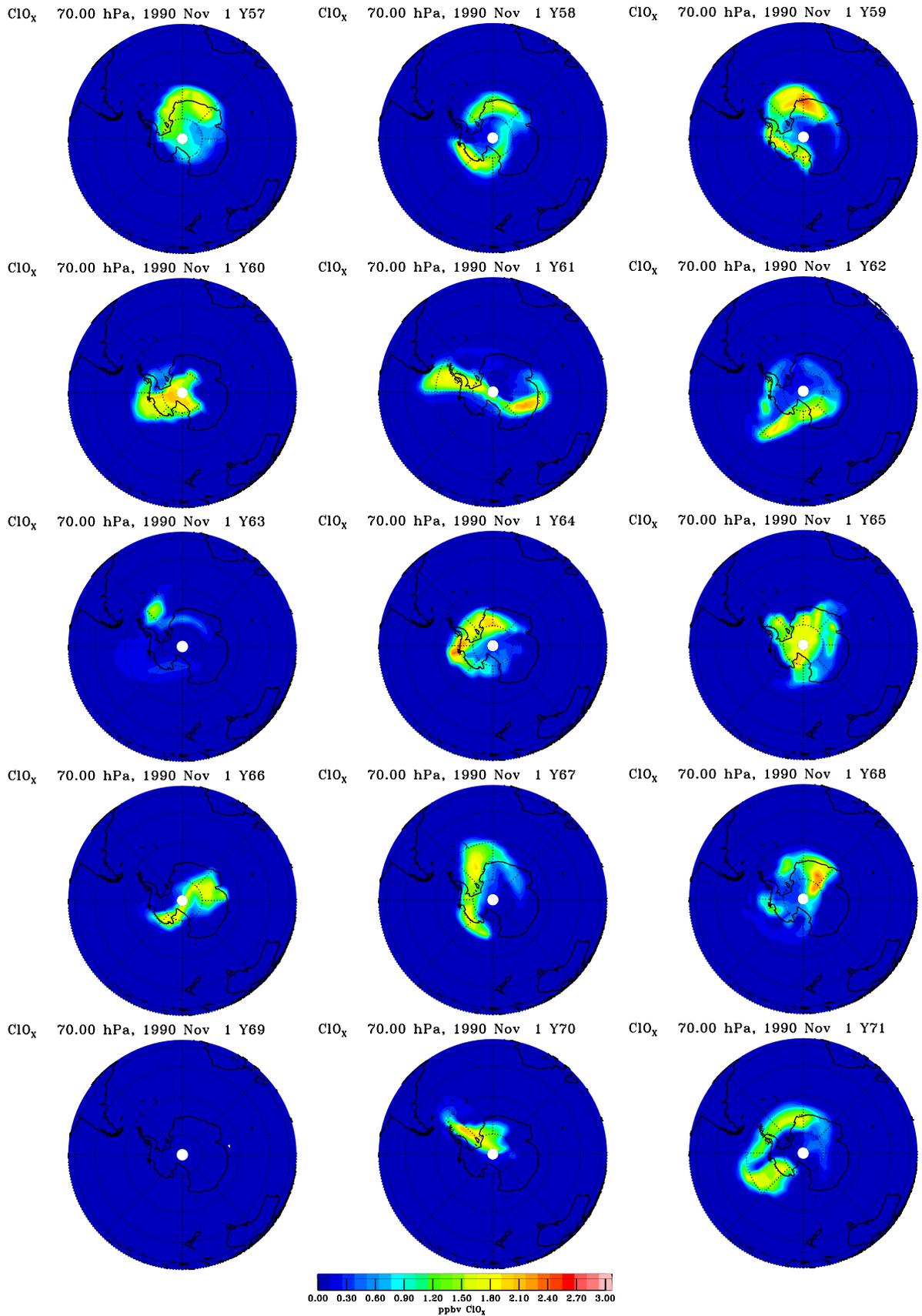


Bild 8g: Wie 8a, aber für aktiviertes Chlor ($\text{ClO} + \text{Cl}_2\text{O}_2 + \text{Cl} + \text{HOCl} + \text{Cl}_2$).

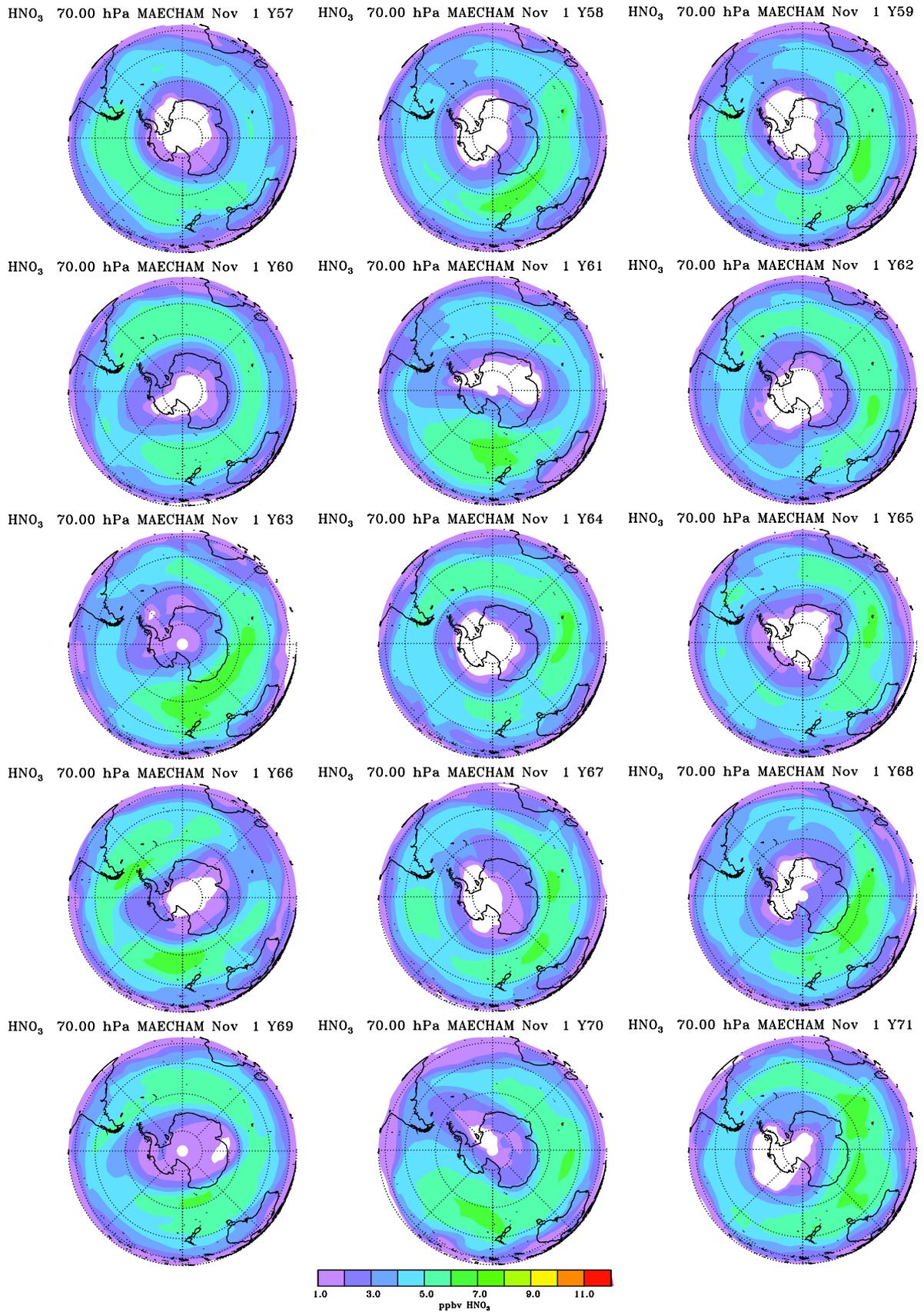


Bild 9: Wie Bild 8a, aber HNO₃ in der Farbpalette von Bild 10.

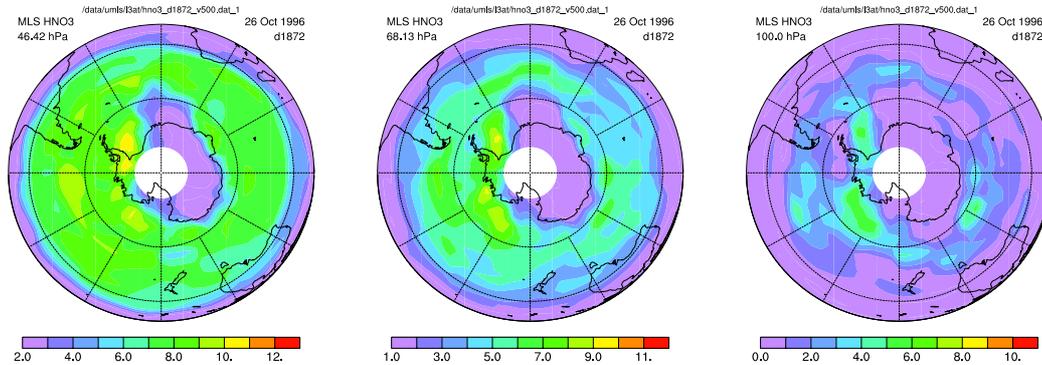


Bild 10: MLS-Beobachtungen von HNO_3 am 26. Oktober 1996 bei 46, 68 und 100hPa , Südhemisphäre. Im Gegensatz zu Bild 9 erstreckt sich der niedrigste Farbbereich bis Null.

die Antikorrelation zwischen NO_x und O_3 , hier für die 30 hPa-Fläche mit Tagesgang. Die vom Modell bestimmten chemischen Ozonverlustraten stimmen etwa mit den Analysen aus den Satellitendaten überein. Der Jahresgang des stratosphärischen Gesamt Ozons in hohen und mittleren Breiten wird vom Modell in beiden Hemisphären, einschließlich des antarktischen Ozonlochs und der Variabilität im Nordfrühling, gut wiedergegeben wie Bild 18 für 2 Jahre Modell und HALOE zeigt. Im Bild tendiert das Modell dazu, das stratosphärische Ozon in niederen Breiten zu überschätzen, was zum einen an numerischen Fehlern bei der Integration mit der Graphiksoftware hängt, aber auch an Transportunsicherheiten im Bereich der Tropopause. Der Jahresgang paßt aber auch dort zu den Beobachtungen. Wegen der Überschätzung des Abwärtstransports von Ozon in die Troposphäre, u.a. durch zu grobe vertikale Auflösung im Tropopausenbereich (vgl Untersuchungen mit dem DLR-Modell), wird hier auf Vergleiche mit TOMS-Daten zum Gesamt ozon verzichtet.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das Modell die Ozonchemie der Stratosphäre einschließlich der Variabilität der Bildung polarer stratosphärischer Wolken in beiden Hemisphären und des 'Sommerlochs' richtig erfaßt und auch die wesentlichen dynamischen Strukturen zu den Beobachtungen passen. Das Modell läuft stabil und ohne Trend während der 15 Jahre-'Zeitscheibe' für die Bedingungen der neunziger Jahre.

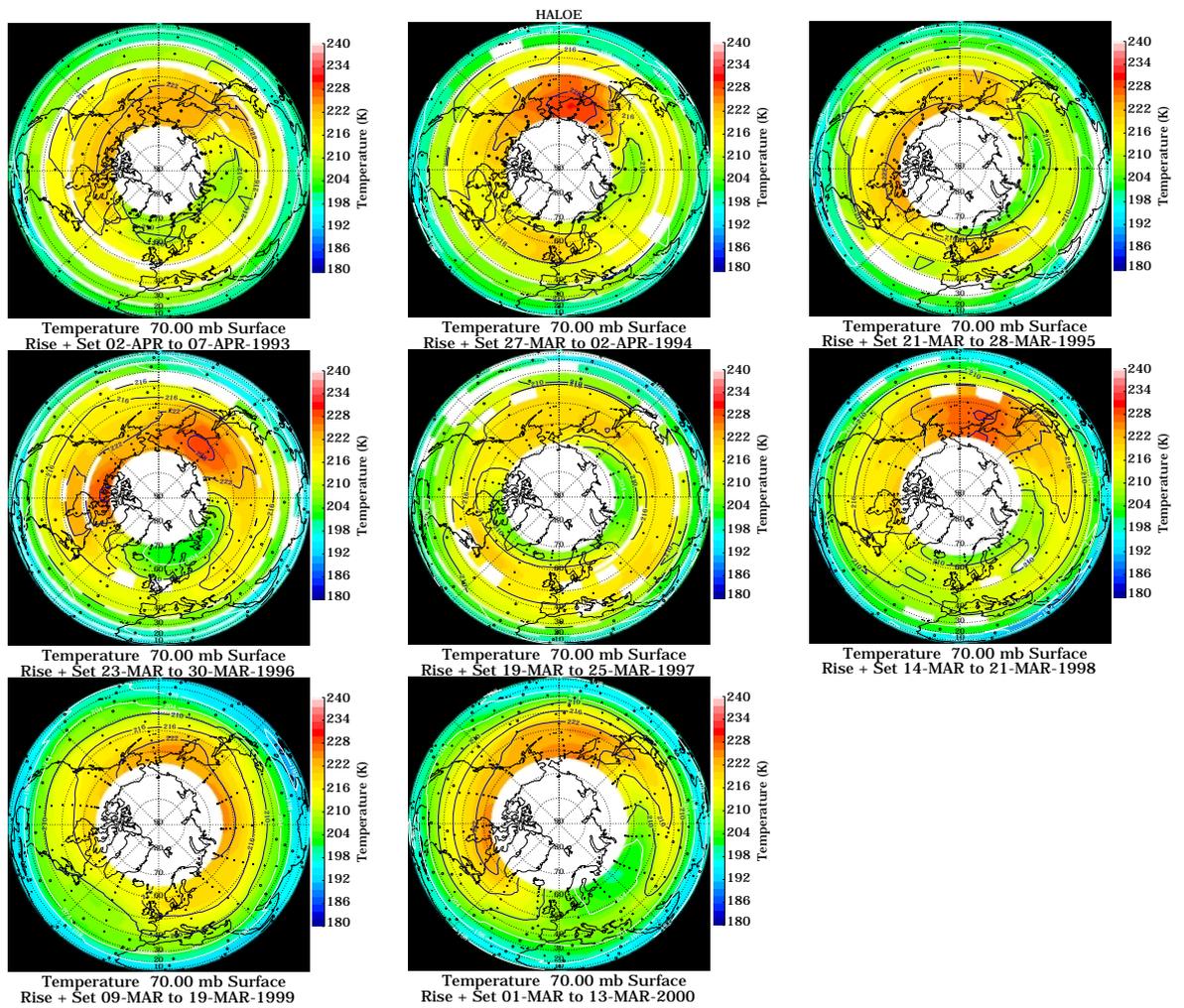


Bild 11a: An den Punkten der HALOE-Profile beobachtete Temperaturen auf der 70 hPa Fläche im März in der Arktis für 1993 bis 2000. Beobachtungen beginnen in Polnähe für 1993 bis 1995, in mittleren Breiten für 1996 bis 2000.

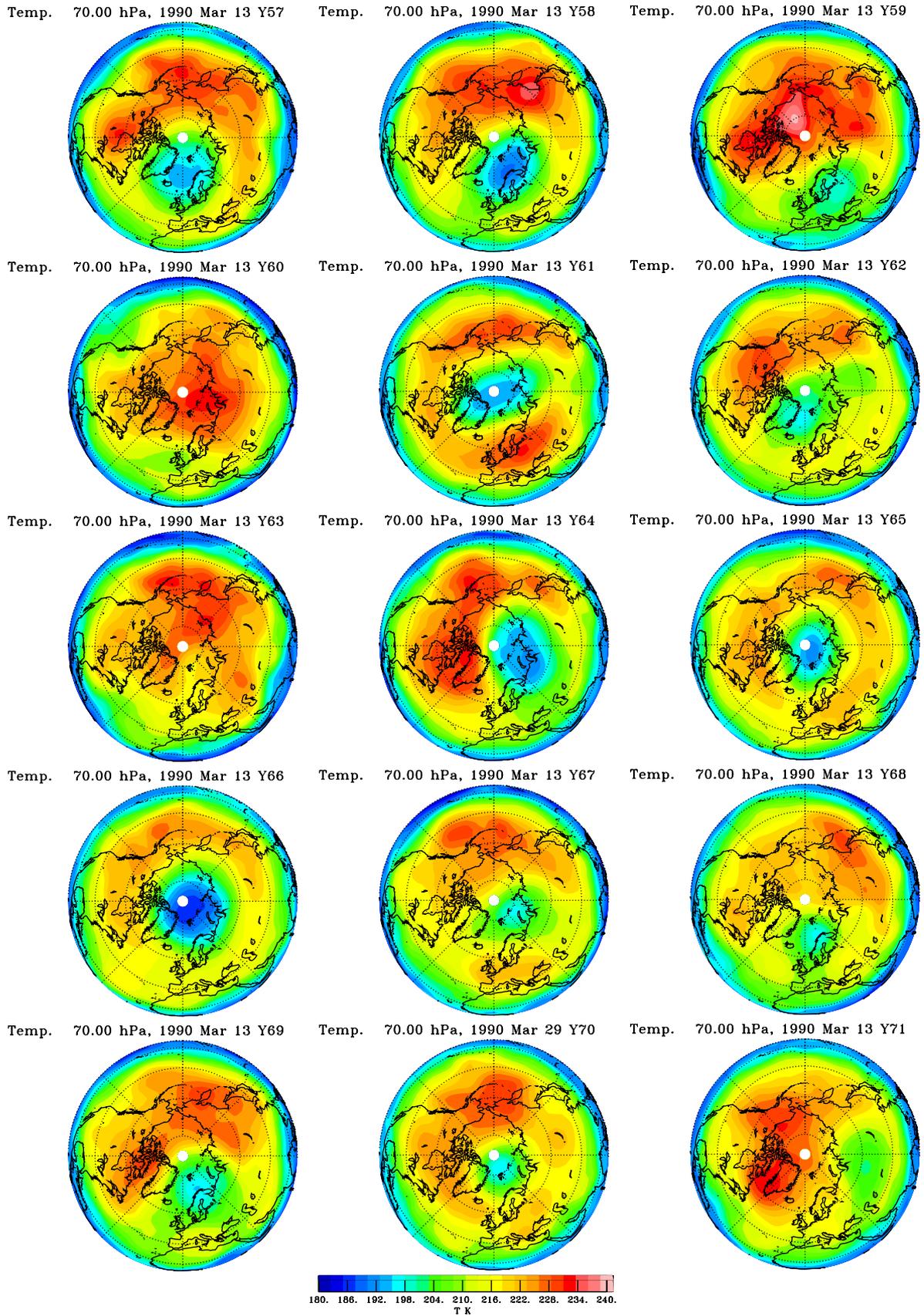


Bild 11b: Am 13. März berechnete Temperaturen auf der 70hPa -Fläche in der Arktis für 15 Jahre

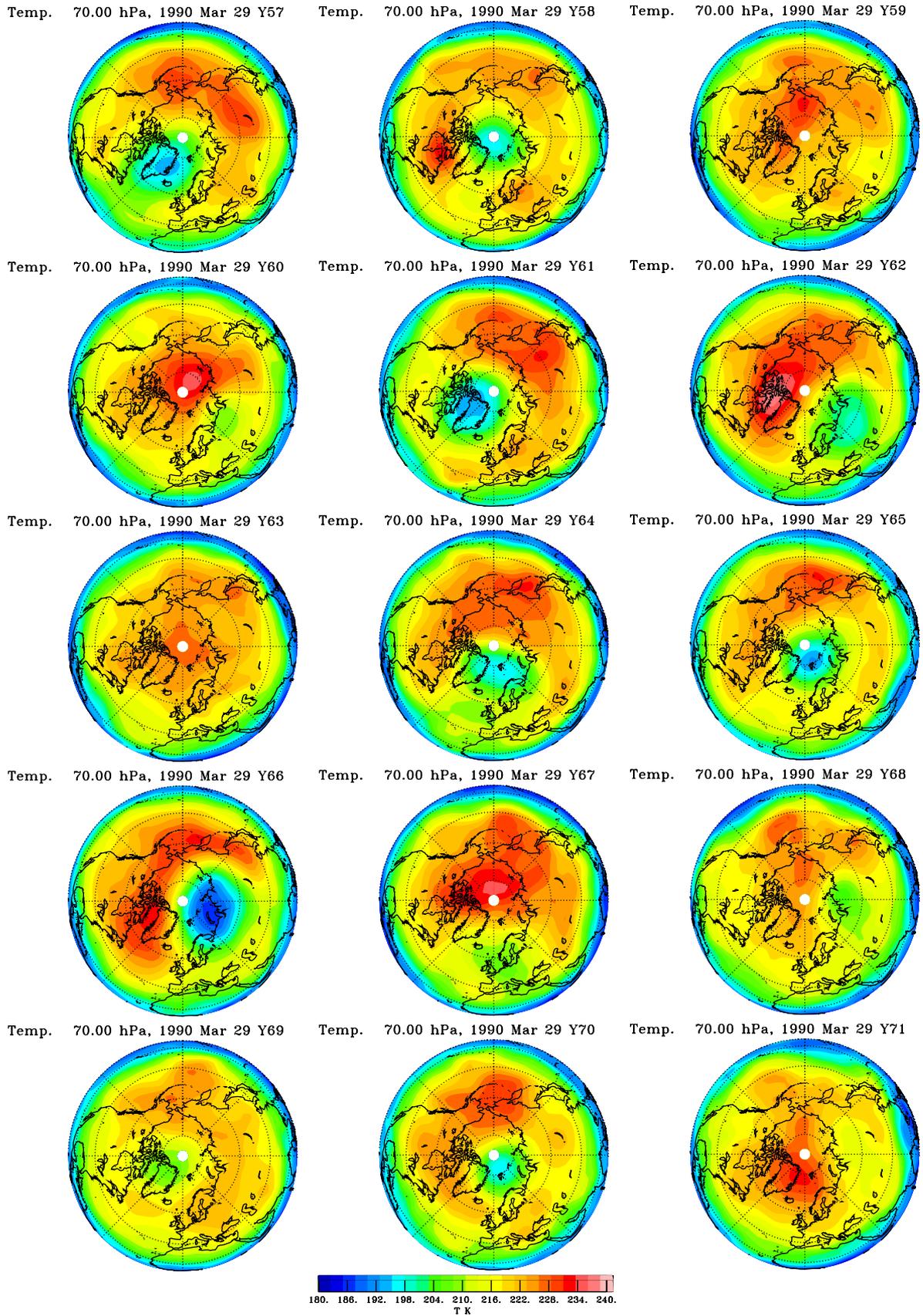


Bild 11c: wie 11b, aber 29. März.

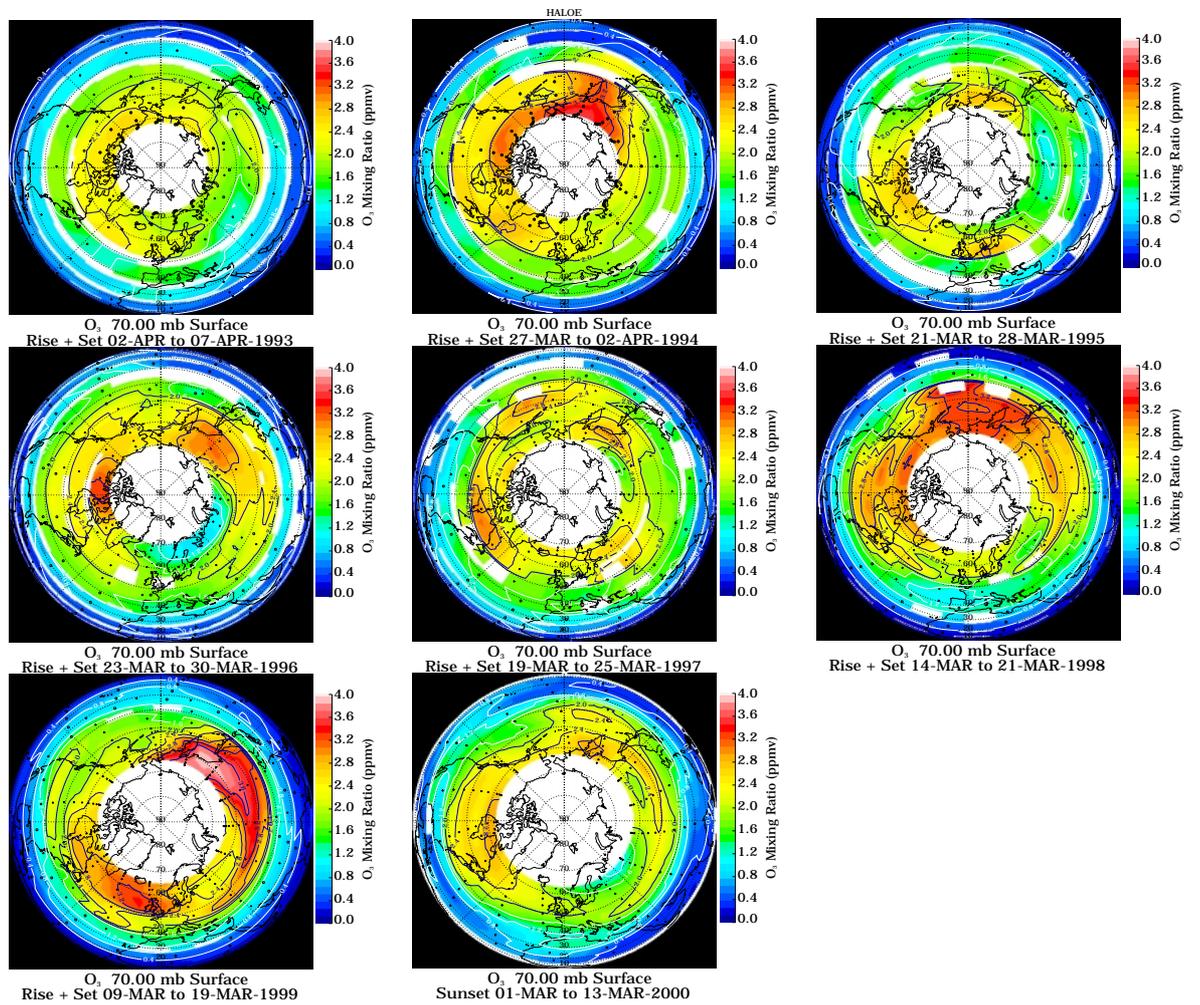
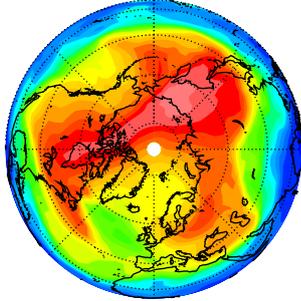
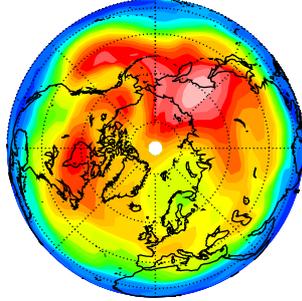


Bild 12a: Von HALOE beobachtetes Ozon bei 70hPa für März, 1993 bis 2000.

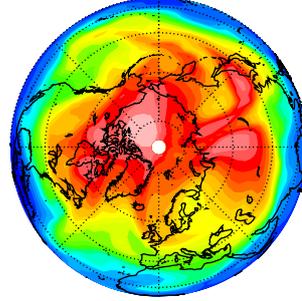
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y57



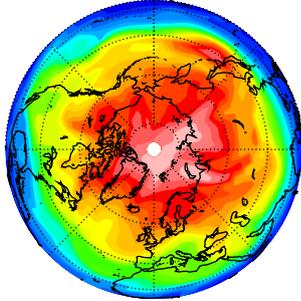
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y58



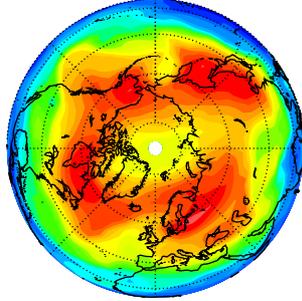
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y59



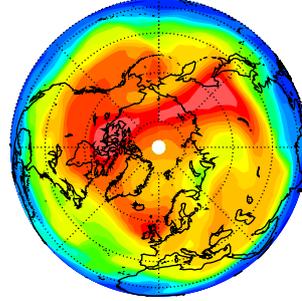
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y60



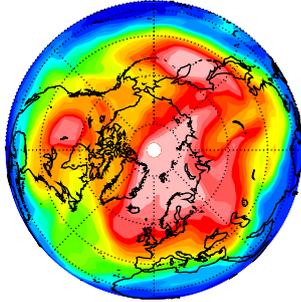
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y61



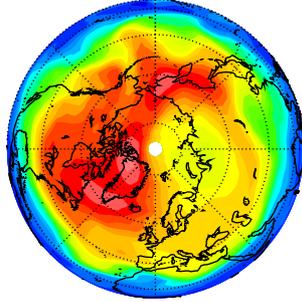
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y62



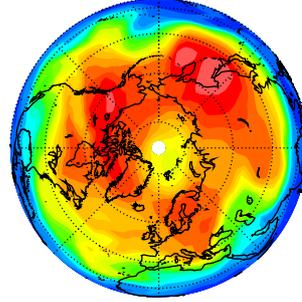
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y63



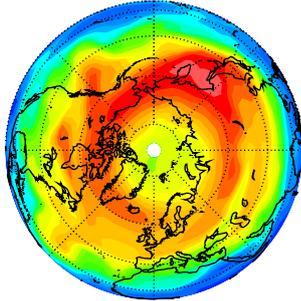
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y64



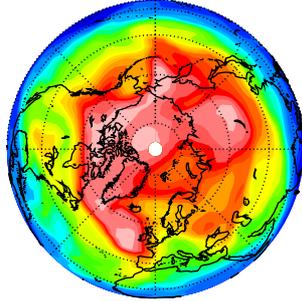
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y65



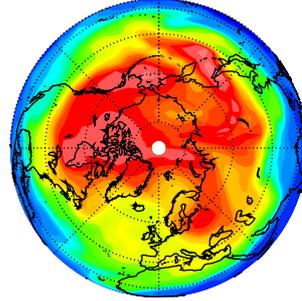
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y66



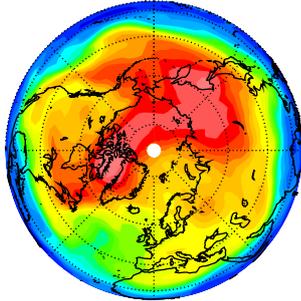
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y67



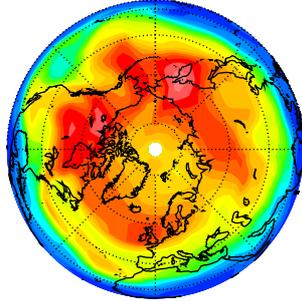
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y68



O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y69



O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y70



O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y71

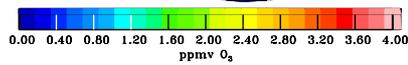
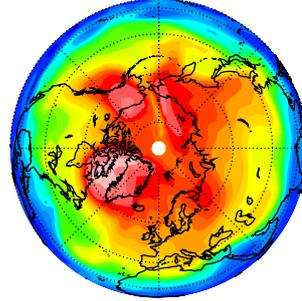
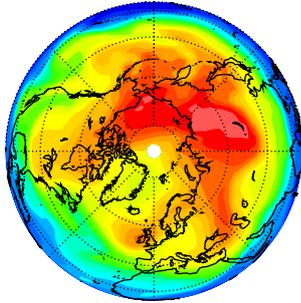
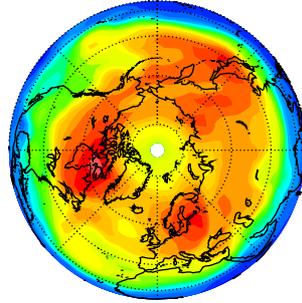


Bild 12b: Am 13. März mit MA-ECHAM-CHEM berechnetes Ozon bei 70hPa in 15 Jahren.

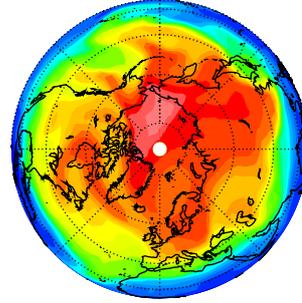
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y57



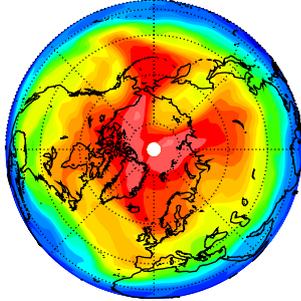
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y58



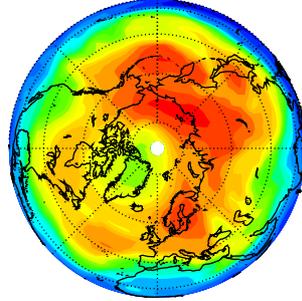
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y59



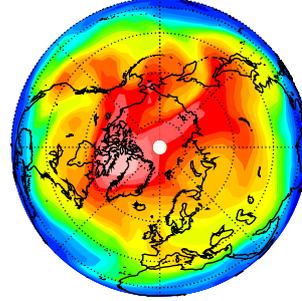
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y60



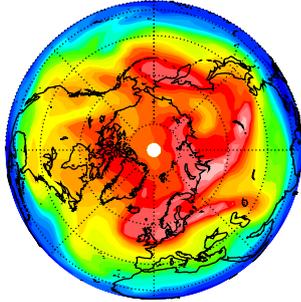
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y61



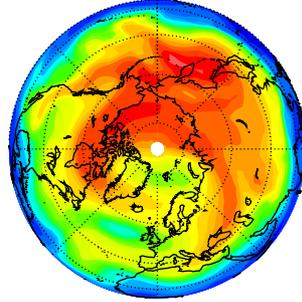
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y62



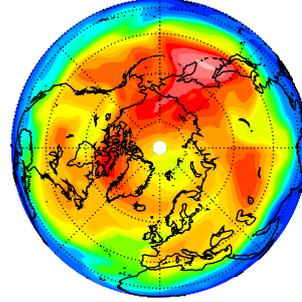
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y63



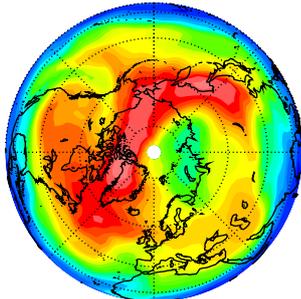
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y64



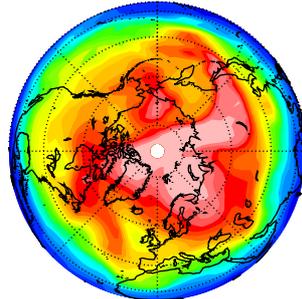
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y65



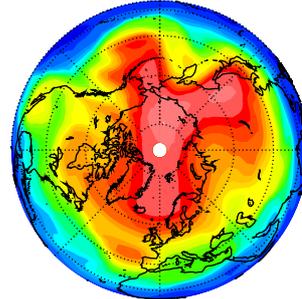
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y66



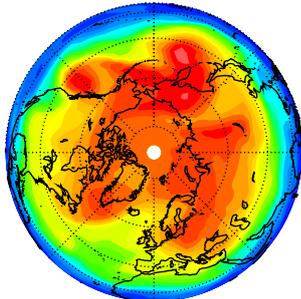
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y67



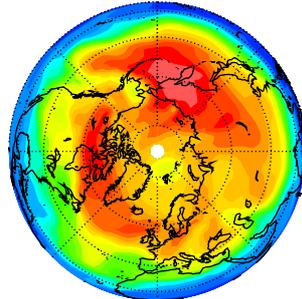
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y68



O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y69



O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y70



O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y71

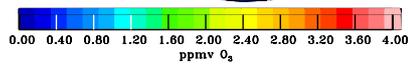
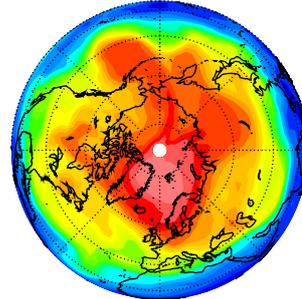


Bild 12c: wie 12b, aber 29. März.

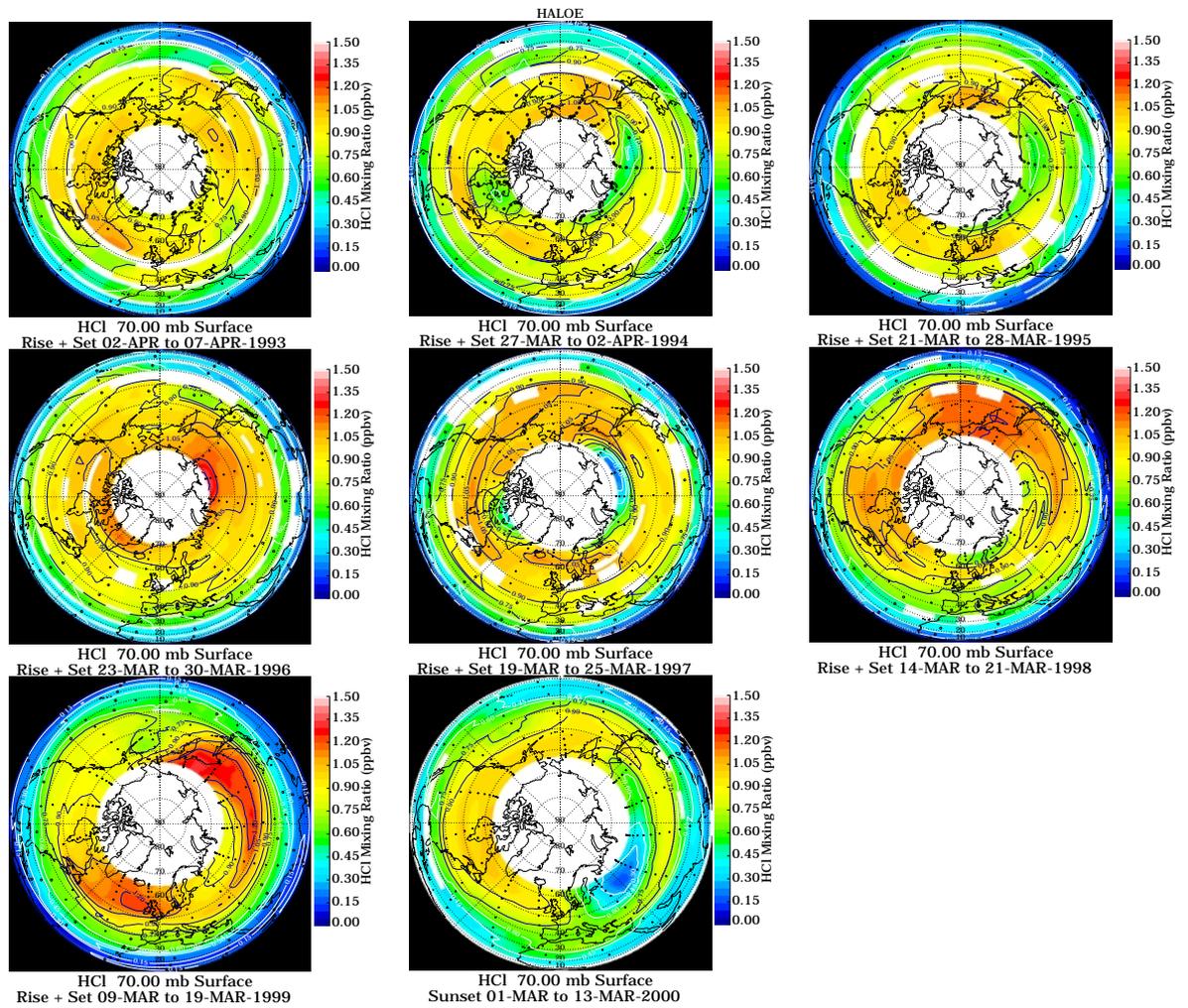
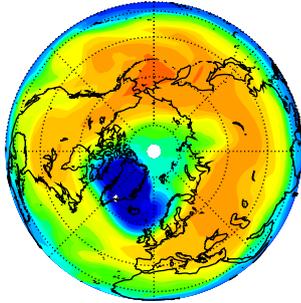
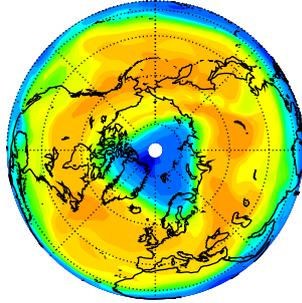


Bild 13a: Von HALOE beobachtetes HCl in 8 Jahren. In 1997 betrifft die Chloraktivierung das ganze Gebiet in Polnähe, einschließlich der Fläche wo HALOE nicht hinsehen kann.

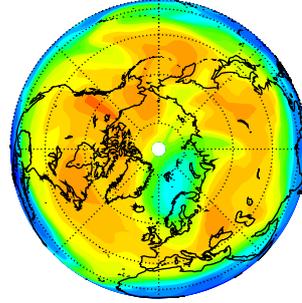
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y57



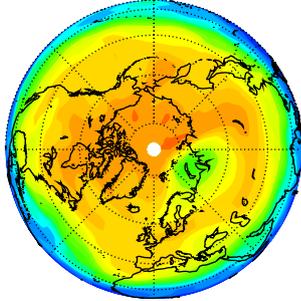
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y58



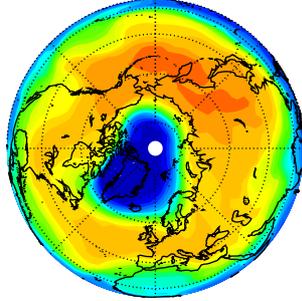
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y59



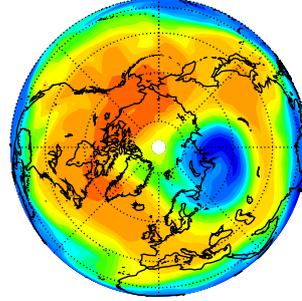
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y60



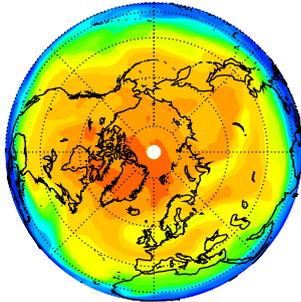
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y61



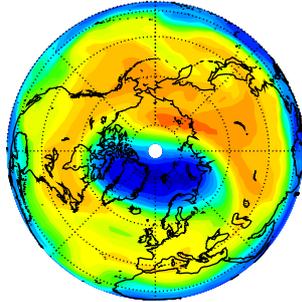
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y62



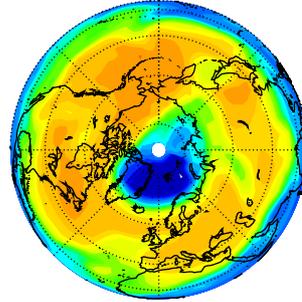
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y63



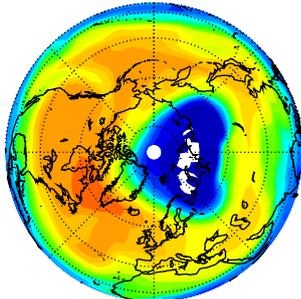
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y64



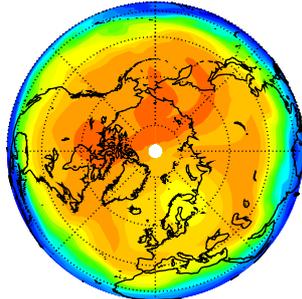
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y65



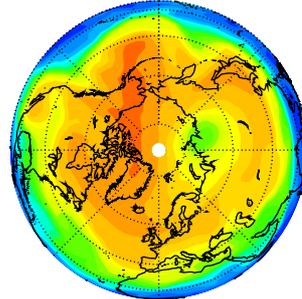
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y66



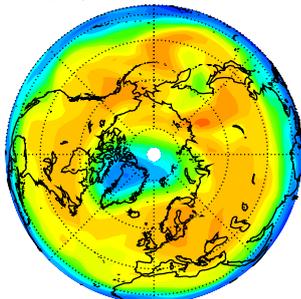
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y67



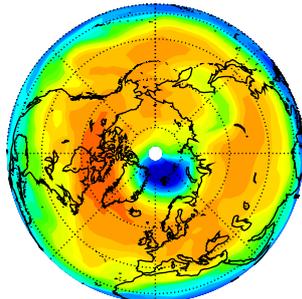
HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y68



HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y69



HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y70



HCl 70.00 hPa, 1990 Mar 29 Y71

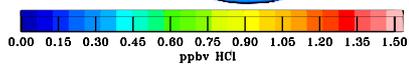
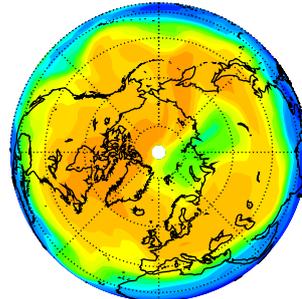


Bild 13b: Für 29. März modelliertes HCl, 15 Jahre.

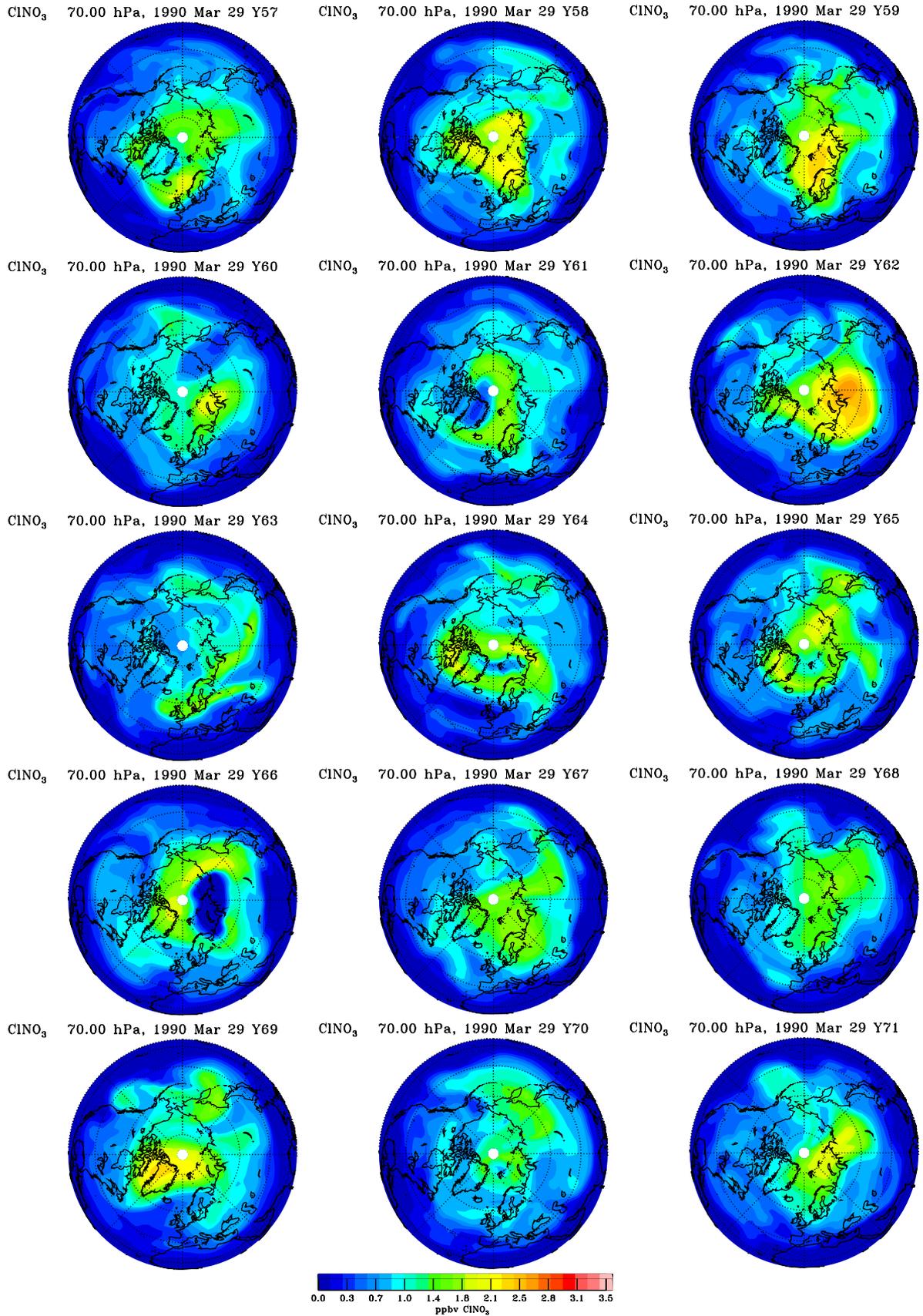


Bild 13c: Für 29. März modelliertes ClONO₃, 15 Modelljahre.

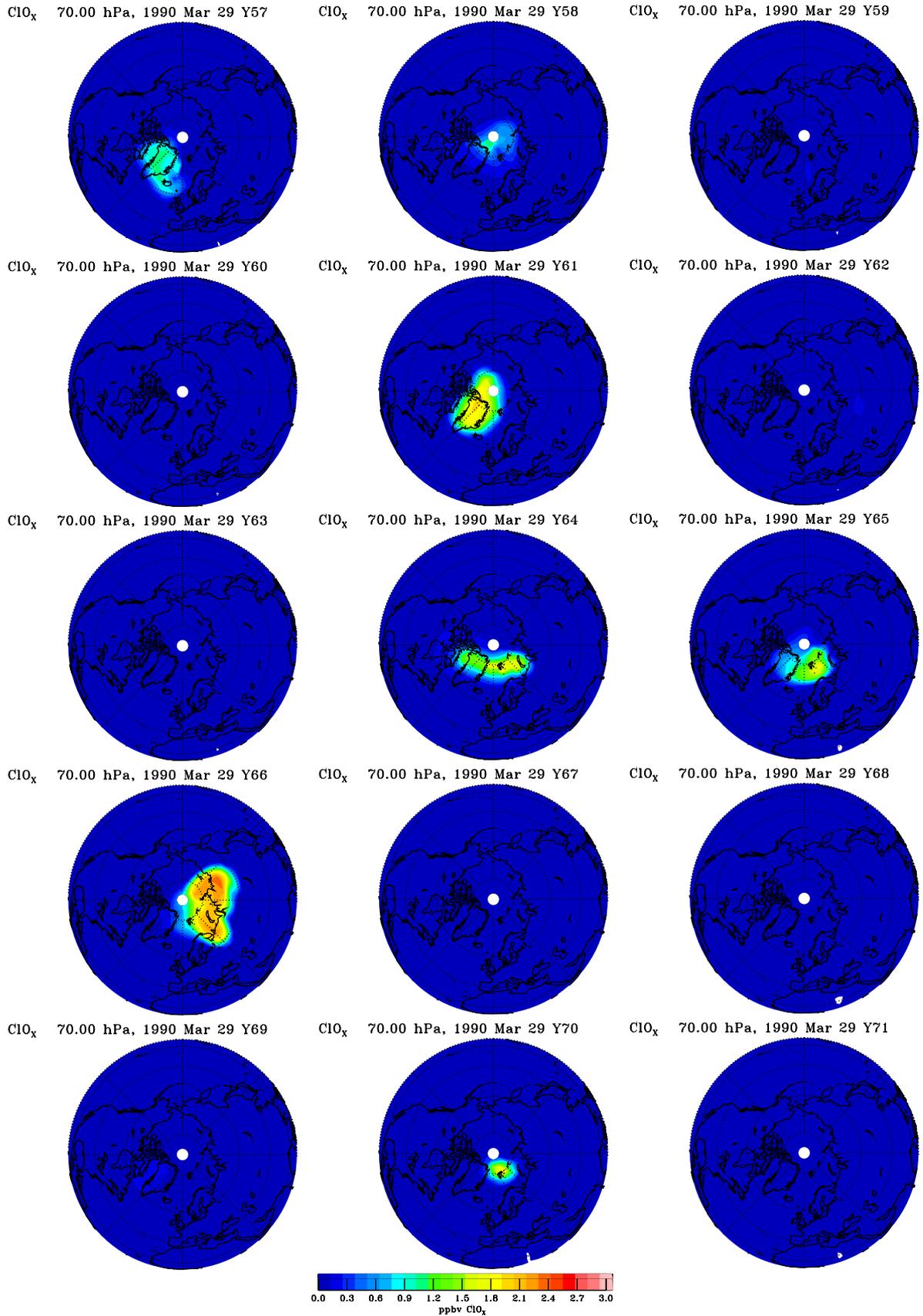


Bild 13d: Für 29. März modelliertes aktives Chlor (hauptsächlich ClO).

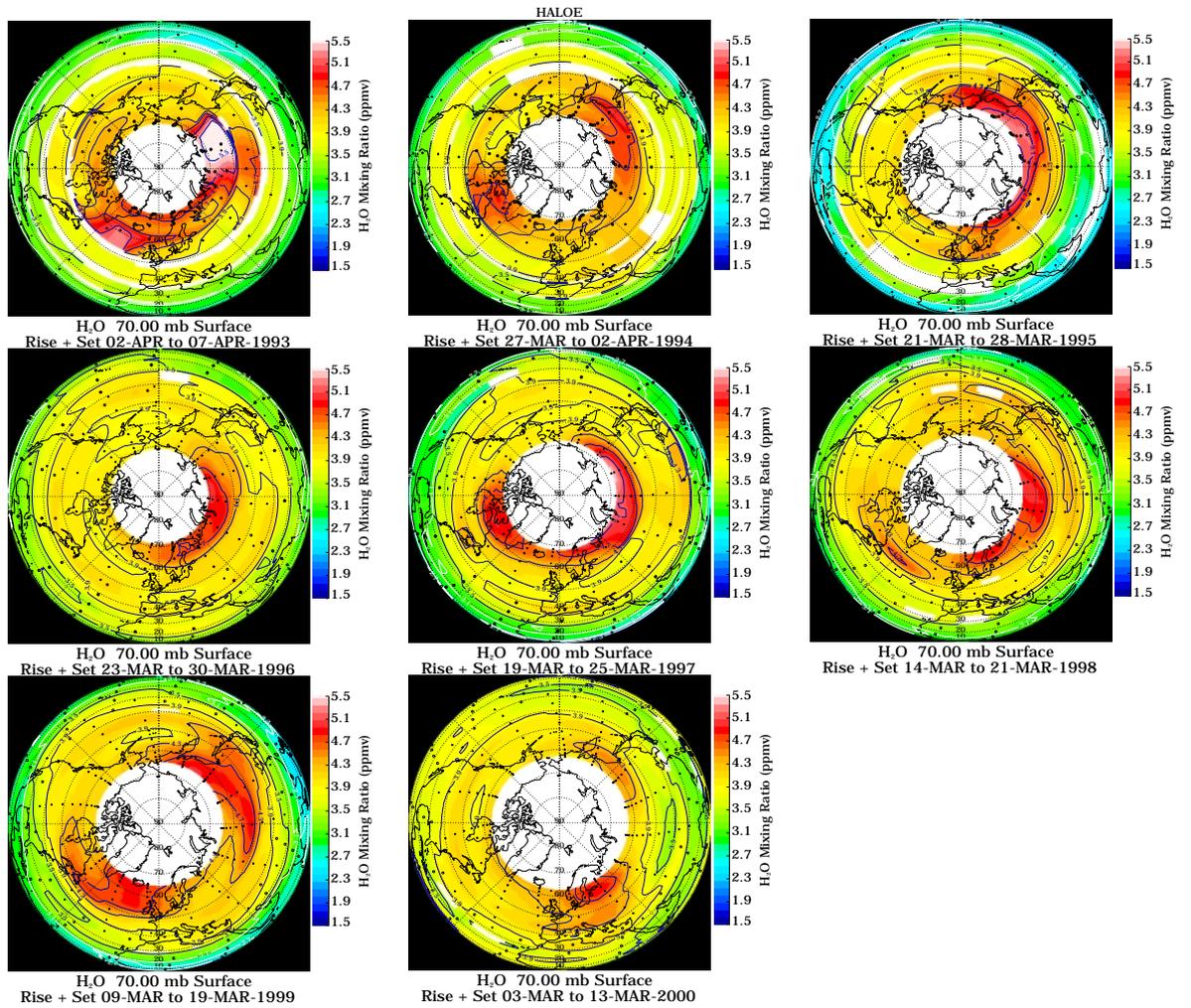


Bild 14a: Von HALOE beobachtetes H₂O in 8 Jahren.

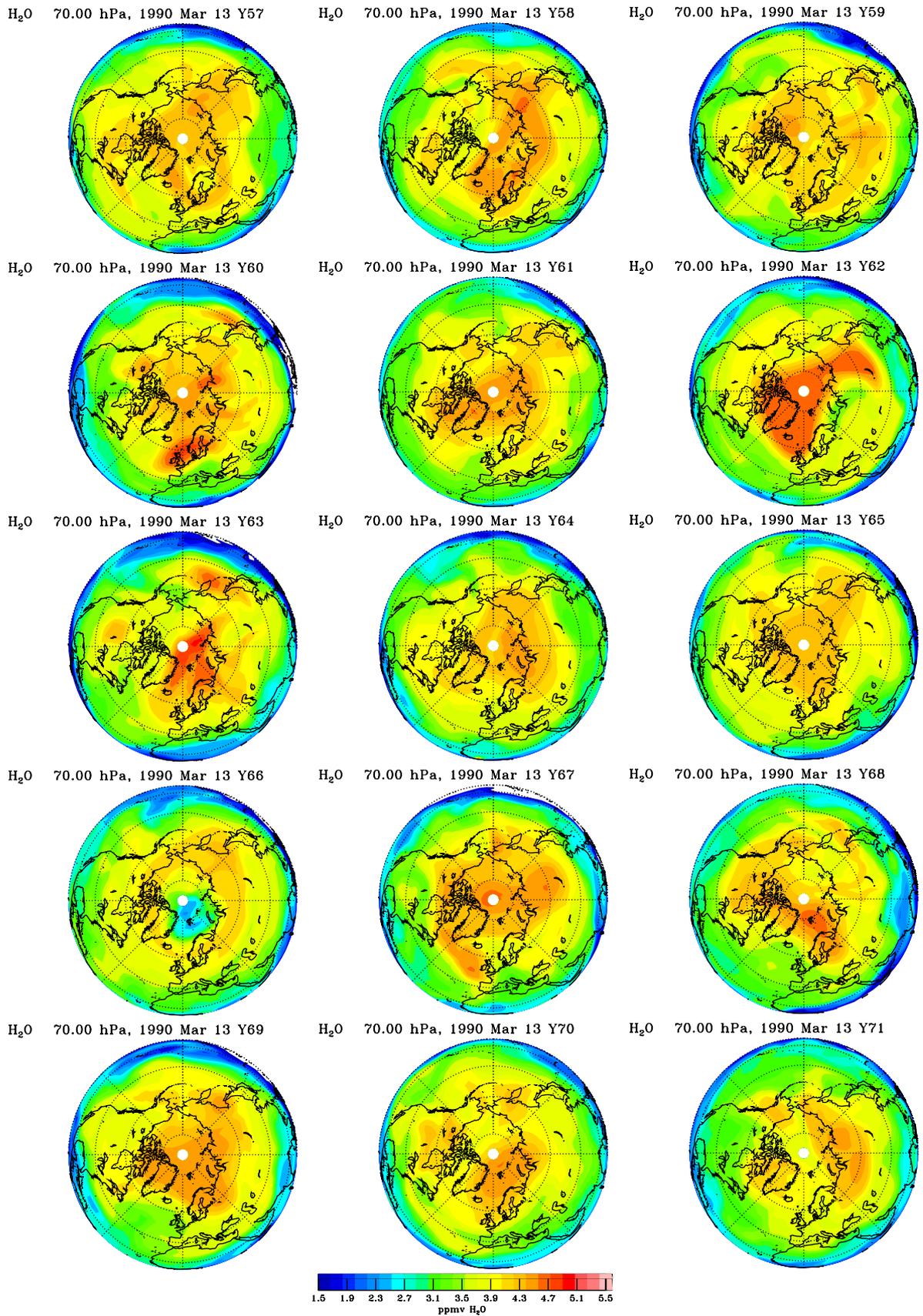


Bild 14b: Berechneter Wasserdampf, 13. März, 70hpa.

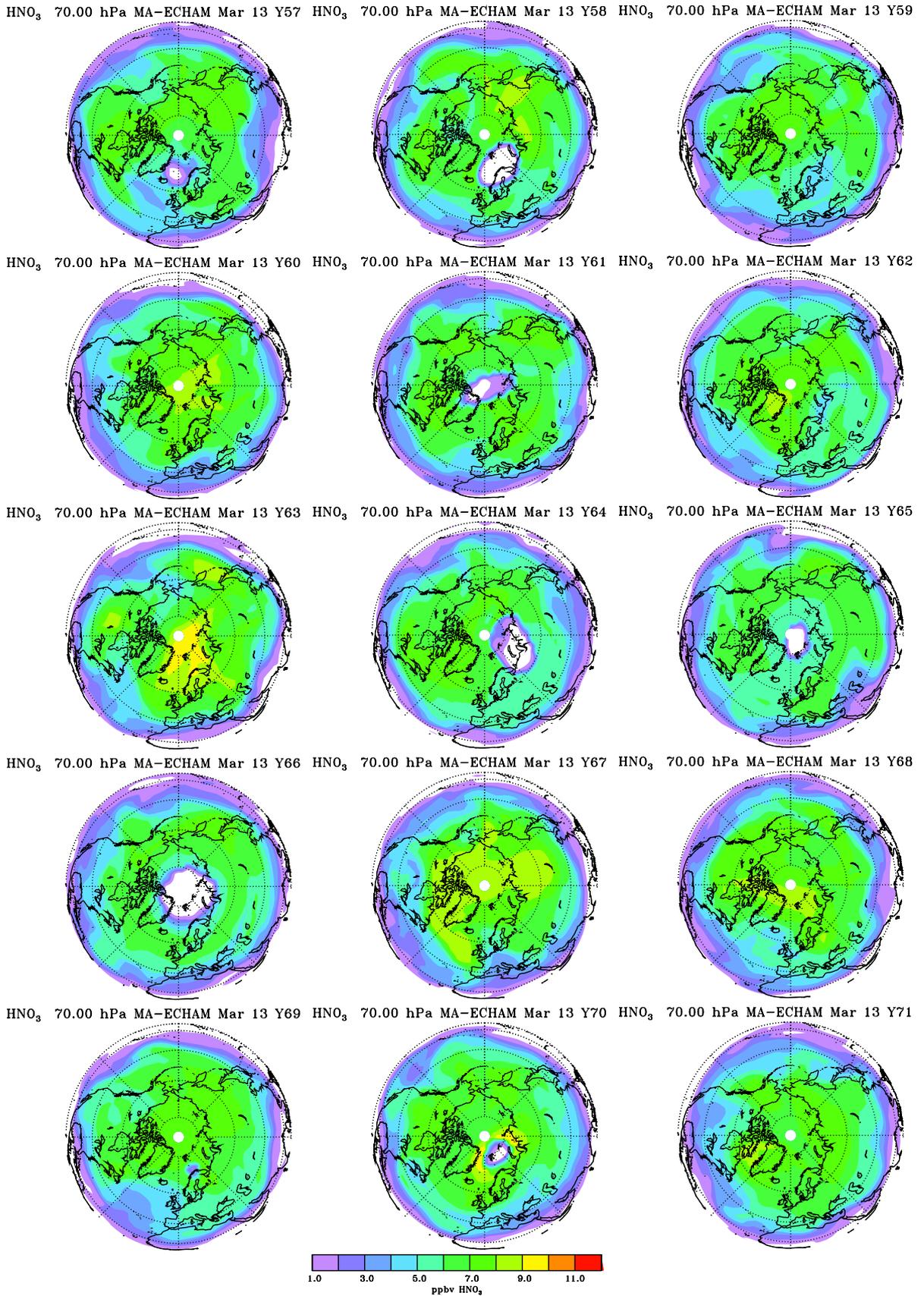


Bild 15a: Berechnetes HNO₃ in der Gasphase, weiße Flecken HNO₃ als NAT.

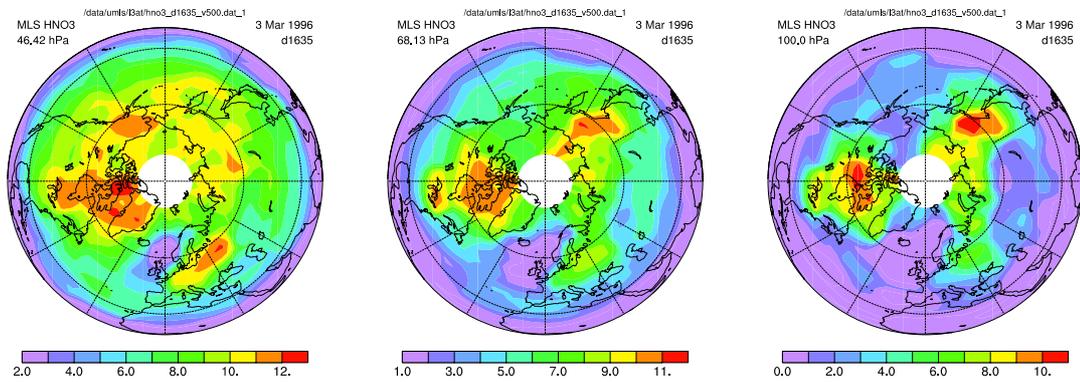


Bild 15b: Von MLS/UARS beobachtetes gasförmiges HNO₃, 3 Druckniveaus.

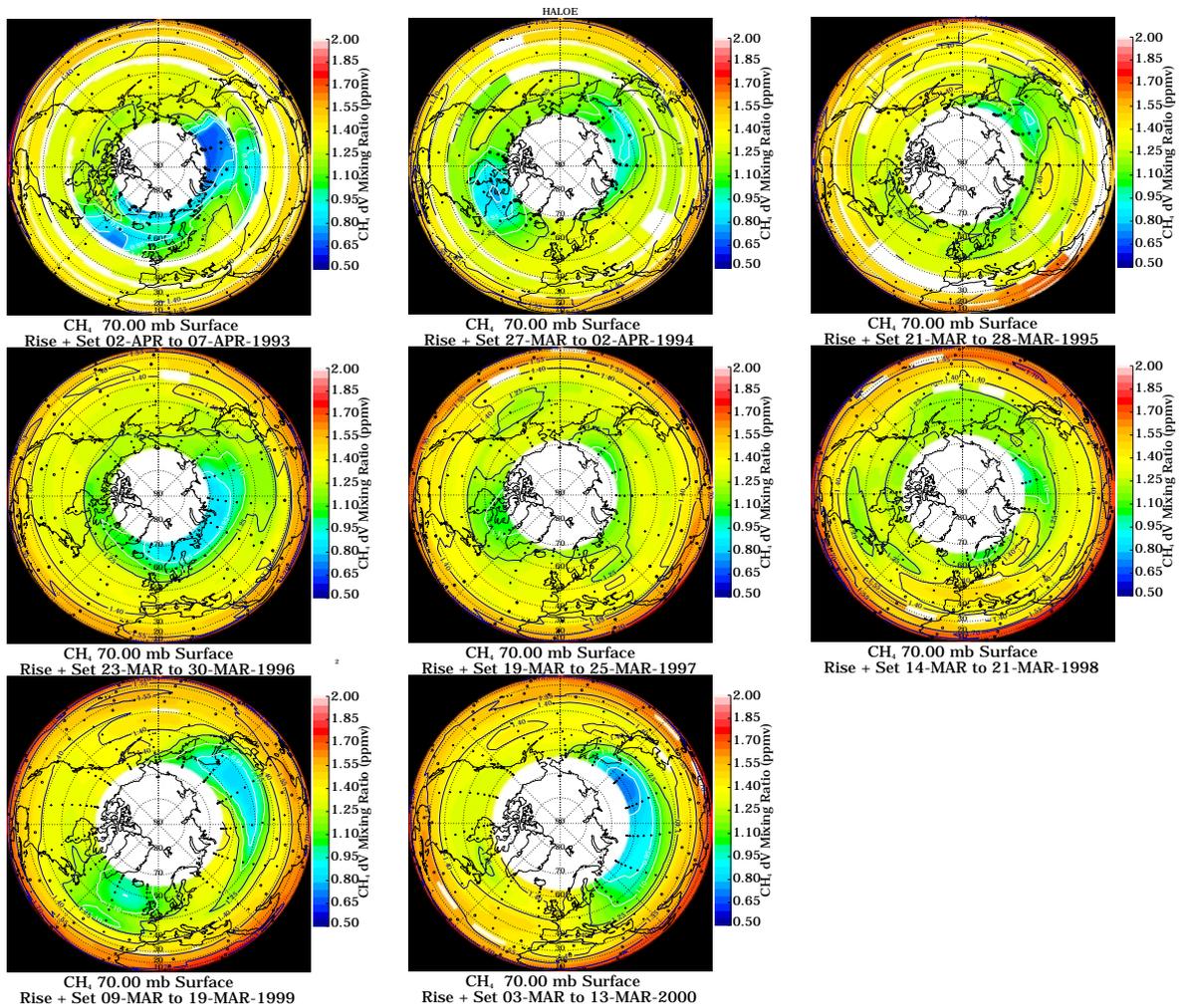


Bild 16a: Von HALOE beobachtetes Methan, 1993 bis 2000.

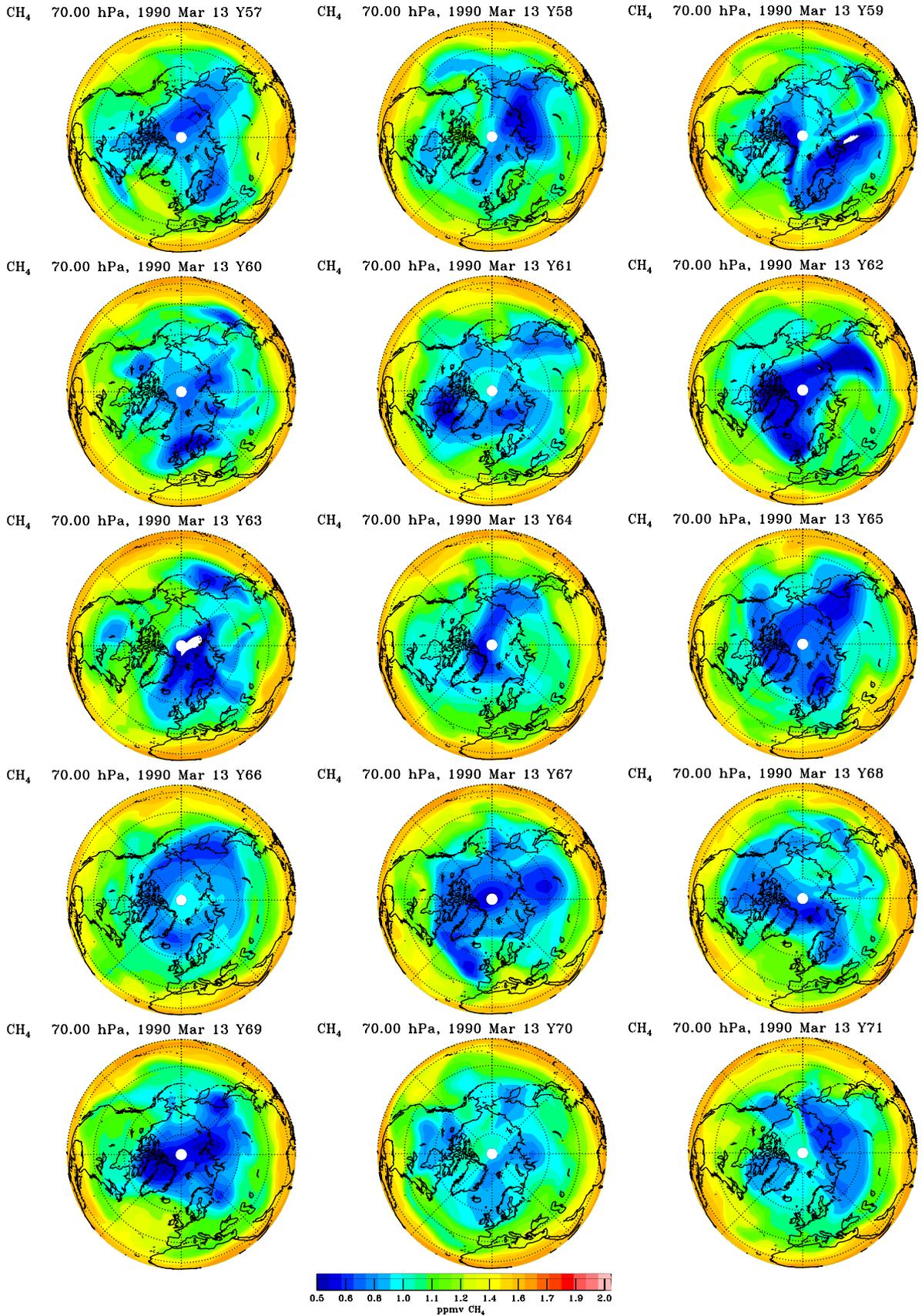


Bild 16b: Berechnetes Methan, 13. März, 70hpa.

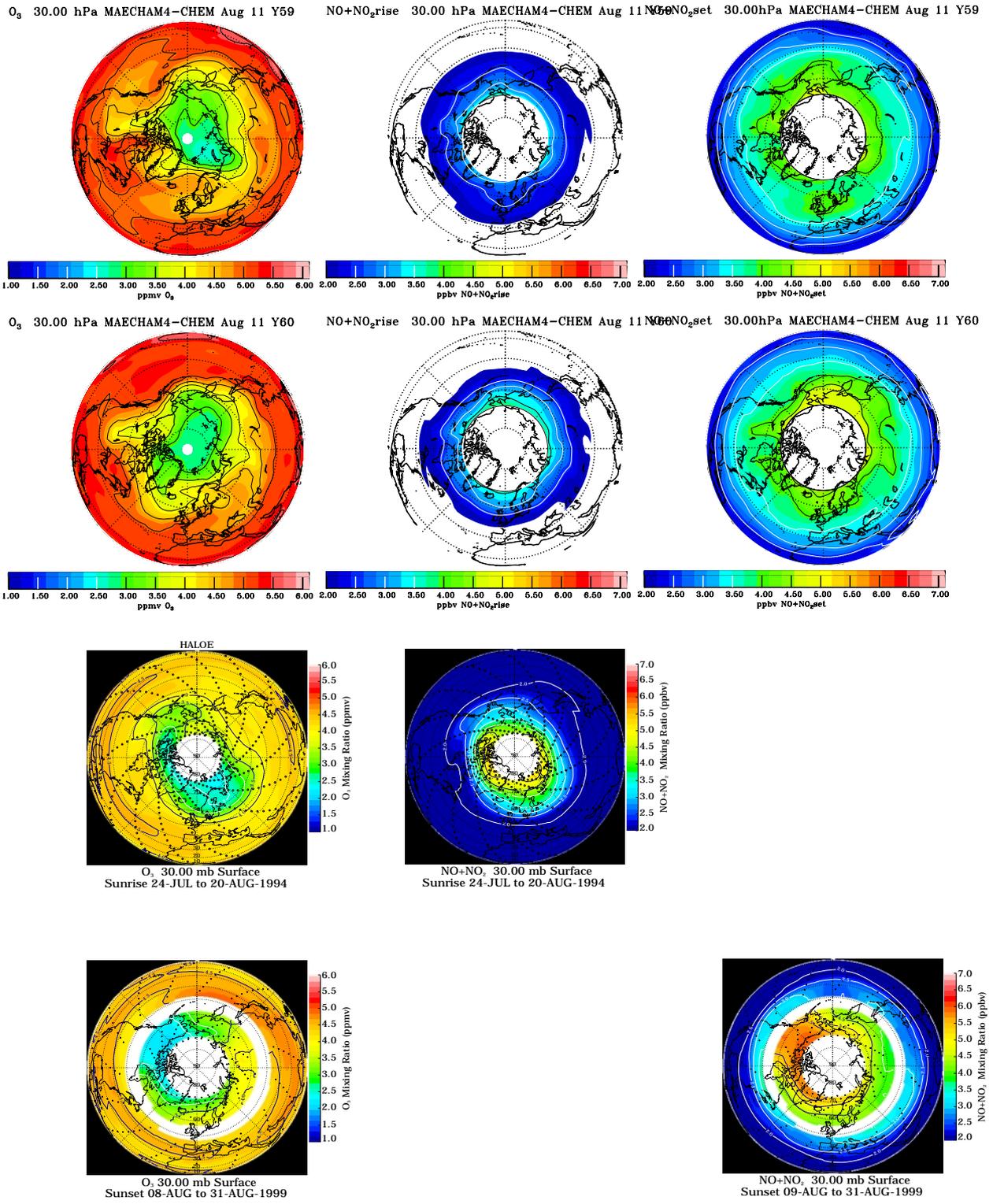


Bild 17: Beziehung zwischen Stickoxiden und Ozon im Sommer: oben Modell, unten HALOE-Daten. Stickoxide bei Sonnenauf- oder -untergang. August 1994 und 1999 sowie 2 Modelljahre.

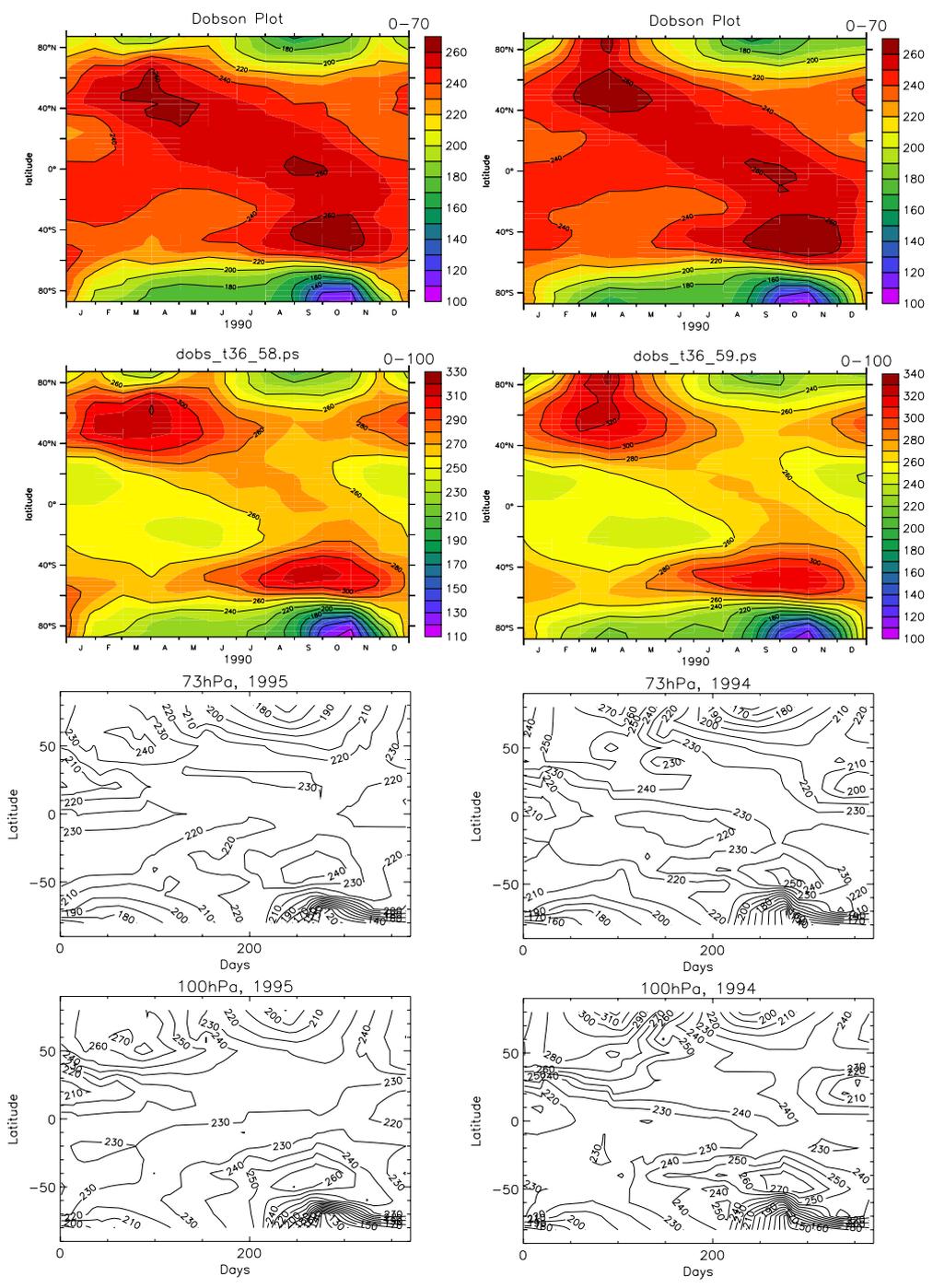


Bild 18: Stratosphärisches Gesamt Ozon oberhalb etwa 70 und 100hPa in Dobson-Einheiten (DU) für 2 Jahre als Funktion von Jahreszeit und Breite: oben MA-ECHAM, unten HALOE-Beobachtungen.

4 Atmosphäre der sechziger Jahre, Trends

Um zu belastbaren Aussagen für die Zukunft zu gelangen, ist es nötig, neben der oben durchgeführten Validierung für die Gegenwart Vergleiche mit beobachteten Langzeittrends durchzuführen, sowie zu sehen, ob sich das Modell für die Bedingungen der sechziger Jahre nahezu ohne FCKW vernünftig verhält. Die Randbedingungen dazu finden sich in Tabelle 1, es wurden wieder 15 Jahre gerechnet mit ca 3 Jahren Vorlauf für 'Spin-up'. Für den antarktischen Frühling erwartet man dann ein Verschwinden des Ozonlochs und einen weniger stabilen und wärmeren Polarwirbel. Genau dies berechnet das Modell, wie man aus Bild 19 für Ozon und Bild 20 für die Temperatur sieht. Es gibt zwar noch Chloraktivierung an PSCs, die geringen Chlormengen von ca 0.7ppb hauptsächlich aus natürlichen Quellen bewirken jedoch keine nennenswerte Ozonzerstörung. Unter den Bedingungen der sechziger Jahre ist am 1. November wie ende März in der Nordhemisphäre unter heutigen Bedingungen Chlornitrat die dominante Komponente (Bild 21). Aktiviertes Chlor und PSCs gibt es am 1. November nicht mehr. Man sieht sehr deutlich die Auswirkungen der Rückkopplung zwischen Ozon und Strahlungserwärmung.

In den zonalen Monatsmitteln für Oktober sieht man Ozonabnahmen bis 90% und Temperaturabnahmen von fast 10K in der unteren Stratosphäre in Südpolnähe sowie verstärkte Dehydrierung in 1990 gegenüber 1960 (Bild 22, linke Seite). Bei etwa 40km Höhe sind die Ozonabnahmen durch die Chlor-Gasphasenchemie je nach Breite ca 15 – 30%, begleitet von einer Abkühlung durch verringerte Absorption von Sonnenstrahlung und verstärkte CO₂-Abstrahlung von ca 4 – 5K. Diese Werte passen zu Satellitenbeobachtungen (SAGE) und Umkehr-Ozonmessungen (z.B. WMO, 1999). Besonders in den Polgebieten sieht man, daß es auch starke Veränderungen bei Vertikalbewegungen geben muß, die den Strahlungseffekt durch adiabatische Abkühlung oder Erwärmung verstärken oder abschwächen. In der Mesosphäre sieht es so aus, als ob das Modell beobachtete Temperaturabnahmen unterschätzt, allerdings sind die Beobachtungen noch recht unsicher. Wasserdampf nimmt ab der mittleren Stratosphäre durch die Methanzunahme um bis zu 10% zu, nahe der Tropopause allerdings durch Anhebung und Abkühlung der Tropopause ab.

Bei den Differenzen der 15-Jahre-Monatsmittel für März (Bild 22, rechte Hälfte) ist die mittlere Erwärmung in der unteren Stratosphäre in Nordpolnähe auffällig. In mittleren Breiten dagegen erfolgt eine Abkühlung. Der Hauptgrund dafür ist eine häufigere Verschiebung des Polarwirbels vom Pol weg in den Neunzigern als in den Sechzigern wie man auch aus Vergleich von Bild 23 und Bild 11b sieht. In der arktischen Mesosphäre ist in den Neunzigern die Erwärmung durch Absinken reduziert, was eine Gesamtabkühlung um mehr als 6K bedingt. Arktisches Ozon in der unteren Stratosphäre nimmt im Mittel um ca 10% ab, im Polarwirbel allerdings um deutlich mehr, wie aus dem Vergleich von Bild 24 und Bild 12b ersichtlich.

Bild 25 zeigt die Unterschiede bei Temperatur, Ozon, Wasserdampf und NAT-PSCs für Märzmittelwerte auf der 70hPa-Fläche. Man sieht deutlich die stärkste Ozonabnahme, bis ca 15%, im europäischen Sektor der Arktis, was zu den Beobachtungen paßt. Wasserdampf nimmt in mittleren Breiten um einige Prozent zu, ebenso die PSCs. In Polnähe sieht man die schon aus Bild 24 bekannte Erwärmung und eine Abnahme der PSCs. Letztere Veränderungen hängen unter anderem mit einer Verschiebung der mittleren Lage des Polarwirbels vom Pol weg zusammen, was auch eine erhöhte Variabilität bedeutet (Bild 27). Die Winter- und Frühlingsmonate verhalten sich hinsichtlich der Trends in Polnähe allerdings sehr unterschiedlich. Von Dezember bis Januar sieht man im Modell als auch in den Berliner Beobachtungen (Zeitreihe 1965-1991, K. Krüger, persönliche Mitteilung) eine signifikante Abkühlung

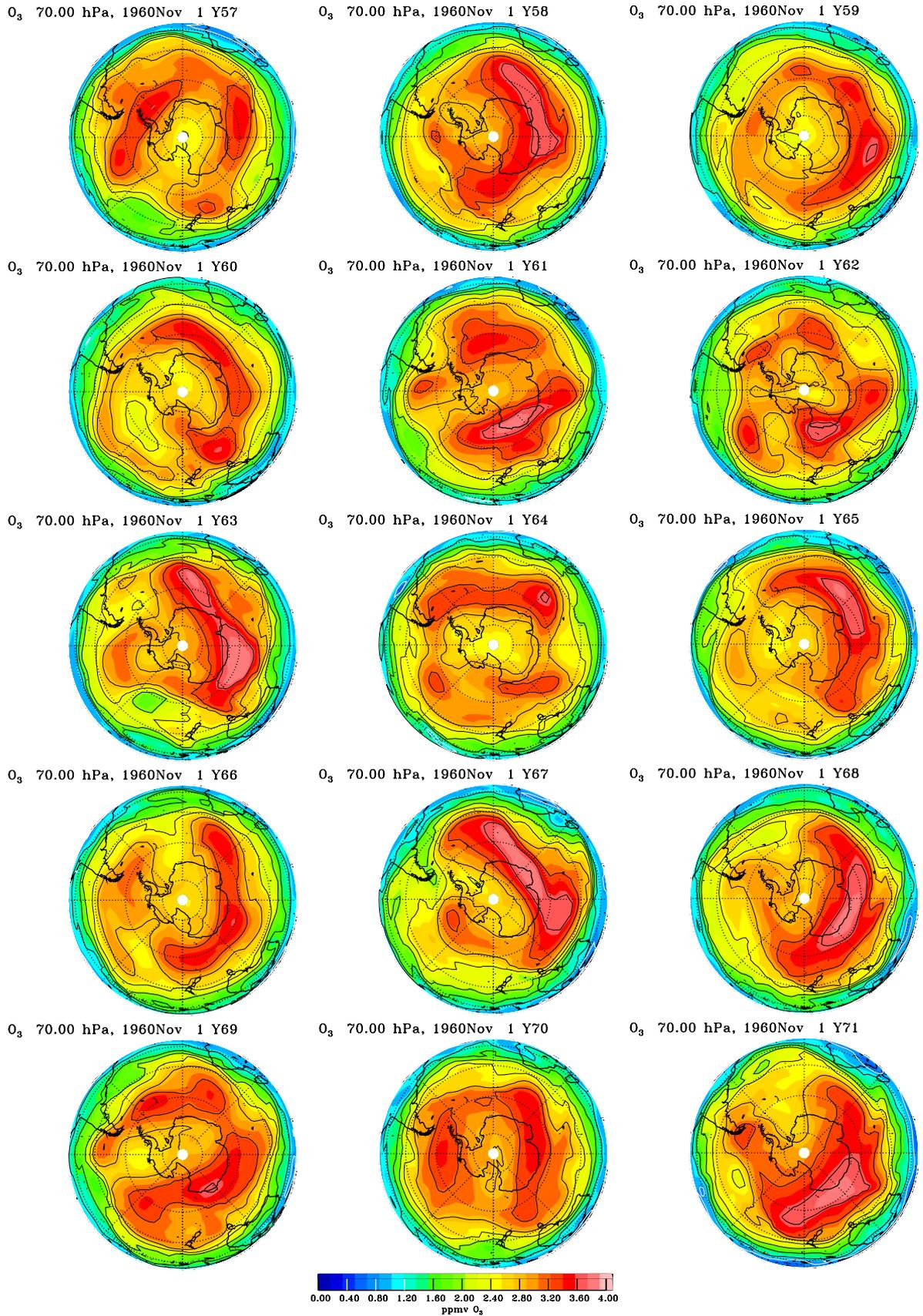
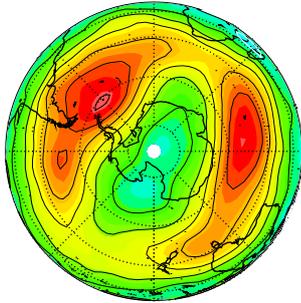
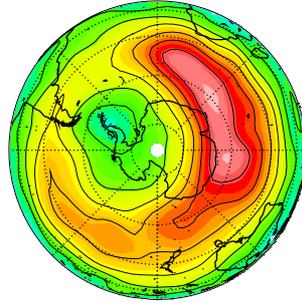


Bild 19: Berechnetes Ozon am 1. November in der unteren Stratosphäre über der Antarktis für die Bedingungen der sechziger Jahre.

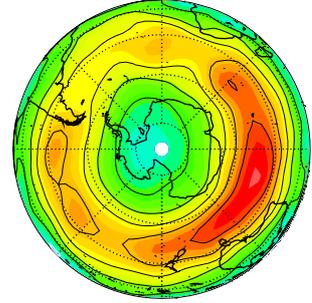
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y57



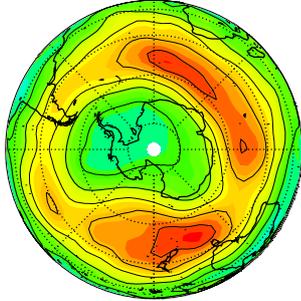
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y58



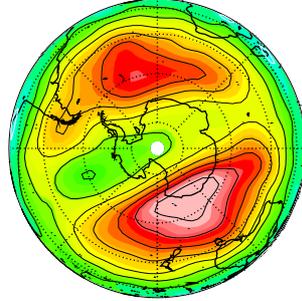
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y59



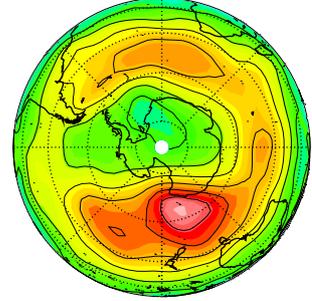
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y60



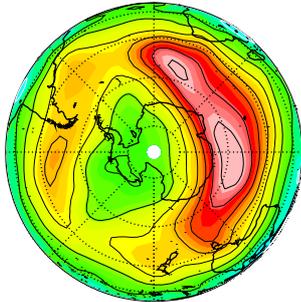
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y61



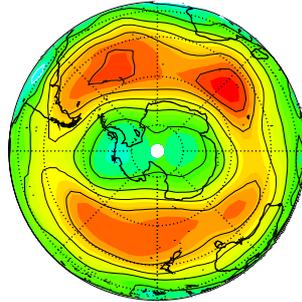
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y62



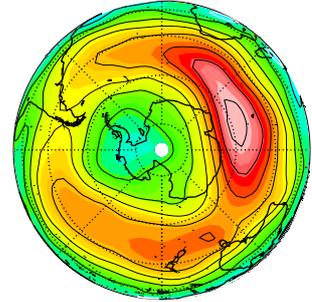
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y63



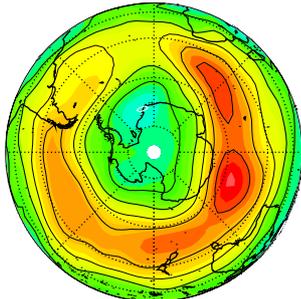
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y64



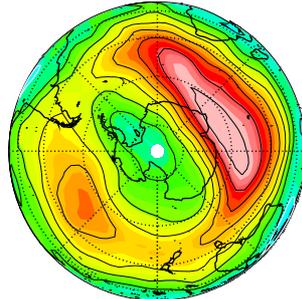
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y65



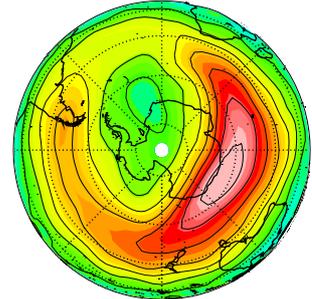
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y66



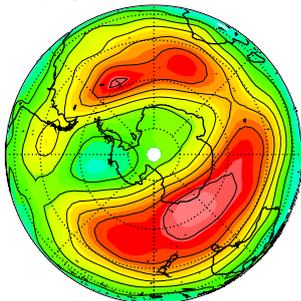
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y67



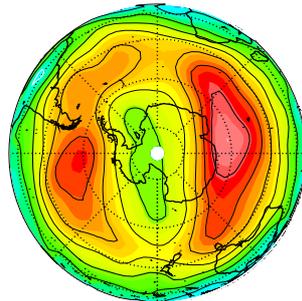
T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y68



T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y69



T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y70



T K 70.00 hPa, 1960 Nov 1 Y71

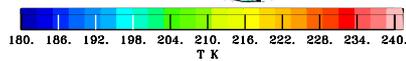
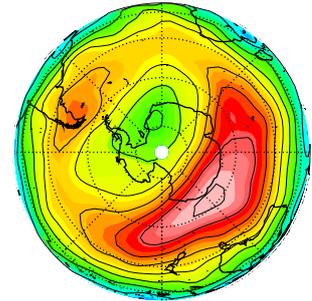


Bild 20: Berechnete Temperaturen über der Antarktis, sechziger Jahre.

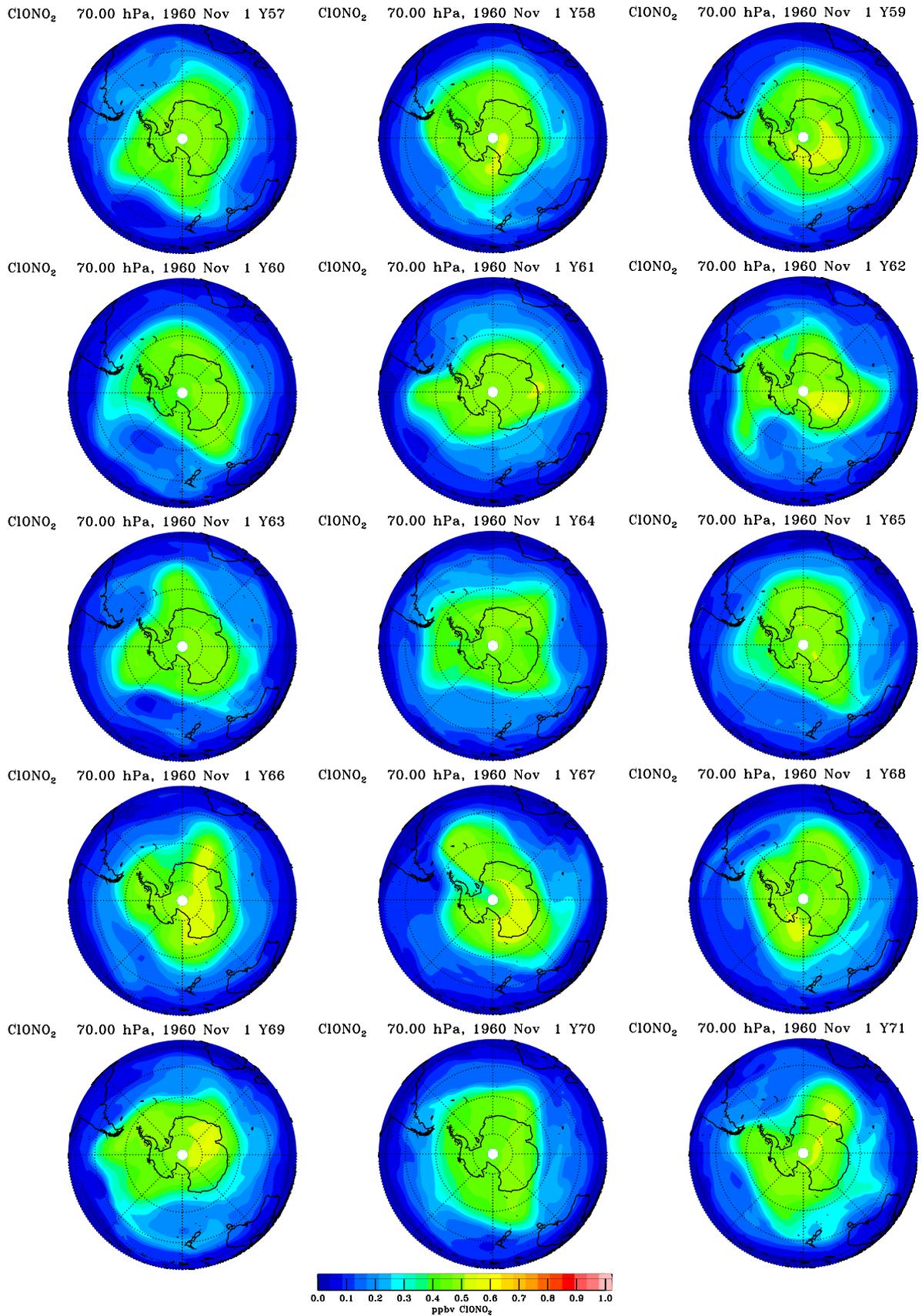


Bild 21: Berechnetes ClONO_2 in der Spätphase des antarktischen Polarwirbels (70 hPa-Fläche, 15 Jahre)

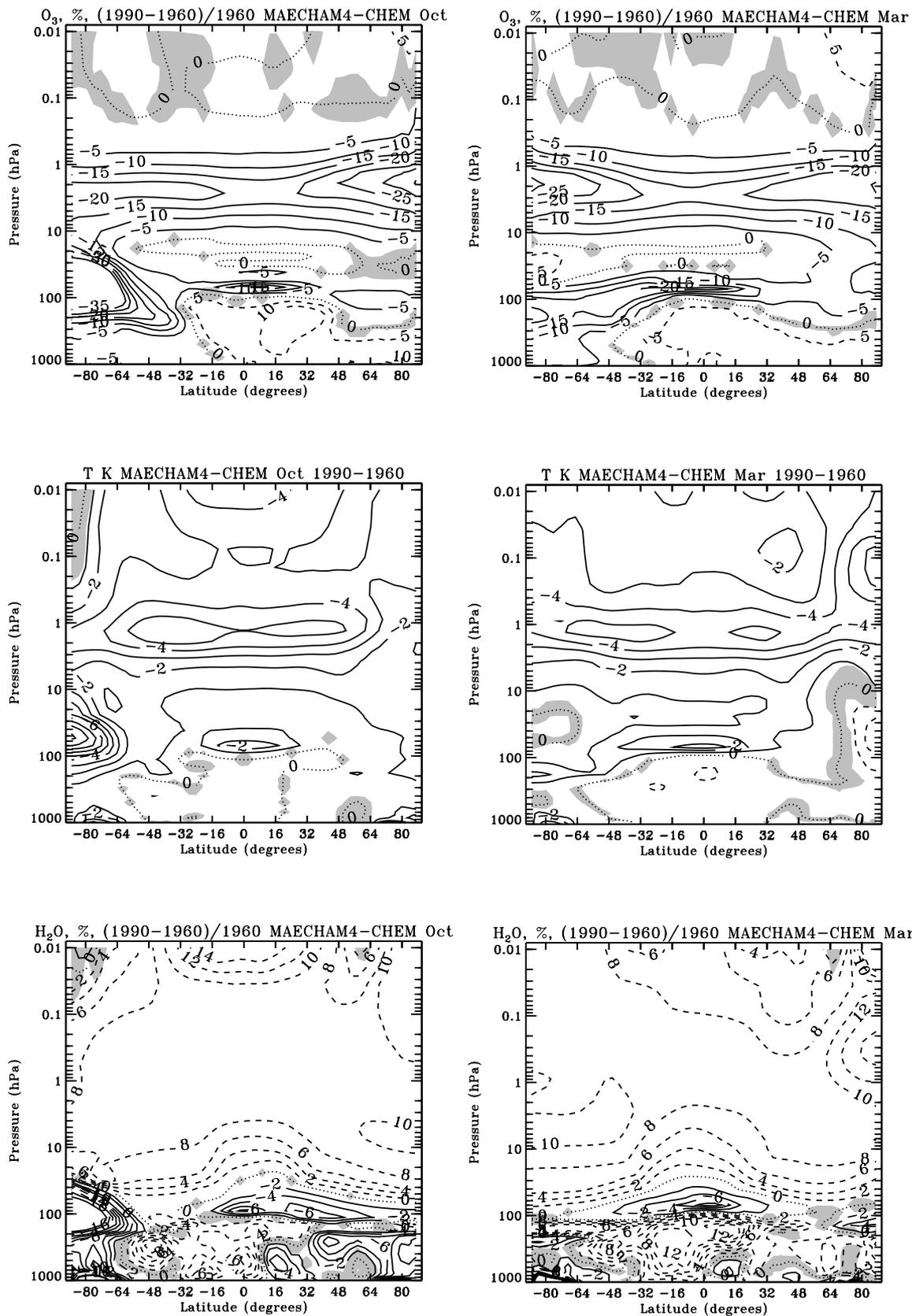


Bild 22: Differenzen der 15-Jahre-Monatsmittel von Ozon, Temperatur und Wasserdampf 1990 gegen 1960, links zonale Mittel für Oktober, rechts für März. Graue Flächen sind nach t-Test nicht signifikant. Beachte, gestrichelte Linien sind positiv.

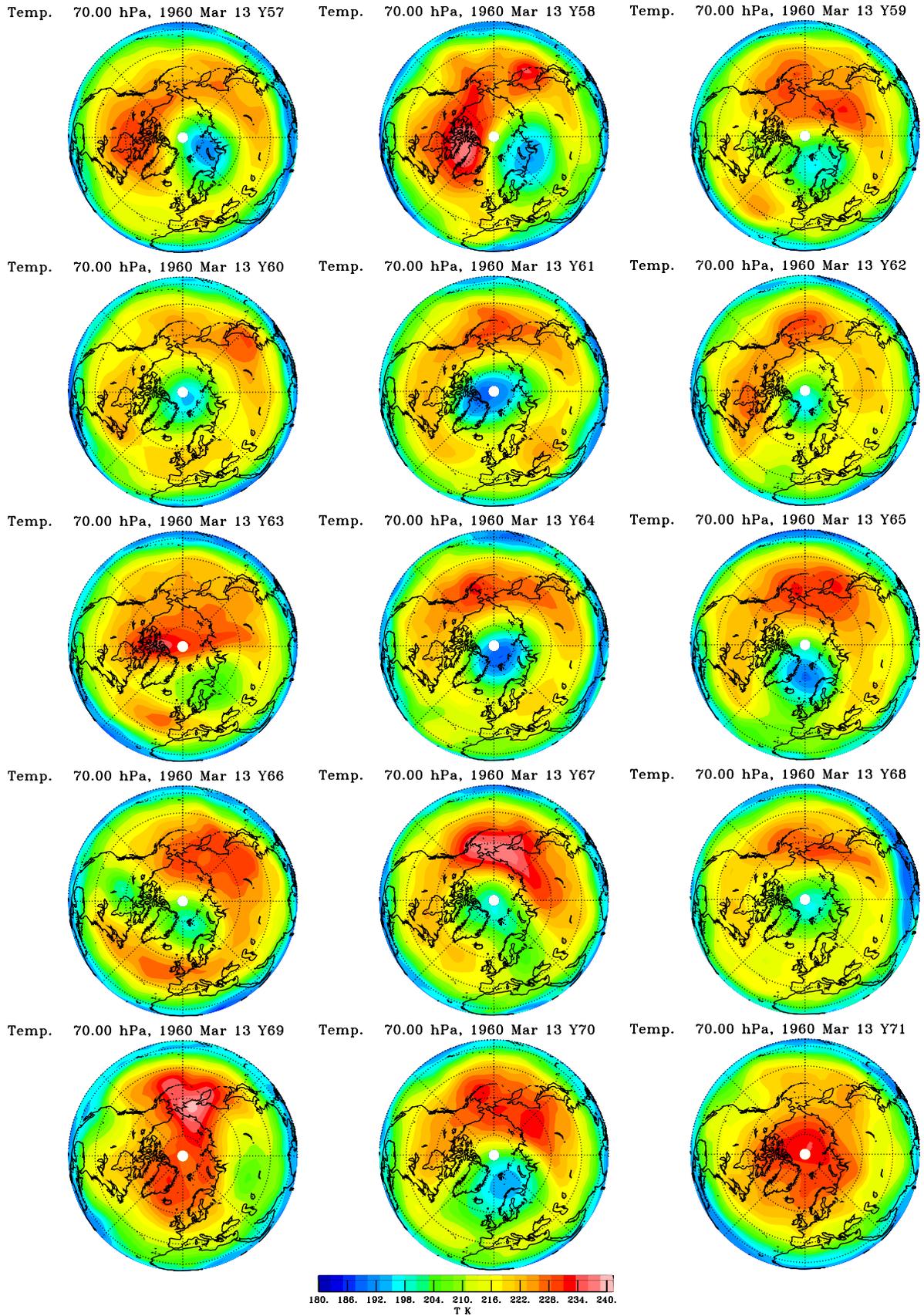
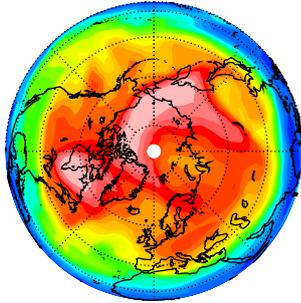
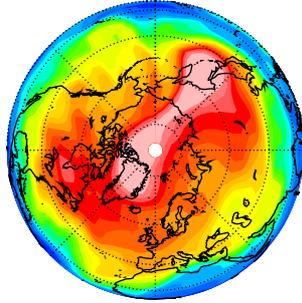


Bild 23: 15 Jahre simulierte Temperaturen für den 13. März 1960 auf der 70hPa-Fläche (MA-ECHAM).

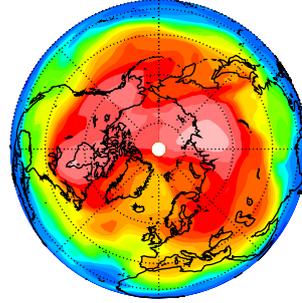
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y57



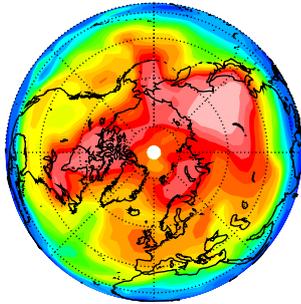
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y58



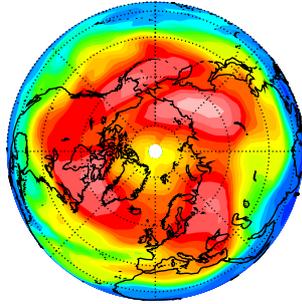
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y59



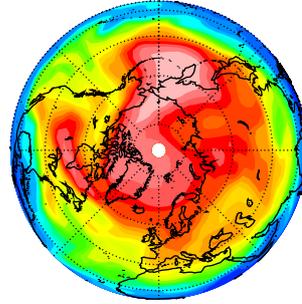
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y60



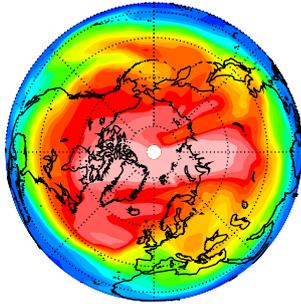
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y61



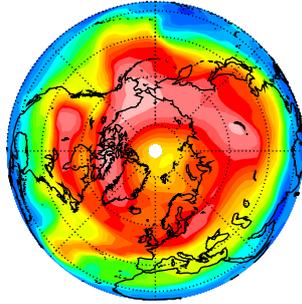
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y62



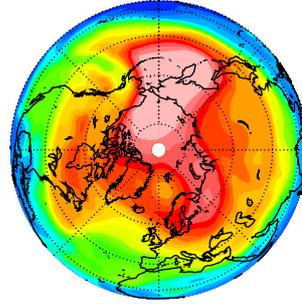
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y63



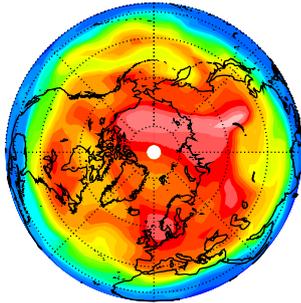
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y64



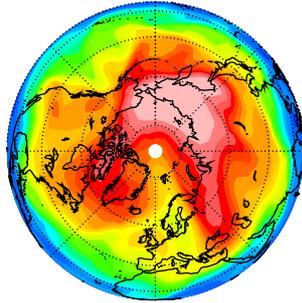
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y65



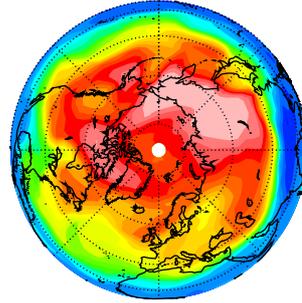
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y66



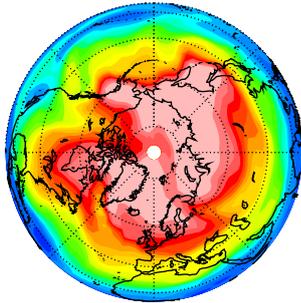
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y67



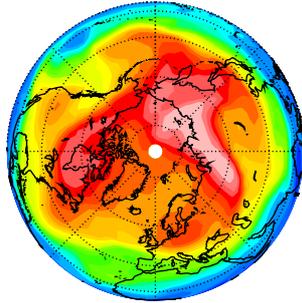
O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y68



O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y69



O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y70



O₃ 70.00 hPa, 1960 Mar 13 Y71

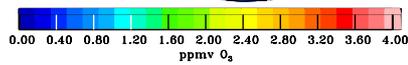
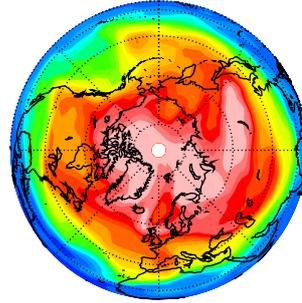


Bild 24: Wie Bild 23, aber für Ozon.

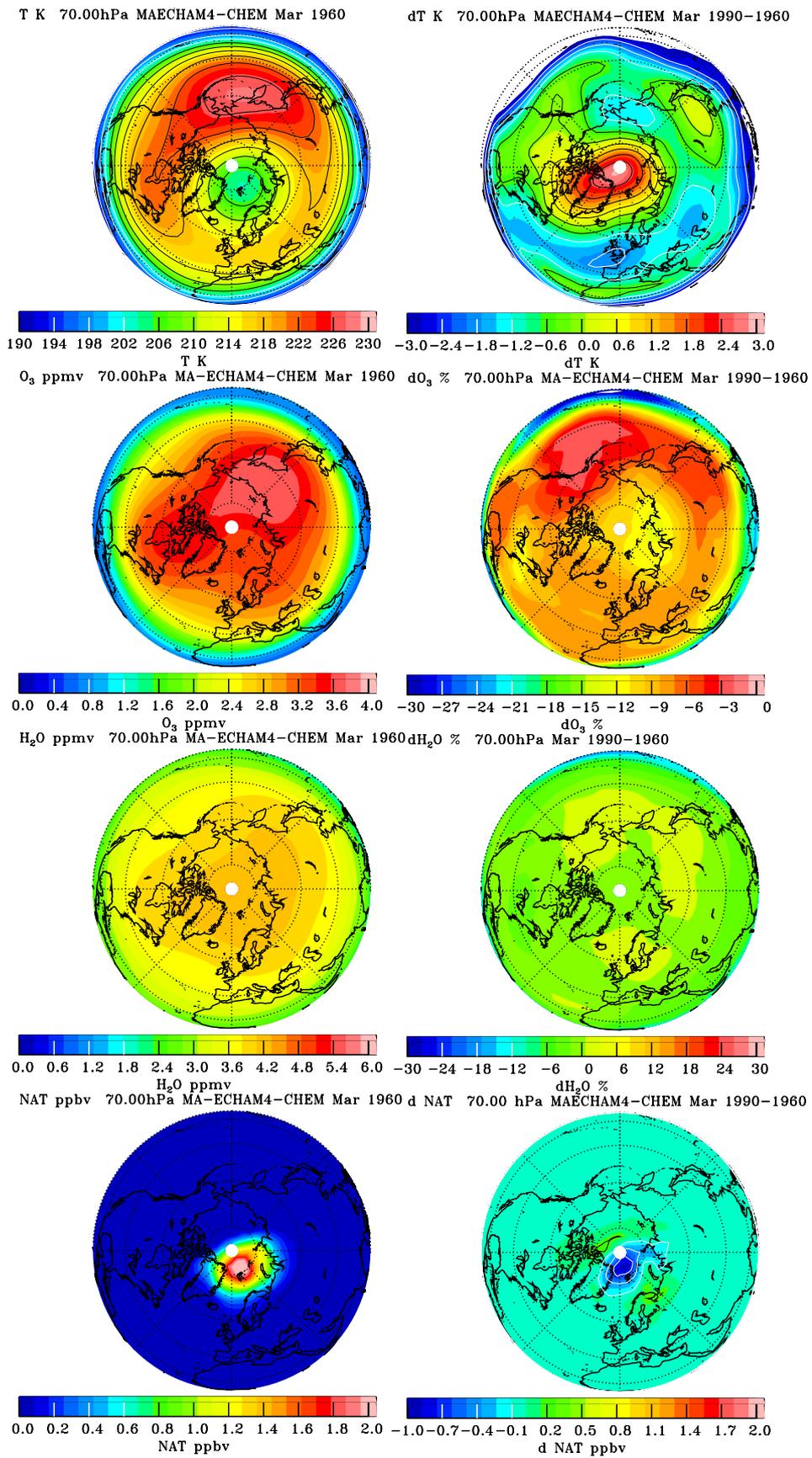
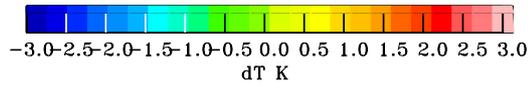
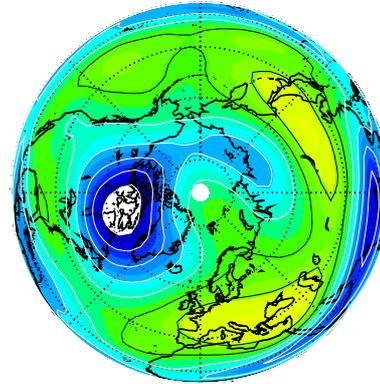
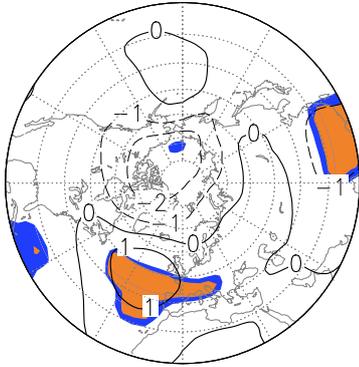
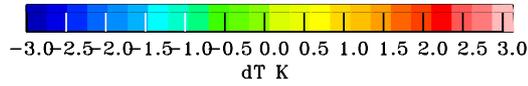
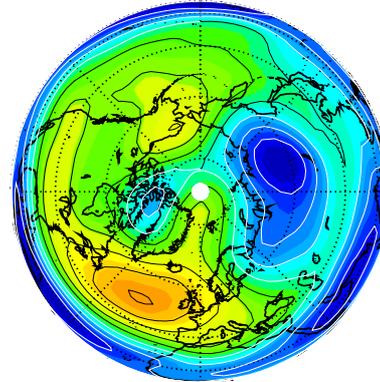
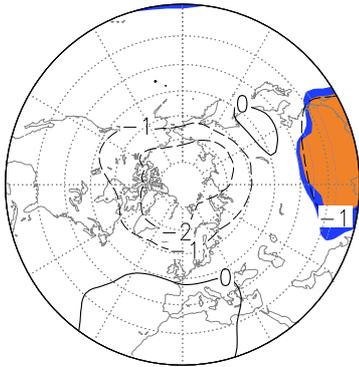


Bild 25: Berechnete Differenzen der 15-Jahre Monatmittel von Temperatur, Ozon, Wasserdampf und NAT-PSiCs zwischen 1990 und 1960 für März bei 70hPa, sowie Mittelwerte für 1960.

dT K 50.00hPa MAECHAM4-CHEM Dec 1990-1960



dT K 50.00hPa MAECHAM4-CHEM Jan 1990-1960



dT K 50.00hPa MAECHAM4-CHEM Feb 1990-1960

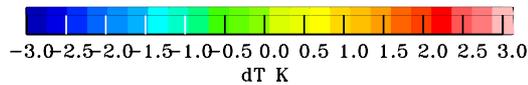
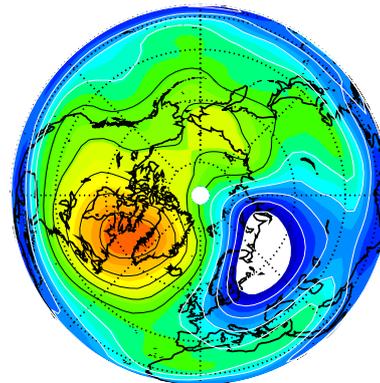
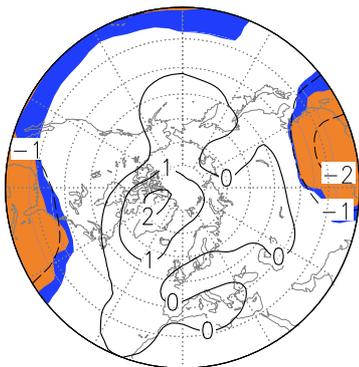
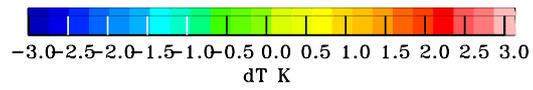
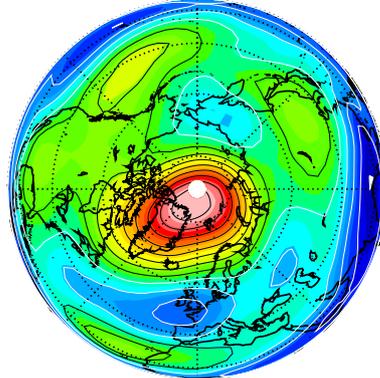
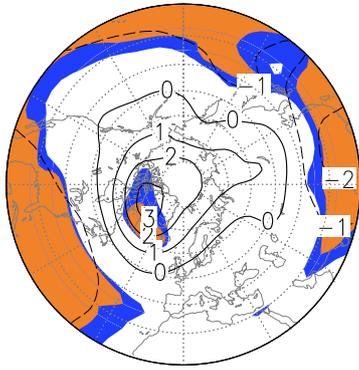
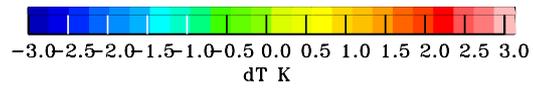
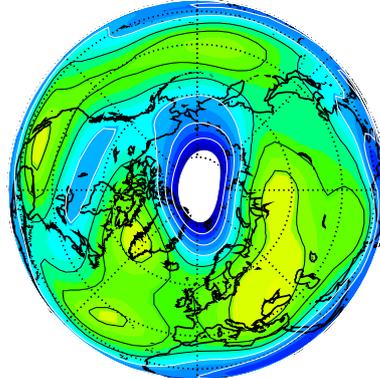
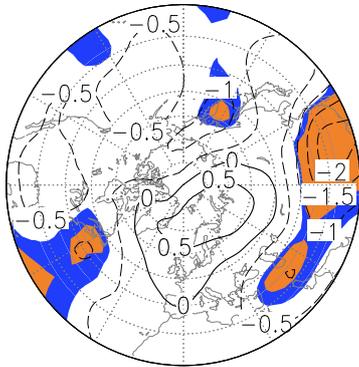


Bild 26a: Beobachtete (links) und berechnete (rechts) Temperaturtrends auf der 50hPa-Fläche in Dezember, Januar und Februar. Die Berliner Daten sind in K/Dekade angegeben, also zum Vergleich mit 3 zu multiplizieren. Bei den Daten ist das 90%-Signifikanz-Gebiet blau unterlegt, das 95%-Gebiet orange. Achtung, verschiedene Projektionen.

dT K 50.00hPa MAECHAM4-CHEM Mar 1990-1960



dT K 50.00hPa MAECHAM4-CHEM Apr 1990-1960



dT K 50.00hPa MAECHAM4-CHEM May 1990-1960

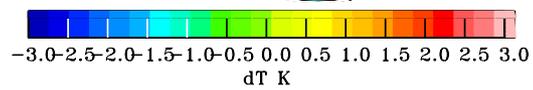
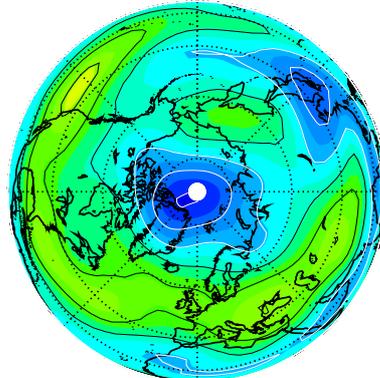
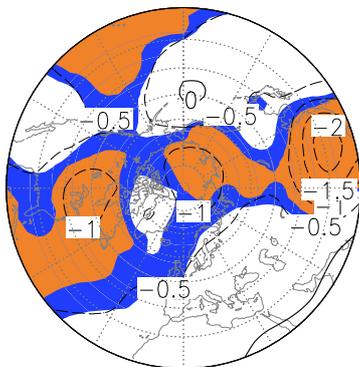


Bild 26b: wie Teil a aber für März, April und Mai.

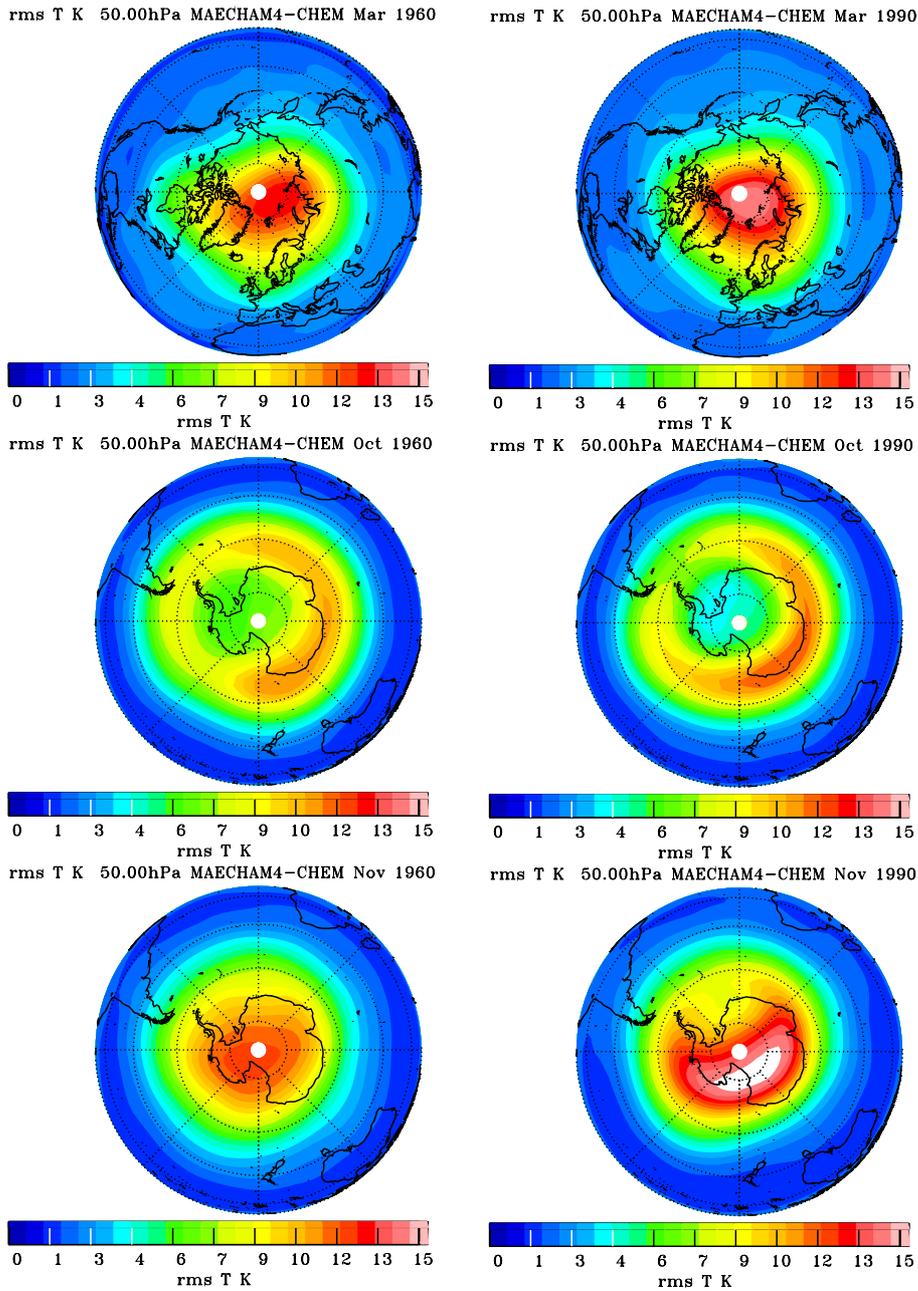


Bild 27: Standardabweichung der Monatsmittel der Temperaturen für März, Oktober und November bei 50hPa für 1960 (links) und 1990 (rechts).

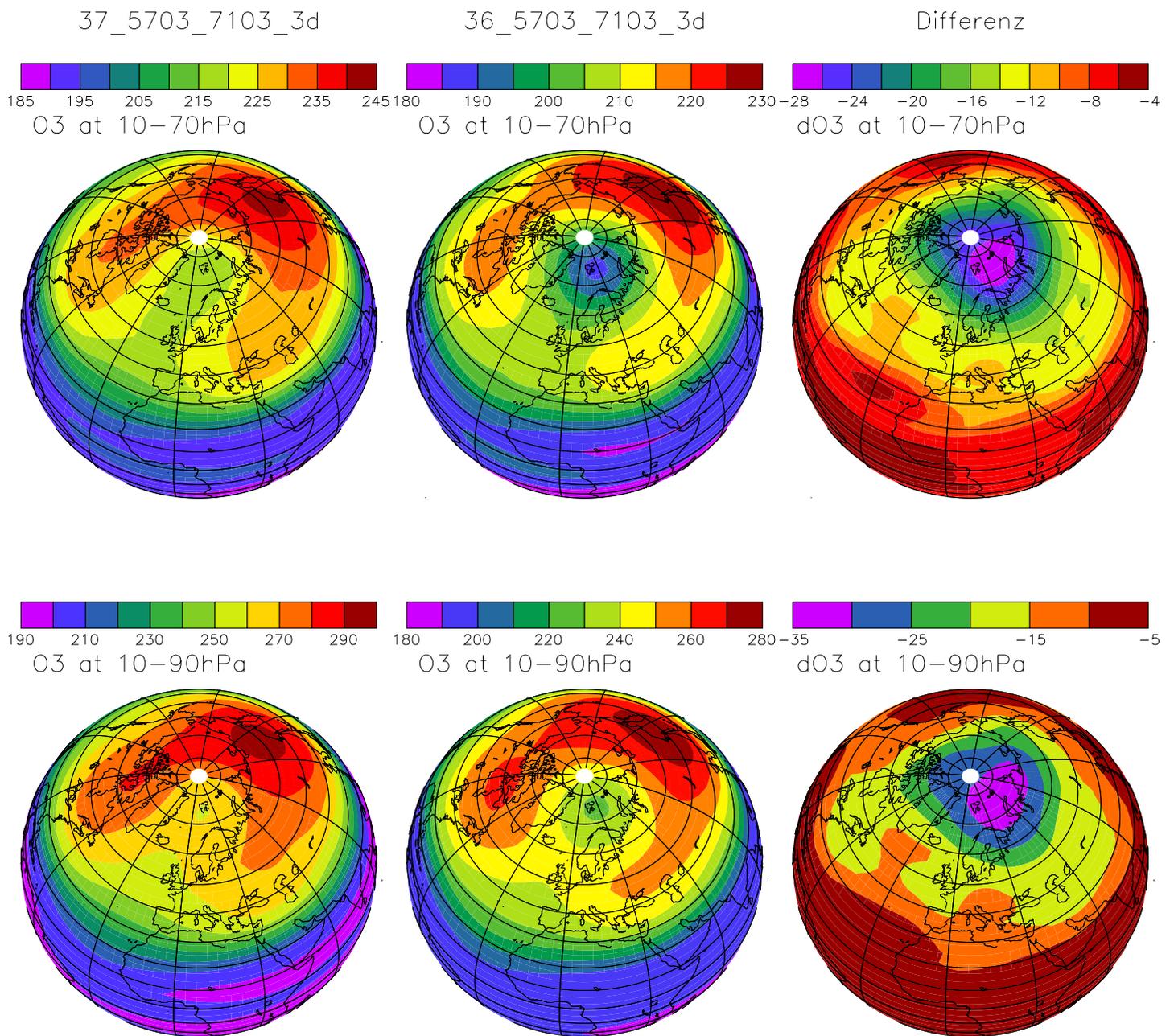


Bild 28: 15-Jahre-Märzmittel des berechneten Gesamt Ozons in unterer und mittlerer Stratosphäre (DU) für sechziger (links) und neunziger (mitte) Jahre und deren Differenz (rechts).

in Polnähe, in Bild 26 für das 50hpa-Niveau (ca 20km) dargestellt. Im Gegensatz dazu zeigen sich im März sowohl in den Berliner Daten als auch im Modell eine Erwärmung am Pol und eine Abkühlung im asiatischen Sektor und über dem Ostatlantik. Im Februar überschätzt das Modell die Abkühlung über Russland gegenüber den Daten, das Gebiet mit Erwärmung ist etwas richtung Grönland verschoben. Im April gibt es wieder sowohl in den Daten als auch im Modell Abkühlung in Polnähe. Das Modell reproduziert also viele Änderungen der Zirkulationsmuster. Die Signifikanz ist größer als 50%, erreicht aber wegen der hohen Variabilität und den relativ kurzen Zeitreihen von jeweils 15 Jahren oft keine 90% (t-Test).

Bild 27 zeigt, daß sich in den Neunzigern im März am Nordpol und im Oktober in südlichen mittleren Breiten die Variabilität durch die Rückkopplung zwischen Ozonzerstörung, Strahlung, Dynamik und PSCs erhöht. Sehr deutlich ist auch die Zunahme der Variabilität in der Antarktis im November bedingt durch längere Lebensdauer des Polarwirbels bei den hohen Chlorwerten für 1990. Um die beobachteten Veränderungen zu reproduzieren, ist es entscheidend, das Modell in der voll rückgekoppelten Version zu haben. Man beachte auch, daß es mit den Bedingungen für die Sechziger in der Nordhemisphäre keinen bis ende April stabilen Polarwirbel gibt wie einmal in den Simulationen für 1990 aufgetreten. Bild 28 enthält die 15-Jahre-Märzmittel des Gesamtozons der unteren und mittleren Stratosphäre für die Sechziger und die Neunziger sowie die Differenz. Die Abnahmen der Ozonsäulen im europäischen Sektor der Arktis um ca 30 DU und nahezu keine Abnahme in den Tropen sind konsistent mit den TOMS/BUV-Satellitendaten sowie Trends von Dobsonstationen (z.B. WMO, 1999, Seiten 4.24, 4.35). Der Vergleich der berechneten und beobachteten Veränderungen zwischen 1960 und 1990 zeigt, daß das Modell belastbare Aussagen über die zukünftige Entwicklung gestatten sollte.

5 Prognose für 2030

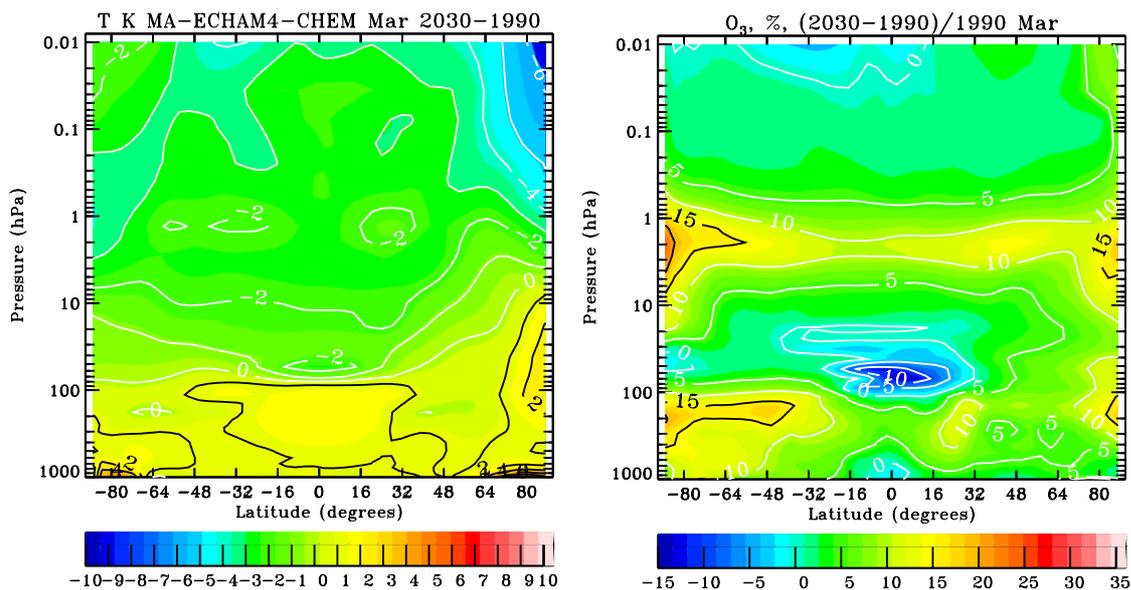


Bild 29a: Differenzen der 15-Jahre-Monatsmittel für März 2030 gegen März 1990, Temperatur und Ozon.

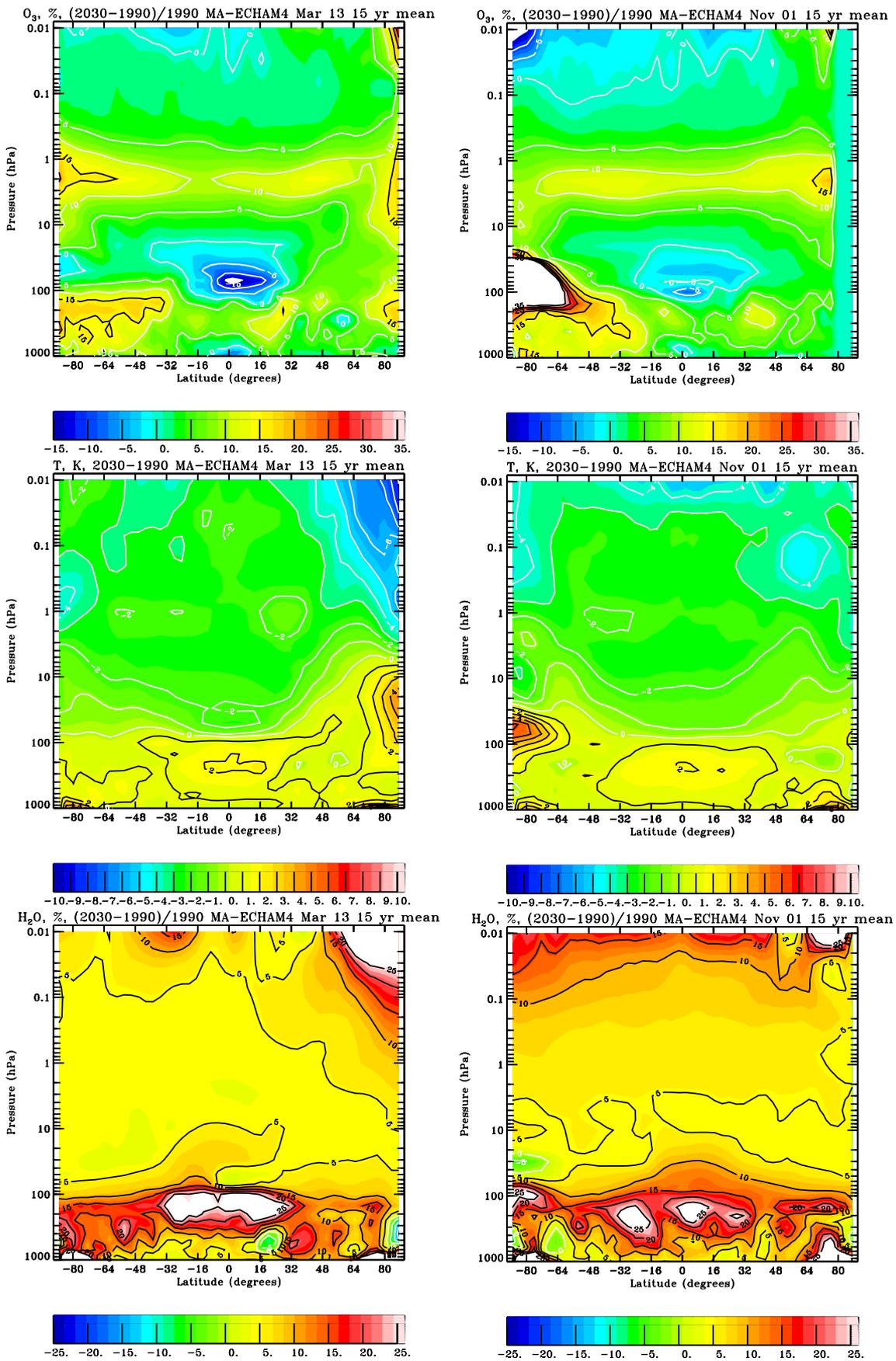
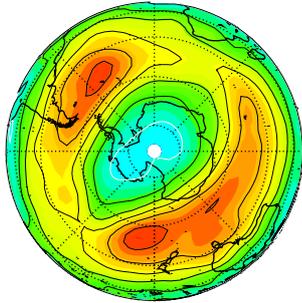
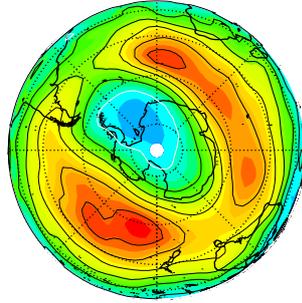


Bild 29b: Differenzen der 15-Jahre-Mittel für 13. März und 1. November, 2030 gegen 1990 (im März ähnlich wie Monatsmittel).

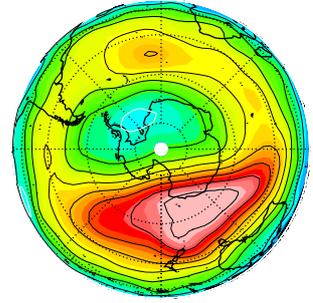
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y57



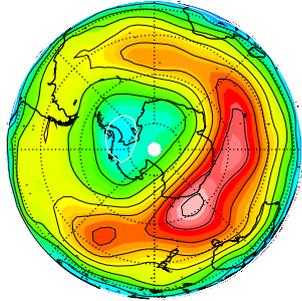
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y58



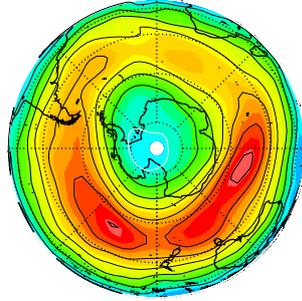
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y58



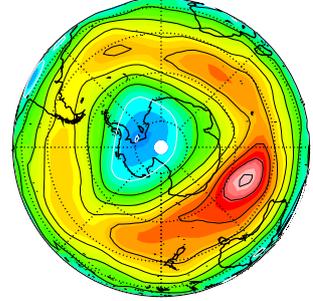
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y59



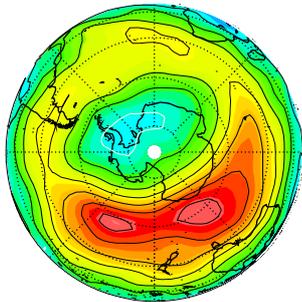
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y59



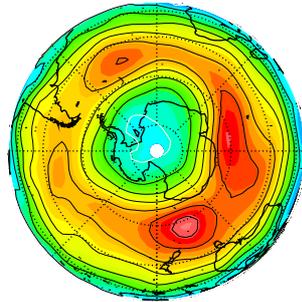
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y60



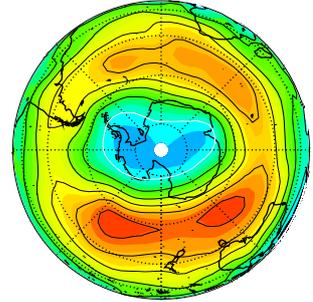
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y60



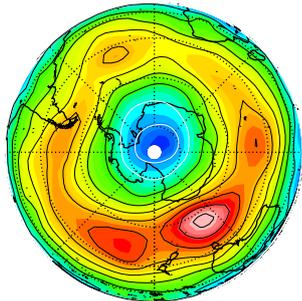
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y61



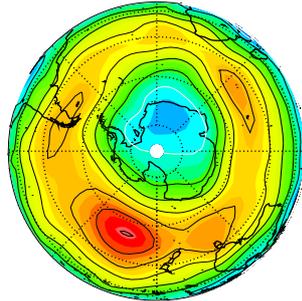
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y61



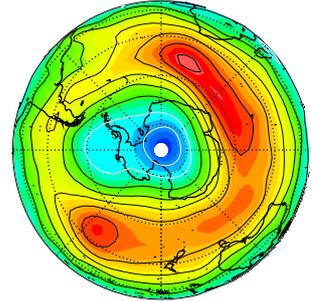
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y62



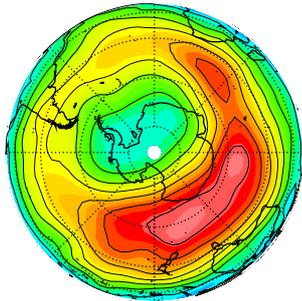
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y62



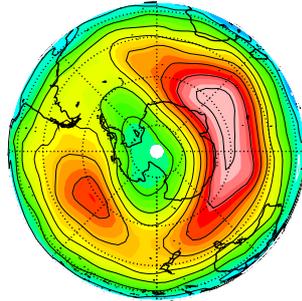
T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y63



T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y63



T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y64



T K 70.00 hPa, 2030 Nov 1 Y64

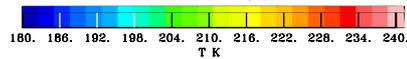
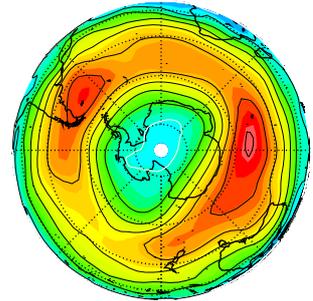
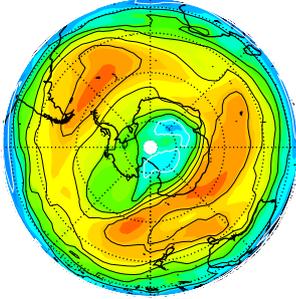
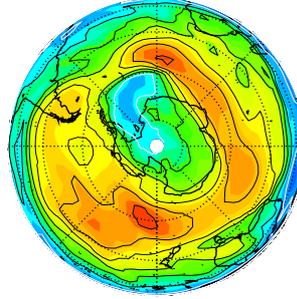


Bild 30: Mit MA-ECHAM berechnete Temperaturen auf der 70hPa-Fläche über der Antarktis, 1. November aus 15 Modelljahren mit Bedingungen für 2030.

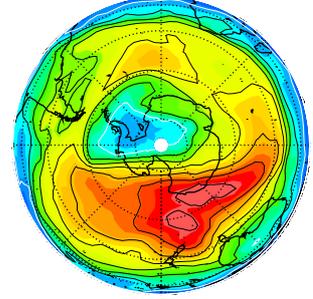
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y57



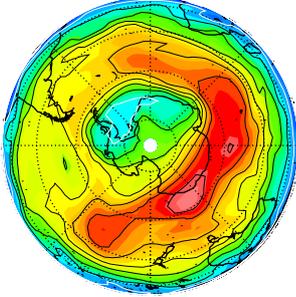
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y58



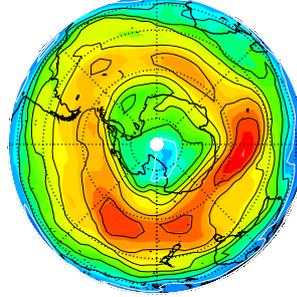
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y58



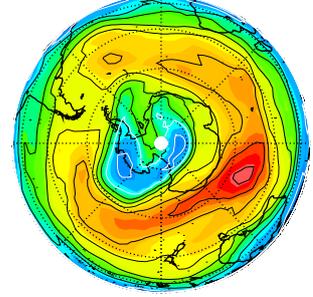
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y59



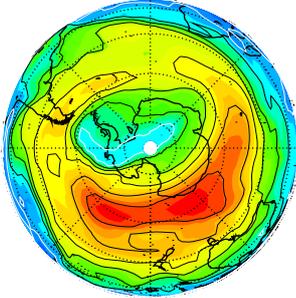
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y59



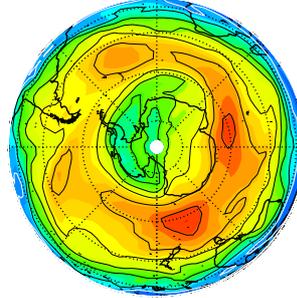
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y60



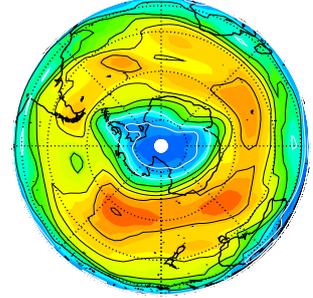
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y60



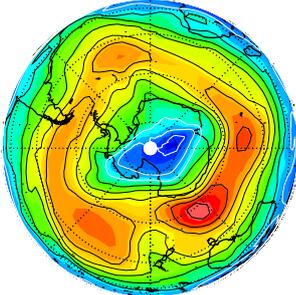
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y61



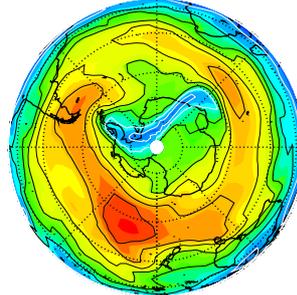
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y61



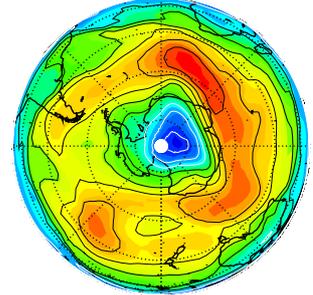
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y62



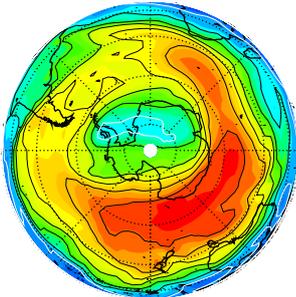
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y62



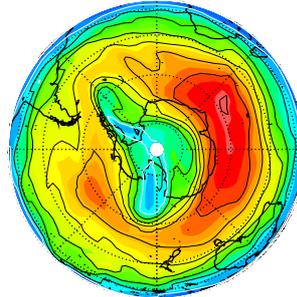
O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y63



O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y63



O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y64



O₃ 70.00 hPa, 2030Nov 1 Y64

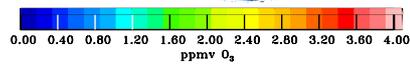
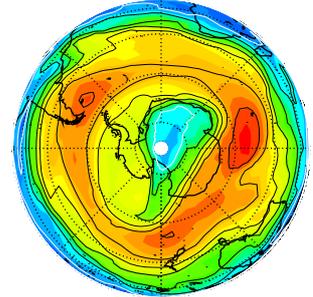


Bild 31a: Wie Bild 30 aber für Ozon.

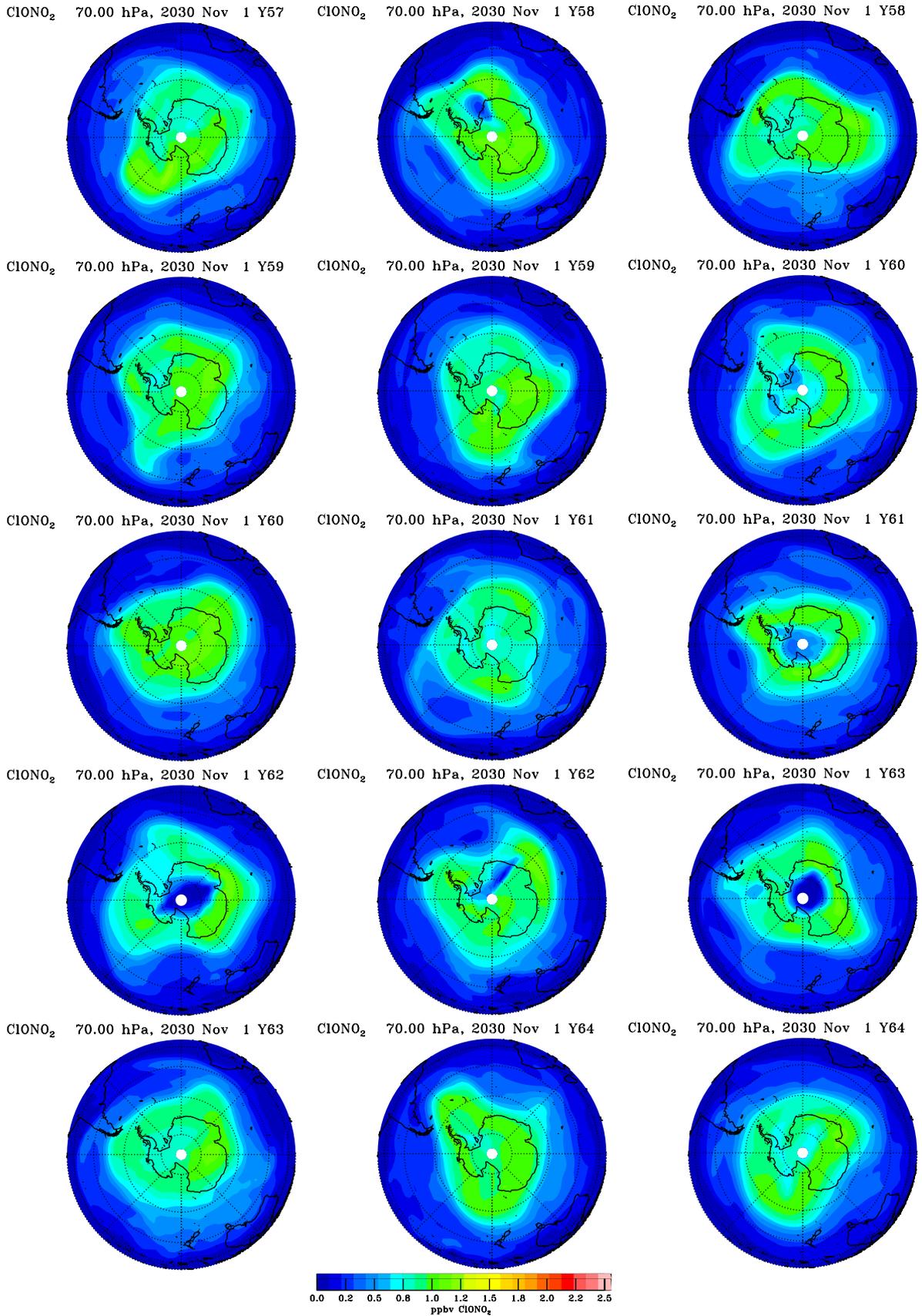


Bild 32: Wie Bild 30 aber für CIONO₂.

Im Zukunftsszenario wird angenommen, daß CO_2 weiter schnell steigt, CH_4 sich mit geringeren Wachstumsraten als von 1960 bis 1990 erhöht und für die FCKW die Bedingungen des revidierten Montrealer Protokolls greifen, also der Chlorgehalt in der Stratosphäre auf den Stand der frühen achziger Jahre zurückgegangen ist (Tabelle 1, WMO, 1999). Die Meeresoberflächentemperaturen entstammen einem gekoppeltem Ozean-Atmosphärenmodell für diese Bedingungen (korrigiert um typische Abweichungen zwischen Modell und Beobachtungen in den Neunzigern). Die Erwärmung der unteren Troposphäre um einige Grad vor allem in hohen Breiten hat Rückwirkungen auf die Zirkulation in der Stratosphäre, wie Bild 29 mit den Veränderungen der zonal gemittelten 15-Jahre-Monatsmittel für März und Oktober / November (in Bild 29b repräsentiert durch typische Einzeltage-Mittelungen) zeigt. Beachte, daß die Analyse für den 13. März dem Märzmittel sehr ähnlich ist, also als 'Quick-Look' geeignet ist. Im März sieht man in Nordpolnähe eine weitere Erwärmung gegenüber 1990, in der oberen Stratosphäre sorgt die Erholung des Ozons für eine teilweise Kompensation der zusätzlichen Abkühlung durch mehr CO_2 . Die tropische Tropopause kühlt sich weiter ab. In der unteren Stratosphäre der Polargebiete, hier besonders in der Antarktis, sieht man eine deutliche Erholung des Ozons (bezogen auf 1990 eine Zunahme um bis zu 400%). Im Oktober in der Antarktis bewirkt die Kopplung über die Strahlung eine Erwärmung um mehr als 5K. Wasserdampf nimmt wegen des langsameren Methananstiegs nur um 4% zu. Im Gegensatz zur Entwicklung von 1960 zu 1990 erfolgt keine Wasserdampfabnahme im Bereich der tropischen Tropopause, die starke Zunahme in der Troposphäre in Oktober und März (der gezeigte 13. März ist dem Monatsmittel sehr ähnlich) pflanzt sich wohl über erhöhte Variabilität mit der Länge nach oben hin fort. Bei Wasserdampf in der Mesosphäre, der oberen Stratosphäre und bei 20hPa in den Polarwirbeln sieht man deutlich den Einfluß von Änderungen bei der mittleren Vertikalbewegung.

In der Antarktis dominiert der Einfluß der Chlorreduktion. Auf der 70hPa Fläche sieht das Ozonloch anfang November so aus wie in den frühen achziger Jahren mit etwa halbsoviel Ozon im Wirbel wie in den Sechzigern (Bild 30). Mehr Ozon bewirkt eine stärkere Strahlungserwärmung (Bild 31), weniger PSCs und weniger aktives Chlor. Am 1. November ist nur noch in 4 von 15 Modelljahren aktives Chlor vorhanden im Gegensatz zu 13 von 15 in 1990. Chlornitrat ist die dominante Chlorkomponente im Polarwirbel (Bild 32) und man hat einen HCl-Kragen am Wirbelrand, also eine gegensätzliche Situation wie in 1990.

Im arktischen Frühling nimmt die Variabilität weiter zu. Nun gibt es auch ein Beispiel, wo der modellierte Polarwirbel im März über Westeuropa liegt. Es gibt viele warme Polarfrühlings und kein Anzeichen für eine Häufung von stabilen und kalten Polarwirbeln nahe des Pols im Gegensatz zu Shindell et al. (1998). Kalte Wirbel treten in ähnlicher Wahrscheinlichkeit auf wie in 1990 wie aus Bild 33 ersichtlich. Vergleich der Bilder 34a und b für den 13. und 29. März zeigt, daß die Wirbel oft ähnlich wie in 1990 schon im März zusammenbrechen. In den kalten Wirbeln sorgt die Verringerung des Chlors dafür, daß der berechnete Ozonabbau in 2030 deutlich weniger ist als in 1990, abgesehen von der Situation mit einer starken Südauslenkung des Wirbels (Bild 34), wo mehr verfügbare Sonnenstrahlung für schnellen Ozonabbau durch Chlor sorgt, wahrscheinlich auch in Kombination mit Einmischen ozonarmer Luft aus niederen Breiten. Daß Chemie beteiligt ist, sieht man an Bild 35 für HCl und Bild 36 für aktiviertes Chlor.

Bild 37 zeigt die Veränderungen bei 15-Jahre-Mittelwerten von Ozon, Temperatur und Wasserdampf für die 70hPa-Fläche am 13. März von 2030 gegenüber 1990. Auffällig ist die mittlere Ozonerholung über Sibirien, aber eine weitere Ozonabnahme über Westeuropa, die allerdings geringer wird, wenn man spätere Tage im März dazunimmt. Der mittlere Wasserdampf nimmt geringfügig zu, abgesehen von dem Gebiet über Westeuropa mit vermehrter

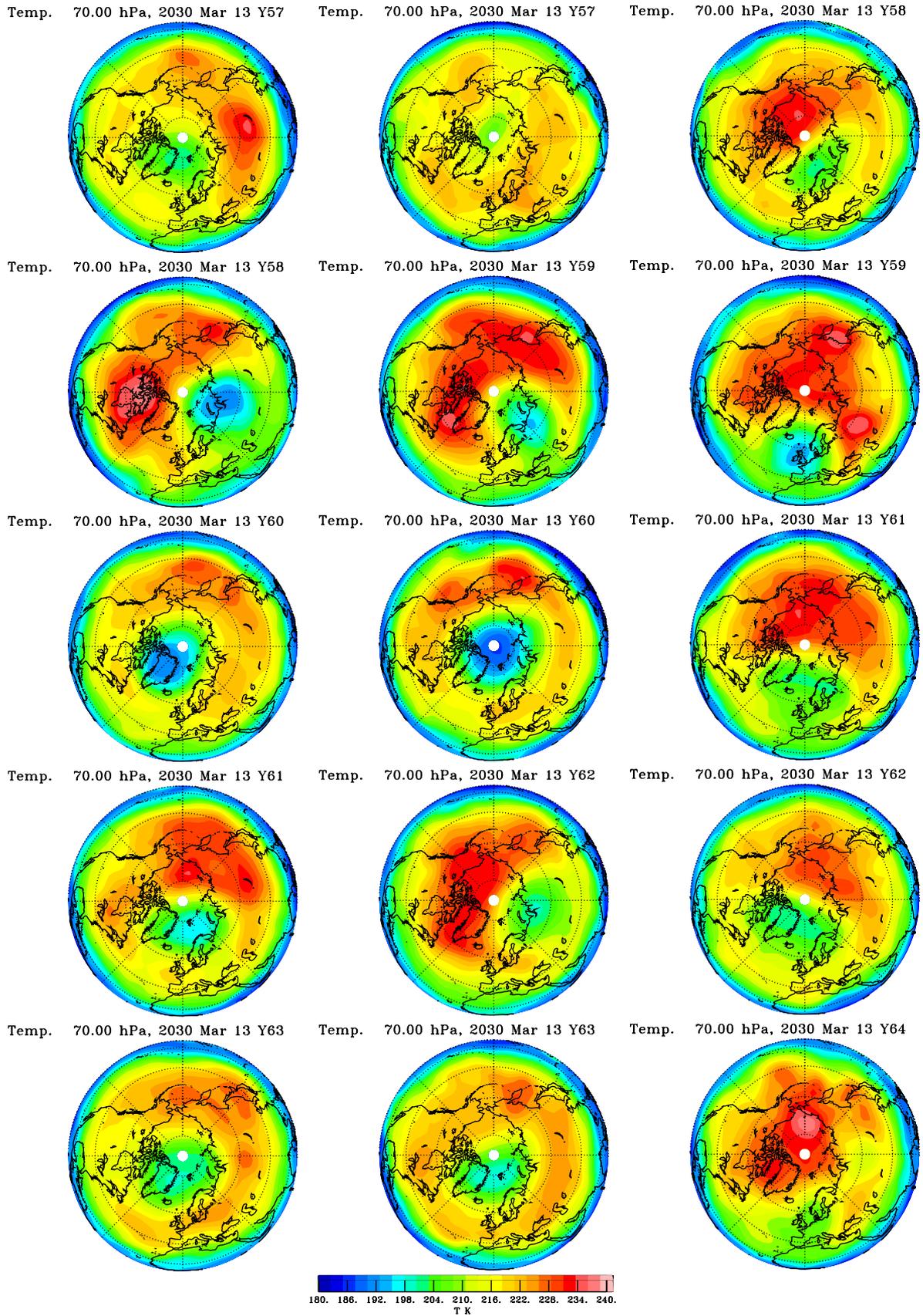
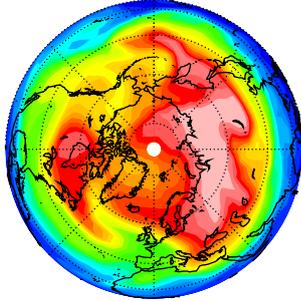
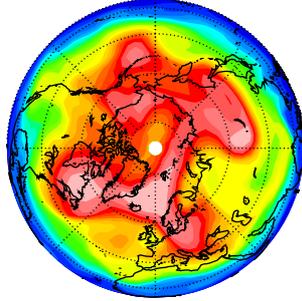


Bild 33: Mit MA-ECHAM berechnete Temperaturen auf der 70hPa-Fläche über der Arktis, 13. März aus 15 Modelljahren mit Bedingungen für 2030.

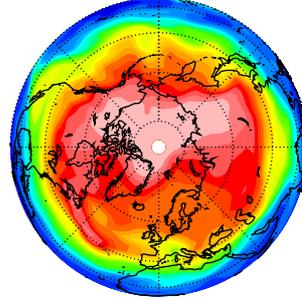
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y57



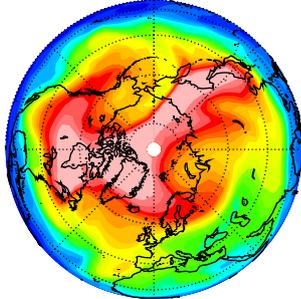
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y57



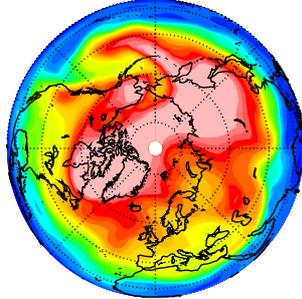
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y58



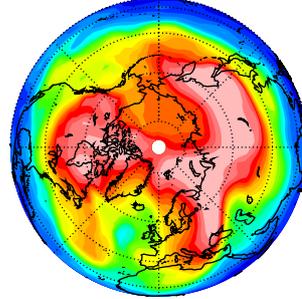
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y58



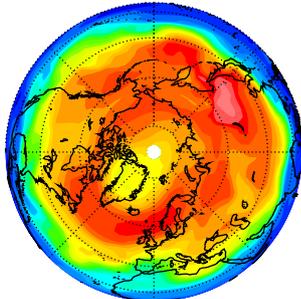
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y59



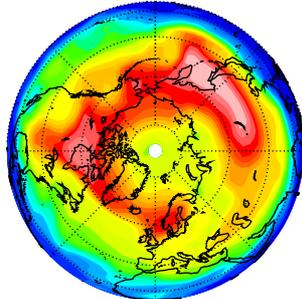
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y59



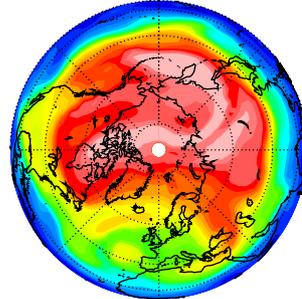
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y60



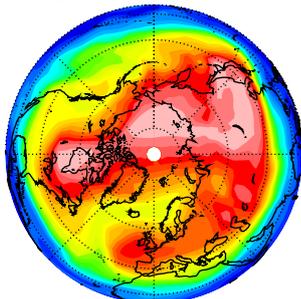
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y60



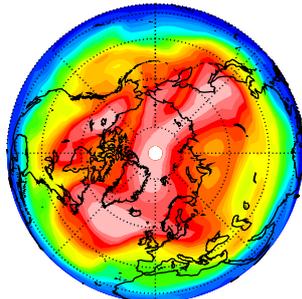
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y61



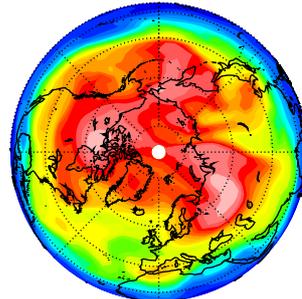
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y61



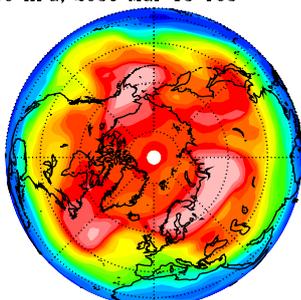
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y62



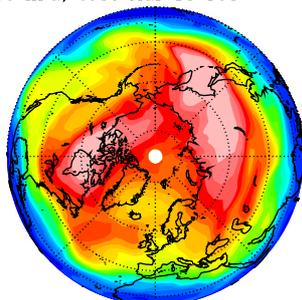
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y62



O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y63



O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y63



O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 13 Y64

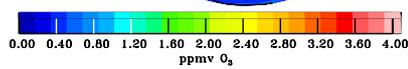
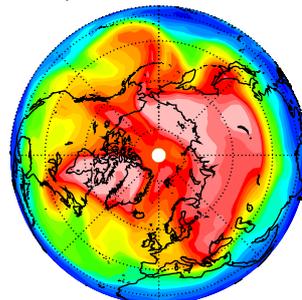
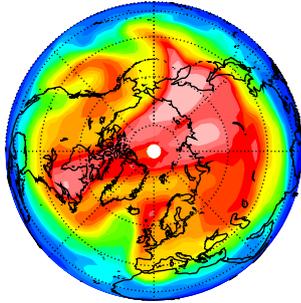
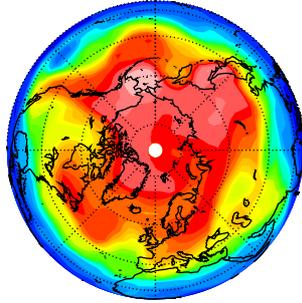


Bild 34a: Wie Bild 33 aber für Ozon.

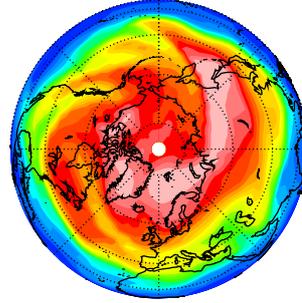
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y57



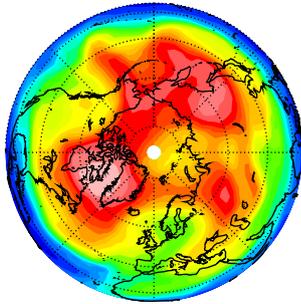
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y57



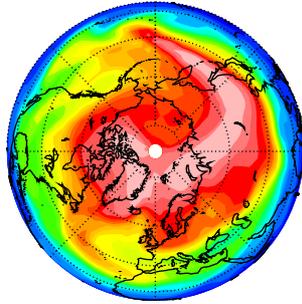
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y58



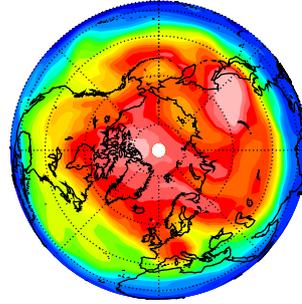
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y58



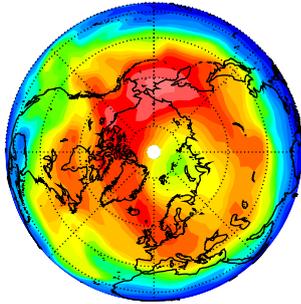
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y59



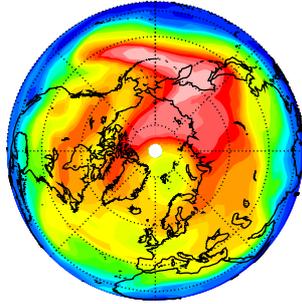
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y59



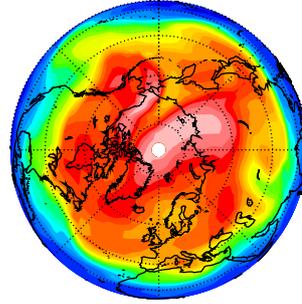
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y60



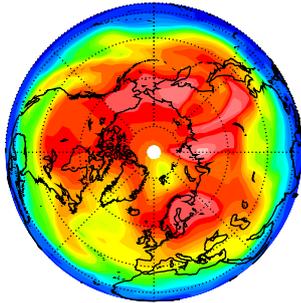
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y60



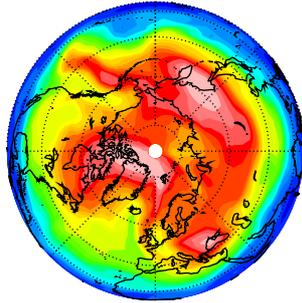
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y61



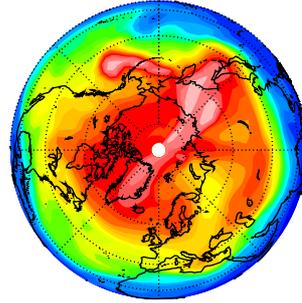
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y61



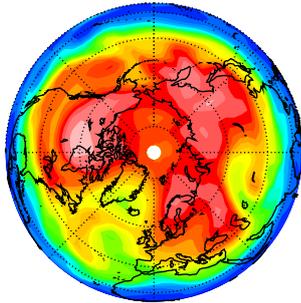
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y62



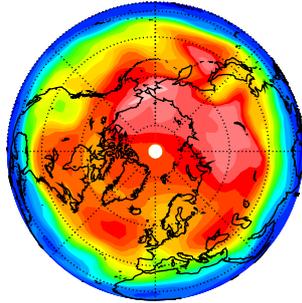
O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y62



O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y63



O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y63



O₃ 70.00 hPa, 2030 Mar 29 Y64

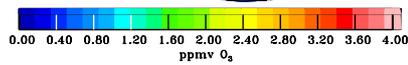
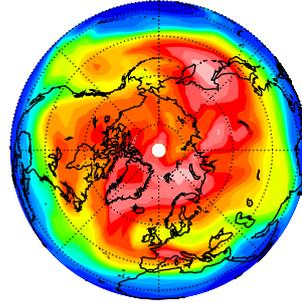


Bild 34b: Wie Bild 33 aber für Ozon am 29. März.

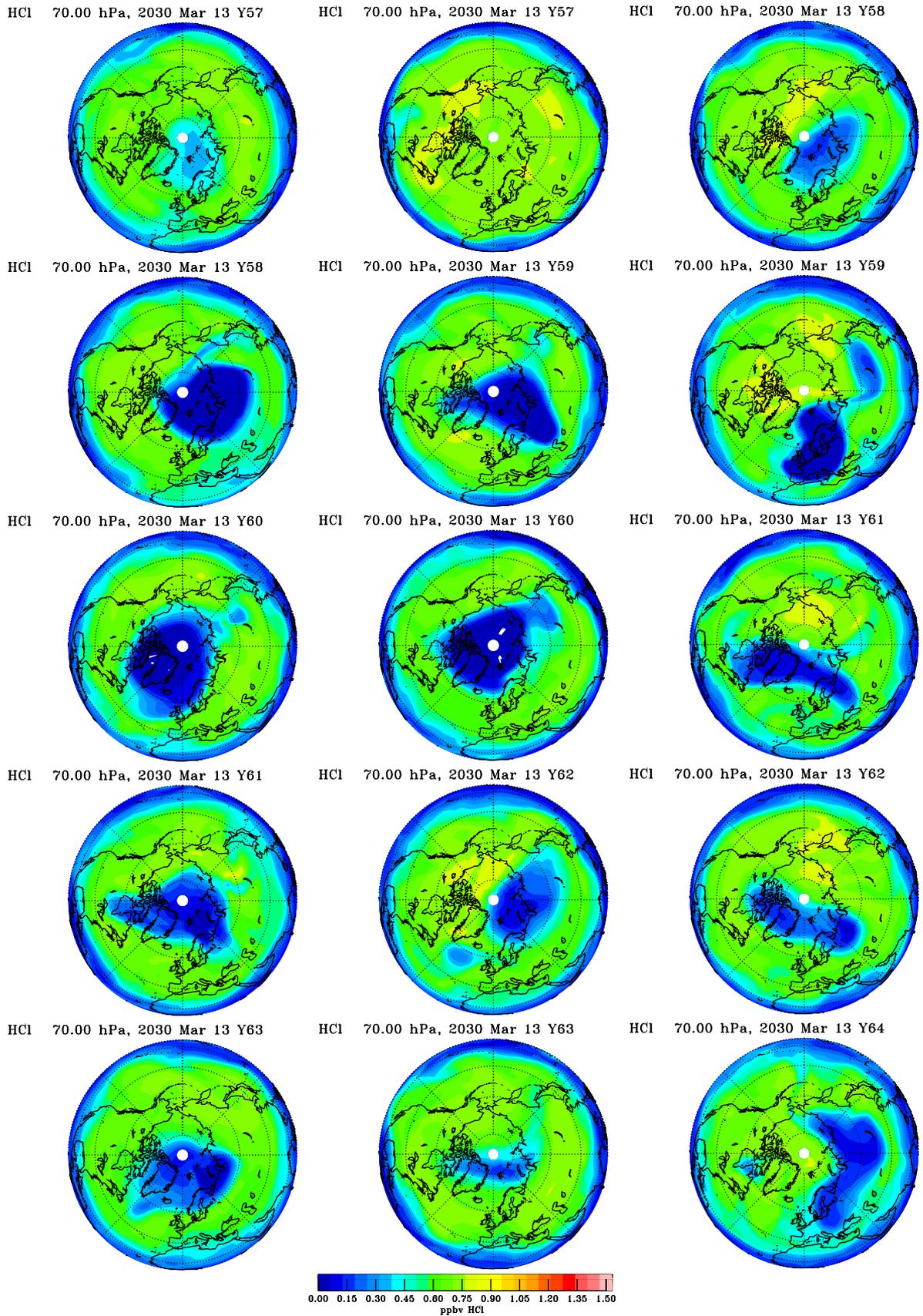


Bild 35: Wie Bild 33 aber HCl.

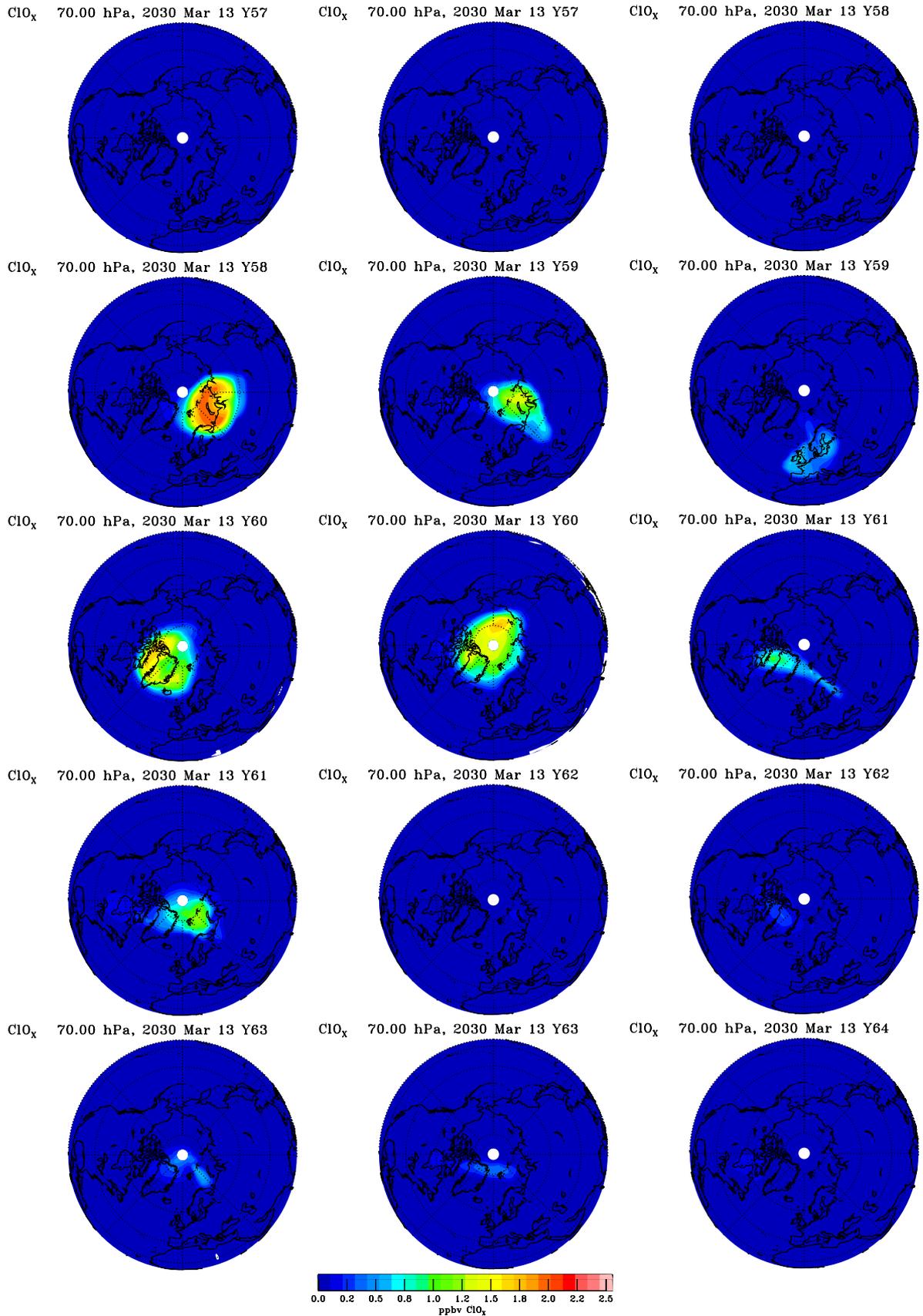
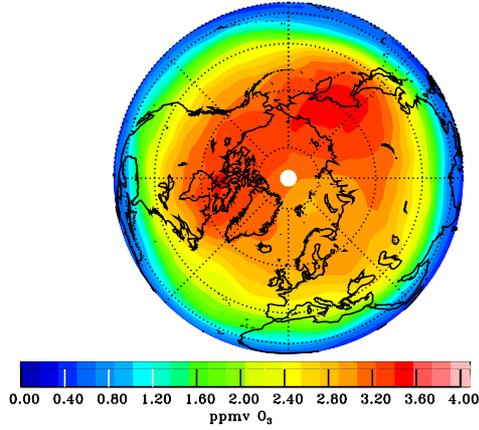
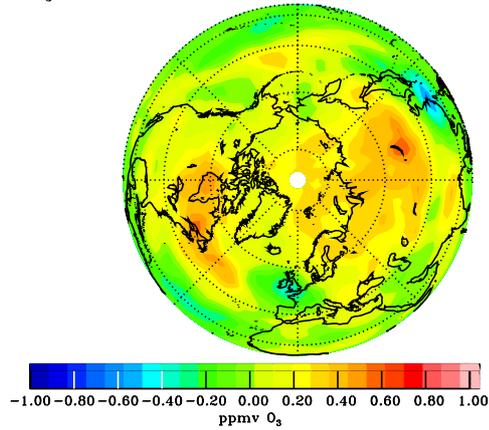


Bild 36: Wie Bild 33 aber aktiviertes Chlor.

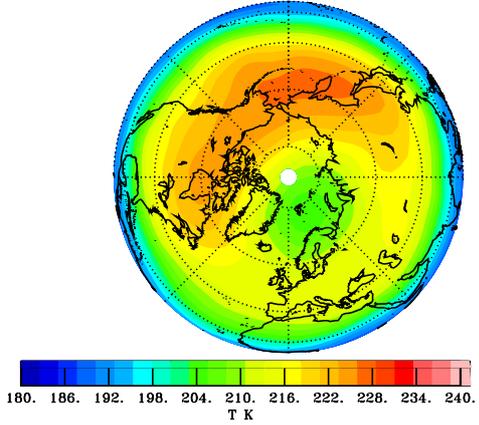
O₃ 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y57



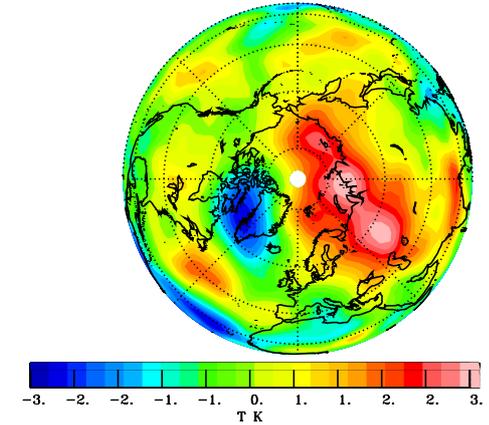
O₃ 70.00 hPa, 2030–1990 Mar 13 Y57



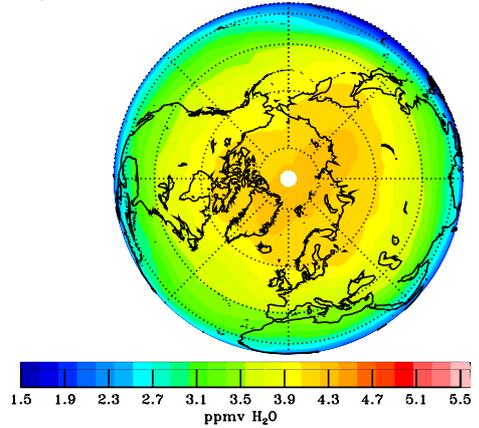
Temp. 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y57



Temp. 70.00 hPa, 2030–1990 Mar 13 Y57



H₂O 70.00 hPa, 1990 Mar 13 Y57



H₂O 70.00 hPa, 2030–1990 Mar 13 Y57

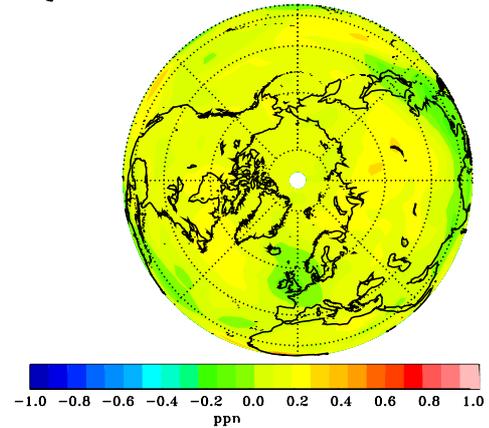


Bild 37: 15-Jahres-Mittel für Ozon, Temperatur und Wasserdampf am 13. März in 1990 und die absoluten Differenzen der entsprechenden Größen von 2030 gegenüber 1990.

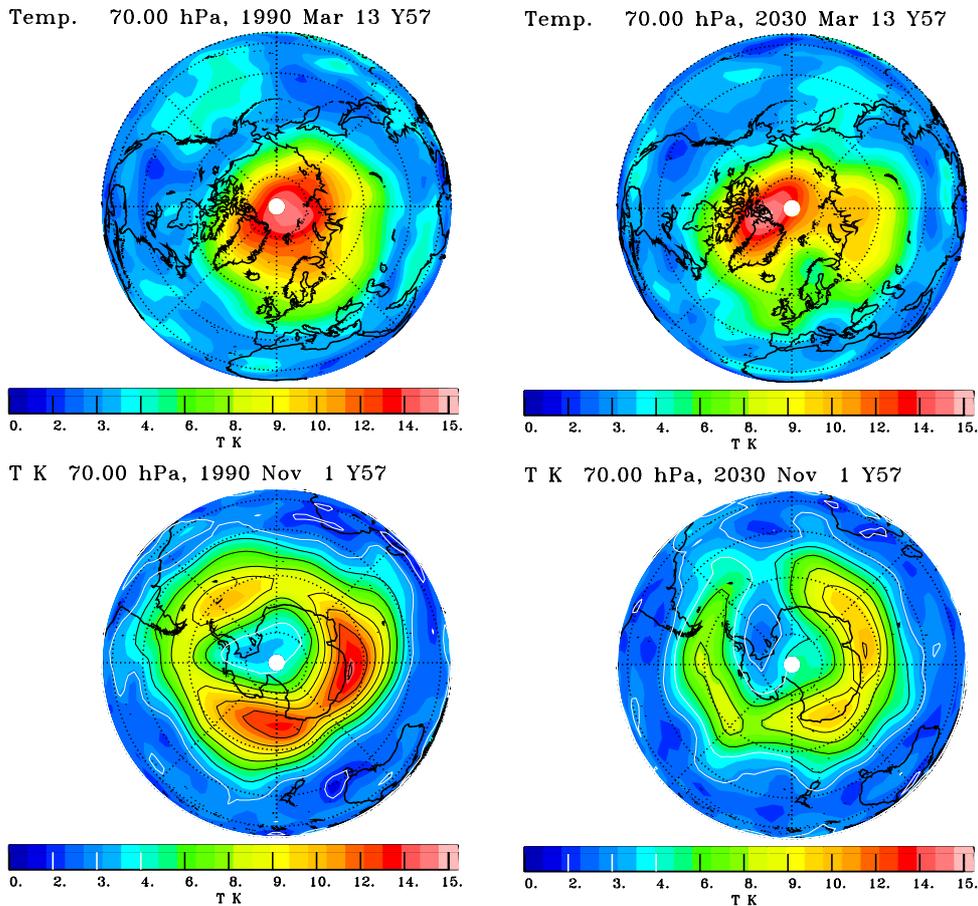


Bild 38: Standardabweichungen der Temperatur in 1990 und 2030 am 13. März und 1. November aus jeweils 15 Jahren.

Dehydrierung und/oder mehr Transport aus niederen Breiten. Bild 38 enthält die Variabilität (Standardabweichung) der Temperaturen für den 13. März und 1. November. Im März 2030 fällt eine Abnahme über Nordosteuropa ins Auge, die auf eine häufigere Vorzugslage des Wirbels dort hindeutet aber auch mit dem geringeren Ozonabbau im Wirbel und weniger Rückkopplung auf die Temperatur zusammenhängen könnte. In der Antarktis nimmt die Variabilität klar wegen der Ozonerholung ab. Die Analysen der Einzeltage zeigen die wesentlichen Muster der Monatsmittel (Bild 25, 27), wenn man die gezeigten Situationen für 1990 vergleicht, und lassen sich mit wesentlich geringerem Rechenaufwand durchführen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Zirkulationsmodell mit interaktiver Chemie MA-ECHAM-CHEM ist in der Lage, Temperaturen und Spurenstoffverteilungen in der Stratosphäre einschließlich von Jahresgang und Variabilität zwischen einzelnen Jahren in guter Übereinstimmung mit Satellitenbeobachtungen zu simulieren. Dies schließt polare Stratosphärenwolken in Arktis und Antarktis

sowie von CRISTA beobachtete Filamentstrukturen ('Streamer') in mittleren Breiten sowie den 'tropical tape recorder', die Aufwärtsbewegung des jahreszeitlichen Gangs des Wasserdampfs an der tropischen Tropopause, ein. Das Modell ist stabil und in der Lage, vorgegebene Szenarien driftfrei einzuhalten. Wichtig ist in den Polargebieten, daß Photolyse bei sehr tief stehender Sonne berücksichtigt ist. Verbesserungswürdig ist noch die Behandlung der subtropischen Barrieren, die zur Zeit zu durchlässig sind, sowie der Transport von Ozon von der Stratosphäre in die Troposphäre, der überschätzt wird. Außerdem enthält das Modell noch keine Bromchemie was den Ozonabbau in den Polarwirbeln etwas verlangsamt. Diese Probleme sind für die Fragestellung 'Vorhersage der stratosphärischen Ozonschicht' von untergeordneter Bedeutung, werden aber in Zukunft angegangen.

Die berechneten Unterschiede in Temperaturmustern, Ozon- und Wasserdampfverteilungen zwischen den Sechzigern und den Neunzigern passen zu den Beobachtungen, was das Vertrauen in die *Prognosefähigkeit* des Modells erhöht. Für die Bedingungen des Jahres 2030 sagt das Modell eine teilweise Auffüllung des antarktischen Ozonlochs durch den Rückgang des Chlors, verstärkt durch Rückkopplungsmechanismen voraus. In der Arktis erhöht sich die Variabilität im Frühling weiter, auch in mittleren Breiten. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten gibt es keine Tendenz zur Stabilisierung des Polarwirbels oder einem Nordozonloch. Im Mittel dominiert der Effekt des Chlorrückgangs. Der Treibhauseffekt hat allerdings komplexe Auswirkungen auf die Dynamik der mittleren Atmosphäre. Es ist geplant, noch ein Experiment für 2015, also zu Bedingungen, wo der Chlorgehalt noch so hoch wie 1990 ist, durchzuführen um zu sehen ob dann die Ozonrückkopplungen zu anderen Schlußfolgerungen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit eines Nordozonlochs führt. Ein schon mit der 30km-Version der DLR durchgeführtes Experiment dazu legt allerdings auch ein Nordozonloch nicht nahe. Des weiteren soll noch ein Experiment ohne Ozeantemperaturänderung gegenüber 1990 für die Bedingungen von 2030 durchgeführt werden um den Einfluß von verschiedenen Prozessen zu separieren.

7 Literatur

Austin, J., N. Butchard, R. Swinbank: Sensitivity of ozone and temperature to vertical resolution in a GCM with coupled atmospheric chemistry. *Q.J.R.Meteorol.Soc.* 123, 1405-1431, 1997.

Brühl, C., et al, Halogen Occultation Experiment ozone channel validation. *J. Geophys. Res.* 101, 10217-10240, 1996.

Brühl, C., P.J. Crutzen and J.-U. Groö: High-latitude, summertime NOx activation and seasonal ozone decline in the lower stratosphere: Model calculations based on observations by HALOE on UARS. *J. Geophys. Res.* 103, 3587-3597, 1998a.

Brühl, C., K. Carslaw, T. Peter, J.-U. Groö, J.M. Russell III and R. Müller: Chlorine activation and ozone depletion in the arctic vortex of the four recent winters using a trajectory box model and HALOE satellite observations. In: *Atmospheric Ozone: Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium 1996* (Eds. R.D. Bojkov and G. Visconti), International Ozone Commission, Genf, L'Aquila, 675-678 (Band 2), 1998b.

Brühl, C., K. Carslaw, T. Peter: Ozone depletion in the Arctic vortex of winter 1996/97 using HALOE data and a chemical boxmodel on real and idealized trajectories. In: *Polar stratospheric ozone 1997* (Eds. N. Harris, I. Kilbane-Dawe and G.T. Amanatidis). Air pollution research report 66. European Communities, Brussels, 253-256, 1998c.

Brühl, C., and P.J. Crutzen, NOx-catalyzed ozone destruction and NOx activation at midlatitudes to high latitudes as the main cause of the spring to fall ozone decline in the Northern Hemisphere.

J. Geophys. Res. 105, 12163, 2000.

Curtis A.R. and Sweetenham, W.P., *Facsimile/Chekmat User's Manual*, Comp. Sci. and Syst. Div., Harvell Lab., Oxford, UK, 1987.

Dameris, M., V. Grewe, R. Hein, C. Schnadt, C. Brühl and B. Steil: Assessment of the future development of the ozone layer. *Geophys. Res. Lett.* 25, 3579-3582, 1998.

Douglass, AR., MP. Prather, TM. Hall, SE. Strahan, PJ. Rasch, LC Sparling, L Coy und JM Rodriguez: Choosing meteorological input for the global modeling initiative assessment of high speed aircraft. *J. Geophys. Res.* 104, 27545-27564, 1999.

Eckman, R.S., W.L. Grose, R.E. Turner und W.T. Blackshear: Polar ozone depletion: a three-dimensional chemical modeling study of its long-term global impact. *J. Geophys. Res.* 101, 22977-22989, 1996.

Gordley, L.L. et al.: Validation of nitric oxide and nitrogen dioxide measurements made by the Halogen Occultation Experiment for UARS platform. *J. Geophys. Res.* 101, 10241-10266.

Hanson, D.R and K. Mauersberger. Laboratory studies of nitric acid trihydrate: implications for the south polar stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 855-858, 1988.

Krämer, M. et al : Intercomparison of stratospheric chemistry models as part of the German Ozone Research Program, Submitted to *J. Geophys. Res.*, 2000 (Modellvergleich OFP).

Landgraf, J. und P.J. Crutzen: An efficient method for 'on-line' calculations of photolysis and heating rates. *J. Atmos. Sci.*, 55, 863-878, 1998.

Manzini, E. and N. A. McFarlane, The effect of varying the source spectrum of a gravity wave parameterization in a middle atmosphere general circulation model. *J. Geophys. Res.* 103, 31523-31539, 1998.

Mote, P.W., T.J. Dunkerton, M.E. McIntyre, E.A. Ray, P.H. Haynes, and J.M. Russell III, Vertical velocity, vertical diffusion, and dilution by midlatitude air in the tropical lower stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 103, 8651-8666, 1998.

Rasch, P.J. and M. Lawrence, Recent development in transport methods at NCAR, MPI-Report No. 265, Max-Planck-Institut für Meteorologie, FRG, 65-75, 1998.

Riese, M., P. Spang, P. Preusse, M. Ern, M. Jarisch, D. Offermann, K.H. Grossmann, Cryogenic Infrared Spectrometer and Telescopes for the Atmosphere (CRISTA) data processing and atmospheric temperature and trace gas retrieval. *J. Geophys. Res.*, 104, 16349-16367, 1999.

Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, L. Christoph, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese, U. Schulzweida, The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate, Report No. 218, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 1996.

Roeckner, E., et al.: Transient climate change simulation with a coupled atmosphere-ocean GCM including the sulfur cycle. *J. Clim.* 12, 3004-3032, 1999.

Russell, J.M., L.L. Gordley, J.H. Park, S.R. Drayson, A. Tuck, J.E. Harries, R.J. Cicerone, P.J. Crutzen, J.E. Frederick, The Halogen Occultation Experiment. *J. Geophys. Res.*, 98, 10777-10797, 1993.

Santee, M.L., W.G. Read, J.W. Waters, L.Froidevaux, G.L. Manney, D.A. Flower, R.F. Jarnot, R.S. Harwood, G.E. Peckham, Interhemispheric Differences in Polar Stratospheric HNO₃, H₂O, ClO, and O₃, *Science* 267, 849- 852, 1995.

Santee, M.L., G.L. Manney, L.Froidevaux, W.G. Read, J.W. Waters, Six years of UARS Microwave Limb Sounder HNO₃ observations: seasonal, interhemispheric, and interannual variations in the lower stratosphere. *J. Geophys. Res.* 104, 8225-8246, 1999.

Shindell, DT., D. Rind und P. Lonergan: Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations. *Nature* 392, 589-592, 1998.

Steil, B.: Modellierung der Chemie der Strato- und Troposphäre mit einem dreidimensionalen Zirkulationsmodell. Dissertation, Inst. für Meteorologie, Universität Hamburg, Examensarbeit Nr. 62, MPI für Meteorologie, Hamburg, 1999.

Steil, B., M. Dameris, C. Brühl, P.J. Crutzen, V. Grewe, M. Ponater und R. Sausen: Development of a chemistry module for GCMs: first results of a multi-annual integration. *Annales Geophysicae* 16, 205-228, 1998.

Steil, B., C. Brühl, P.J. Crutzen, A MA-GCM with interactive chemistry (MAECHAM 4-CHEM), simulations for present, past and future. Proceedings Quadrennial Ozone Symposium 2000, Sapporo, Japan, 2000.

Summers, ME., RR. Conway, DE. Siskind, MH. Stevens, D. Offermann, M. Riese, P. Preusse, DF. Strobel, JM. Russell III: Implications of satellite OH observations for middle atmospheric H₂O and ozone. *Science* 277, 1967-1970, 1997.

Waibel, A., T. Peter, K. Carslaw, H. Oelhaf, G. Wetzal, P.J. Crutzen, U. Pöschl, A. Tsias, E. Reimer and H. Fischer: Persistent ozone loss due to greenhouse-enhanced denitrification. *Science* 283, 2064-2069, 1999.

WMO, Scientific Assessment of ozone depletion: 1998, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. 44, Geneva, 1999