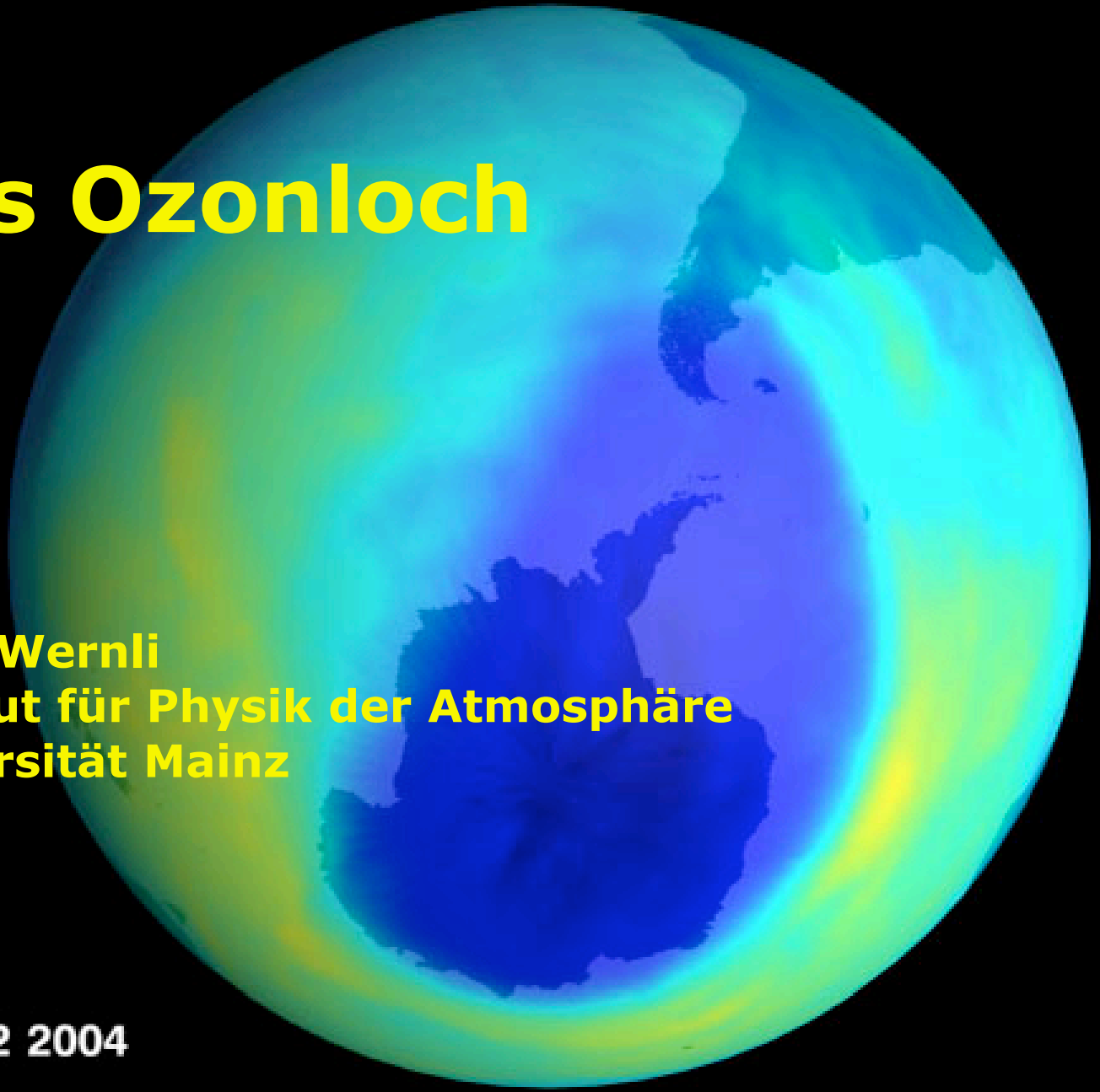
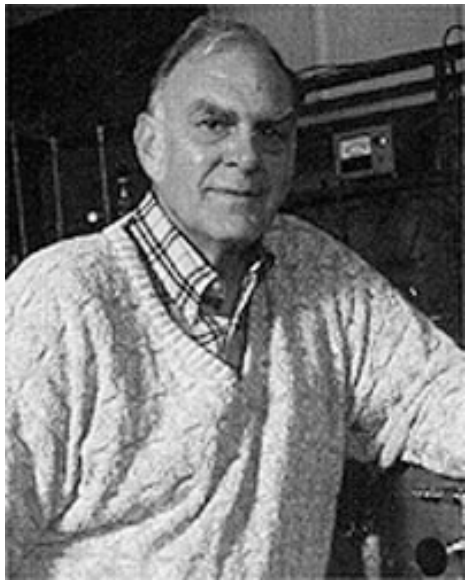
Das Ozonloch



Heini Wernli
Institut für Physik der Atmosphäre
Universität Mainz

Nobelpreis 1995 für Chemie



Crutzen - Molina - Rowland

Physik und Meteorologie an der Uni Mainz

Fachbereich für Physik, Mathematik und Informatik

4 Studienrichtungen:
- **Physik (experimentell, theoretisch)**
- **Meteorologie**
- Mathematik
- Informatik

Meteorologie = Physik (und Chemie) der Atmosphäre
= Atmosphären- und Klimawissenschaft

Physik und Meteorologie: Grundstudium sehr ähnlich

Was ist Ozon?

atomarer Sauerstoff

Sauerstoffmoleküle

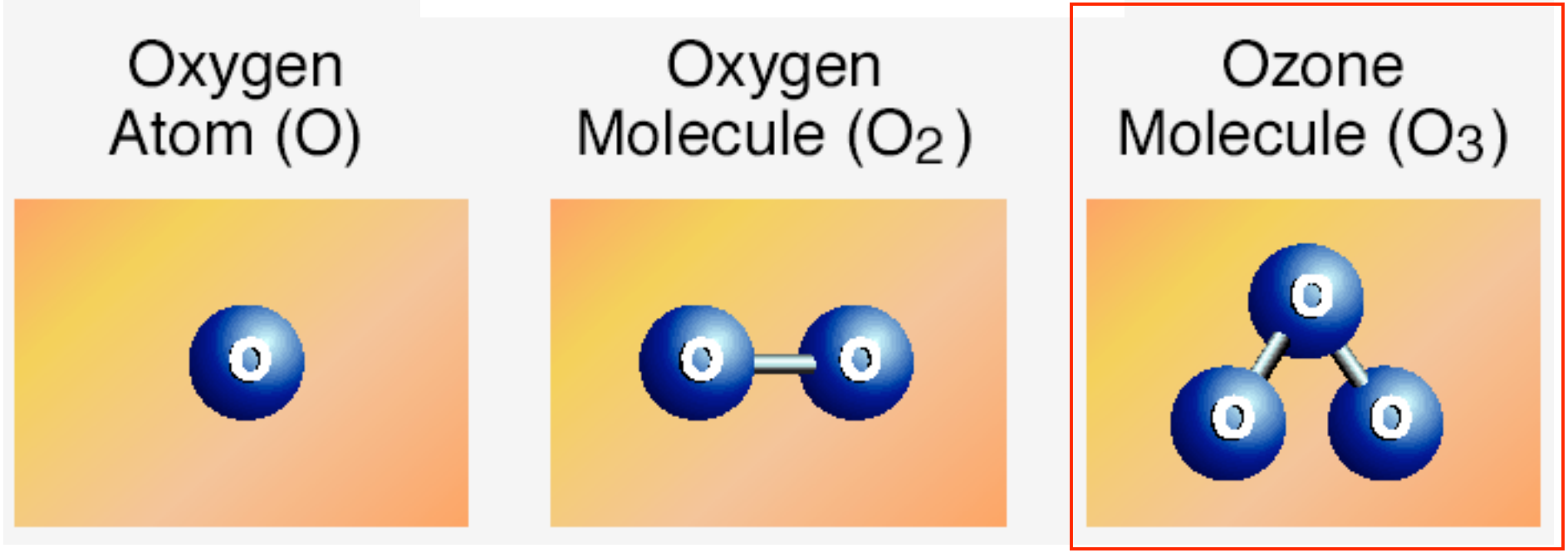
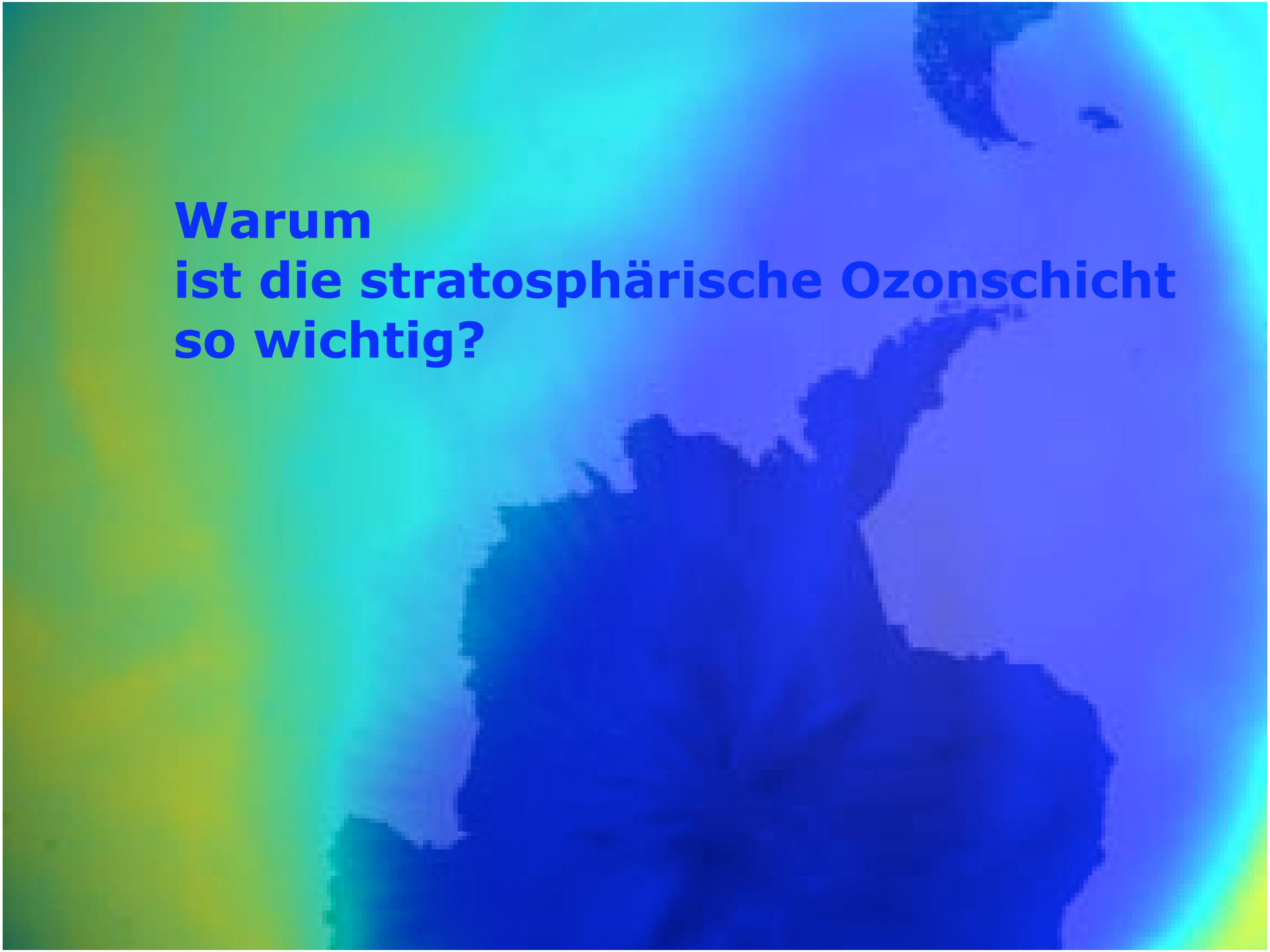
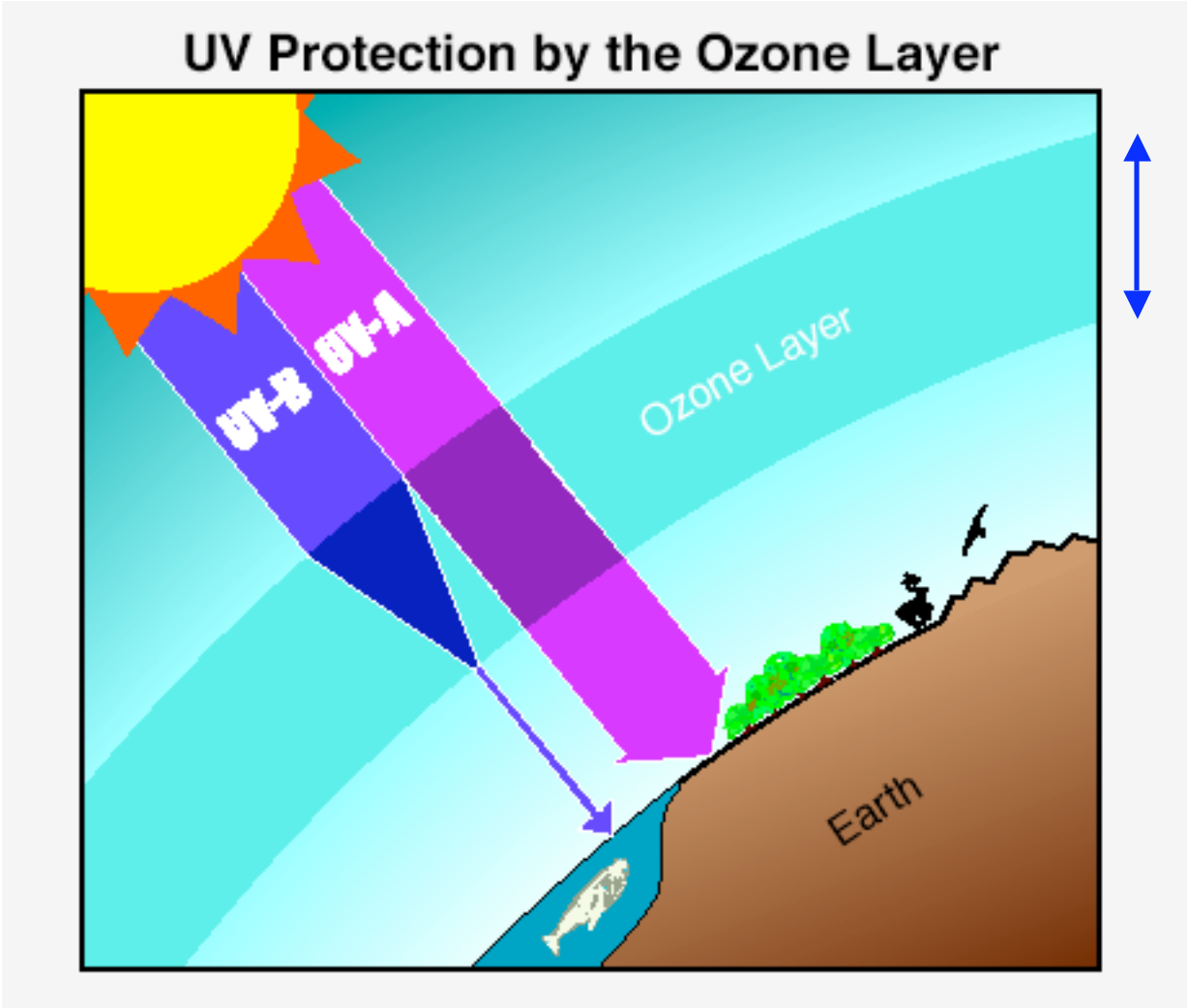


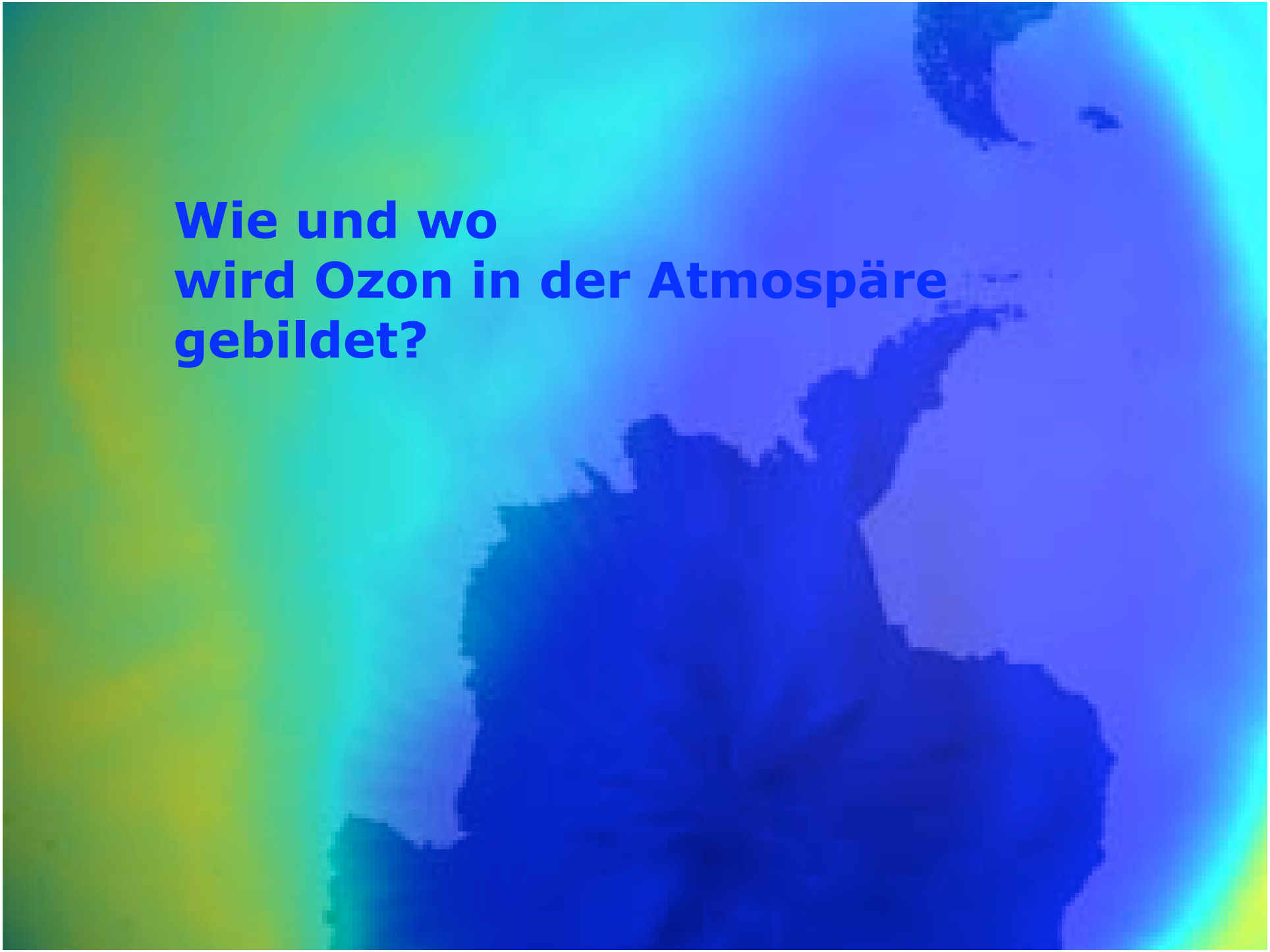
Tabelle 1.1: Zusammensetzung der Trockenluft in Bodenhöhe in entlegenen Kontinentalgebieten

Bestandteil	Formel	Konzentrationen
Stickstoff	N_2	78,110 %
Sauerstoff	O_2	20,953 %
Argon	Ar	0,934 %
Kohlendioxid	CO_2	0,035 %
Neon	Ne	0,0018 %
Helium	He	0,0005 %
Methan	CH_4	0,00017 %
Krypton	Kr	0,00011 %
Wasserstoff	H_2	0,00005 %
Ozon	O_3	0,000001–0,000004 %

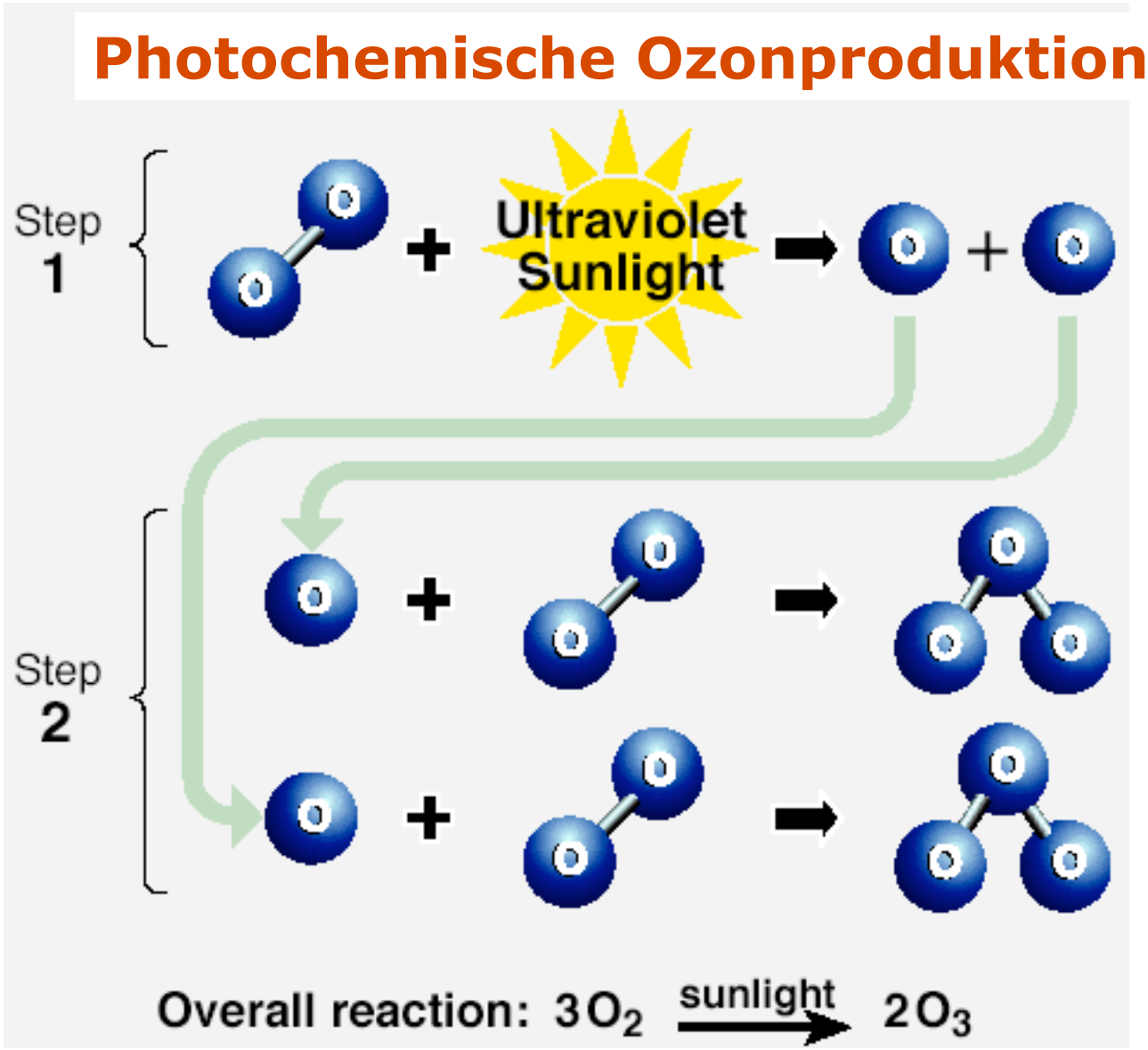
feuchte Luft: bis zu 4% H_2O


Warum
ist die stratosphärische Ozonschicht
so wichtig?


UV Protection by the Ozone Layer
UV-B
UV-A
Ozone Layer
Earth
20-40 km
Höhe


Wie und wo
wird Ozon in der Atmospäre
gebildet?

Photochemische Ozonproduktion



Photochemische Ozonproduktion

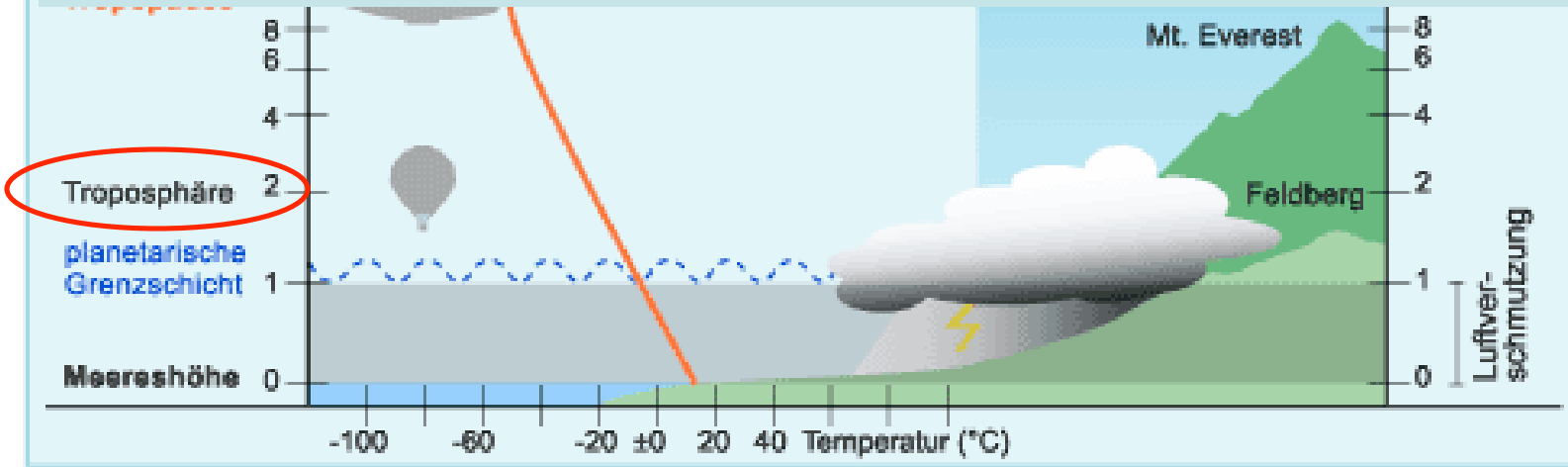
$$O_2 + h\nu\ (\lambda \leq 242\ \text{nm}) \rightarrow O + O$$

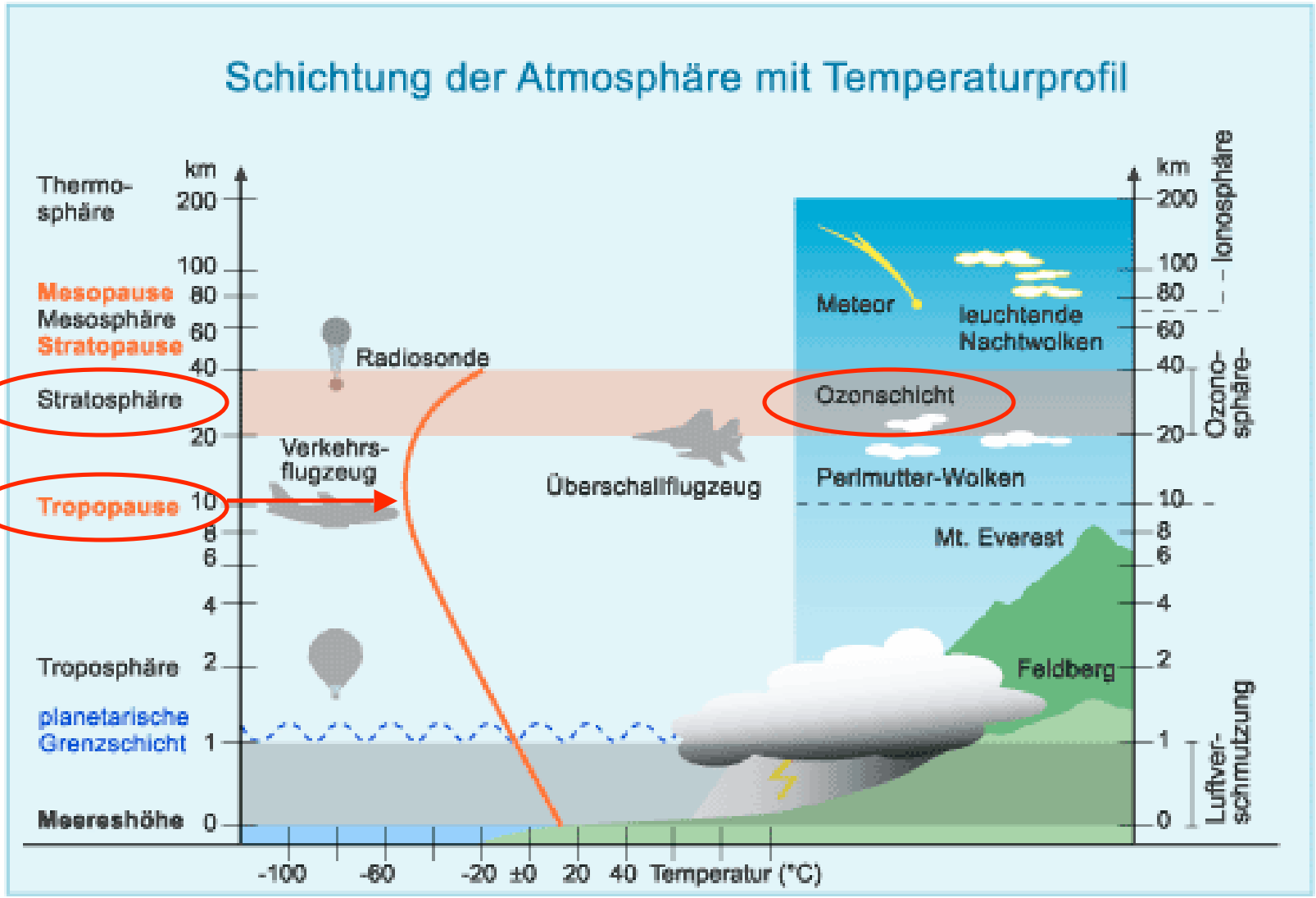
$$2\,[O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M]$$

$$\text{Netto:}\quad 3\,O_2 + h\nu \rightarrow 2\,O_3\,.$$

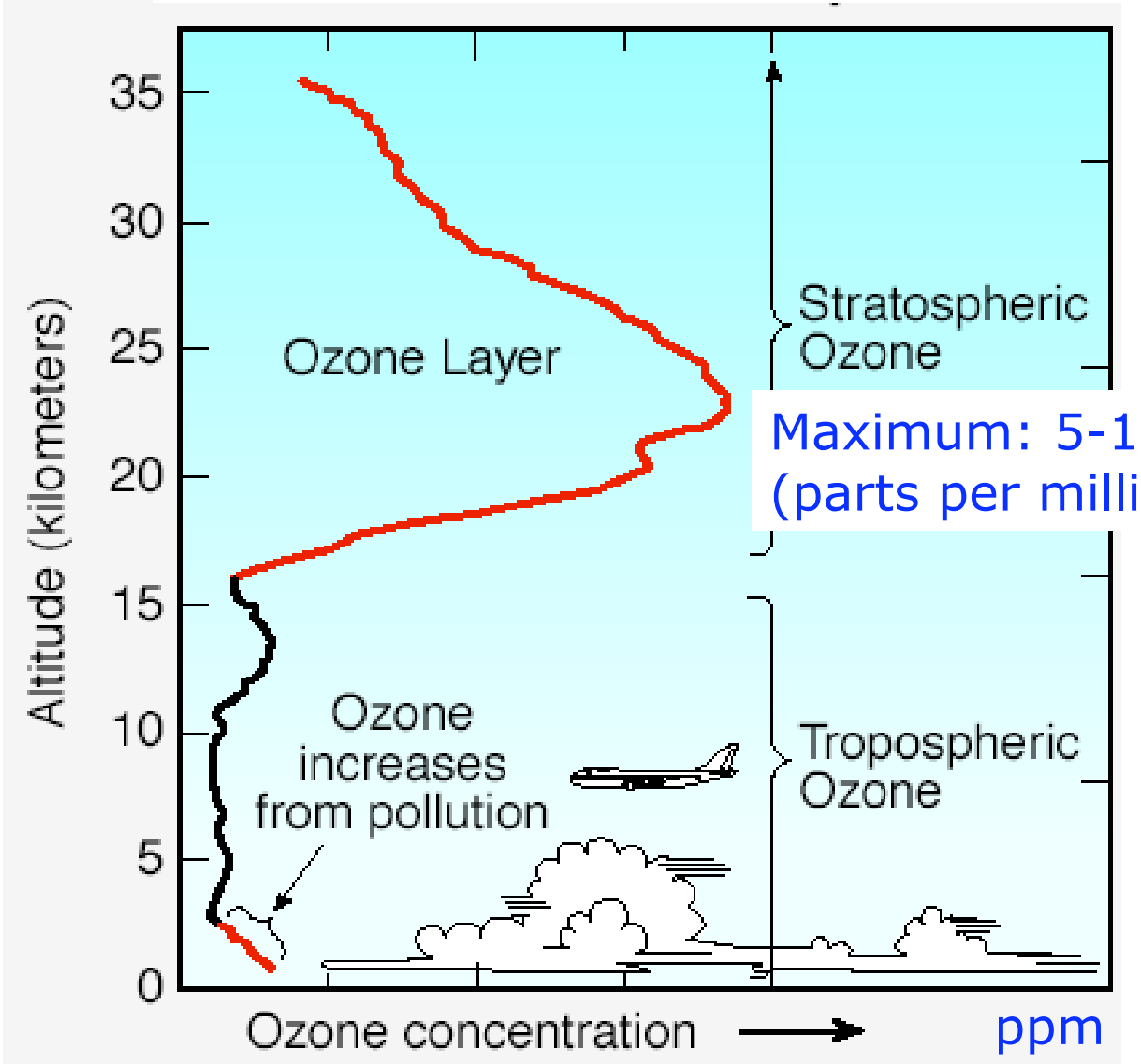
findet vorallem in der tropischen Stratosphäre (auf einer Höhe von 20-40 km statt).

Schichtung der Atmosphäre mit Temperaturprofil



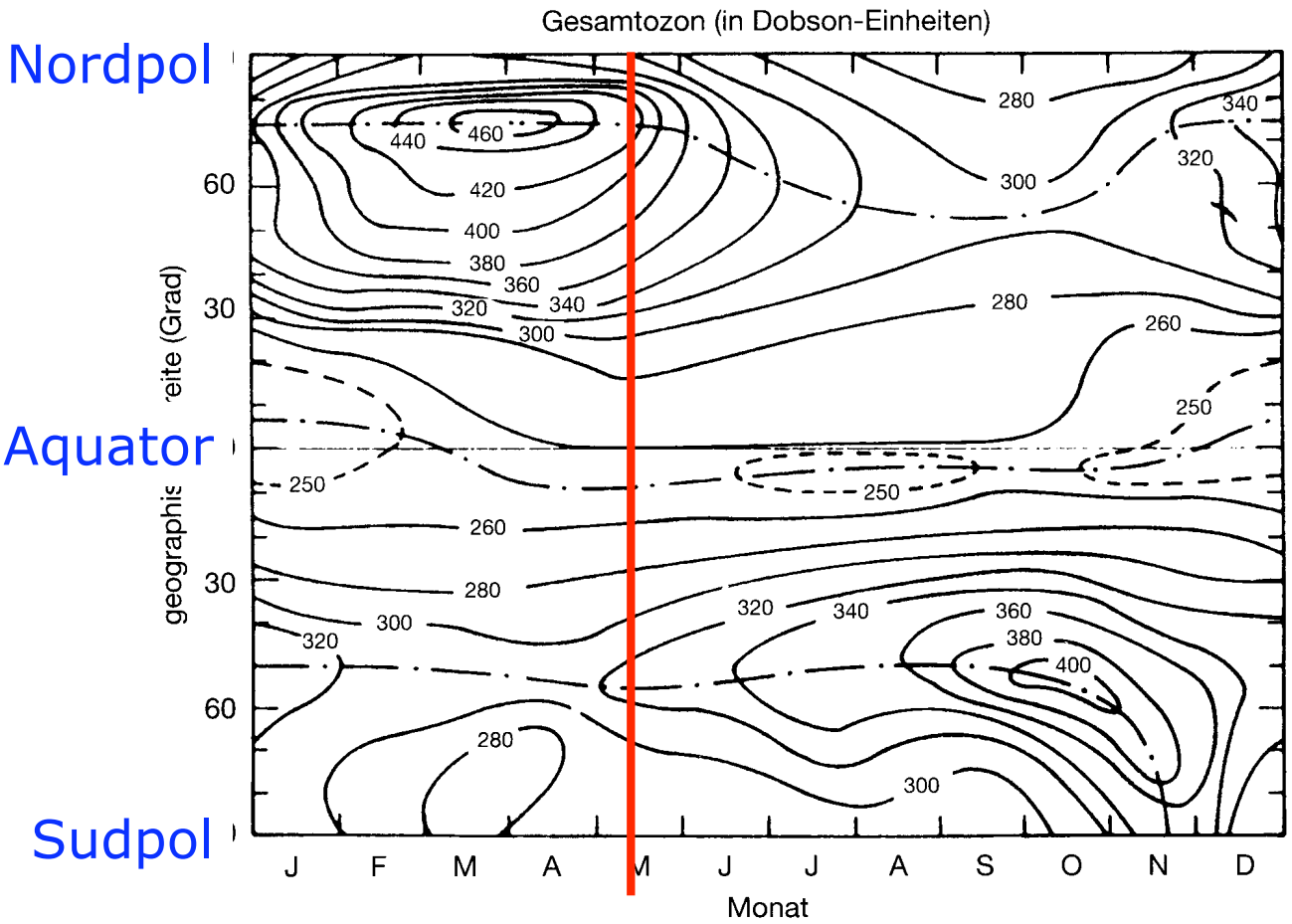

Schichtung der Atmosphäre mit Temperaturprofil
Thermo-
sphäre
Mesopause
Mesosphäre
Stratopause
Stratosphäre
Tropopause
Troposphäre
planetarische
Grenzschicht
Meereshöhe
km
200
100
80
60
40
20
10
8
6
4
2
1
0
Radiosonde
Verkehrs-
flugzeug
Überschallflugzeug
Meteor
leuchtende
Nachtwolken
Ozonschicht
Perlmutter-Wolken
Mt. Everest
Feldberg
Ionosphäre
Ozono-
sphäre
Luftver-
schmutzung
-100
-60
-20
±0
20
40
Temperatur (°C)

Die vertikale Ozonverteilung

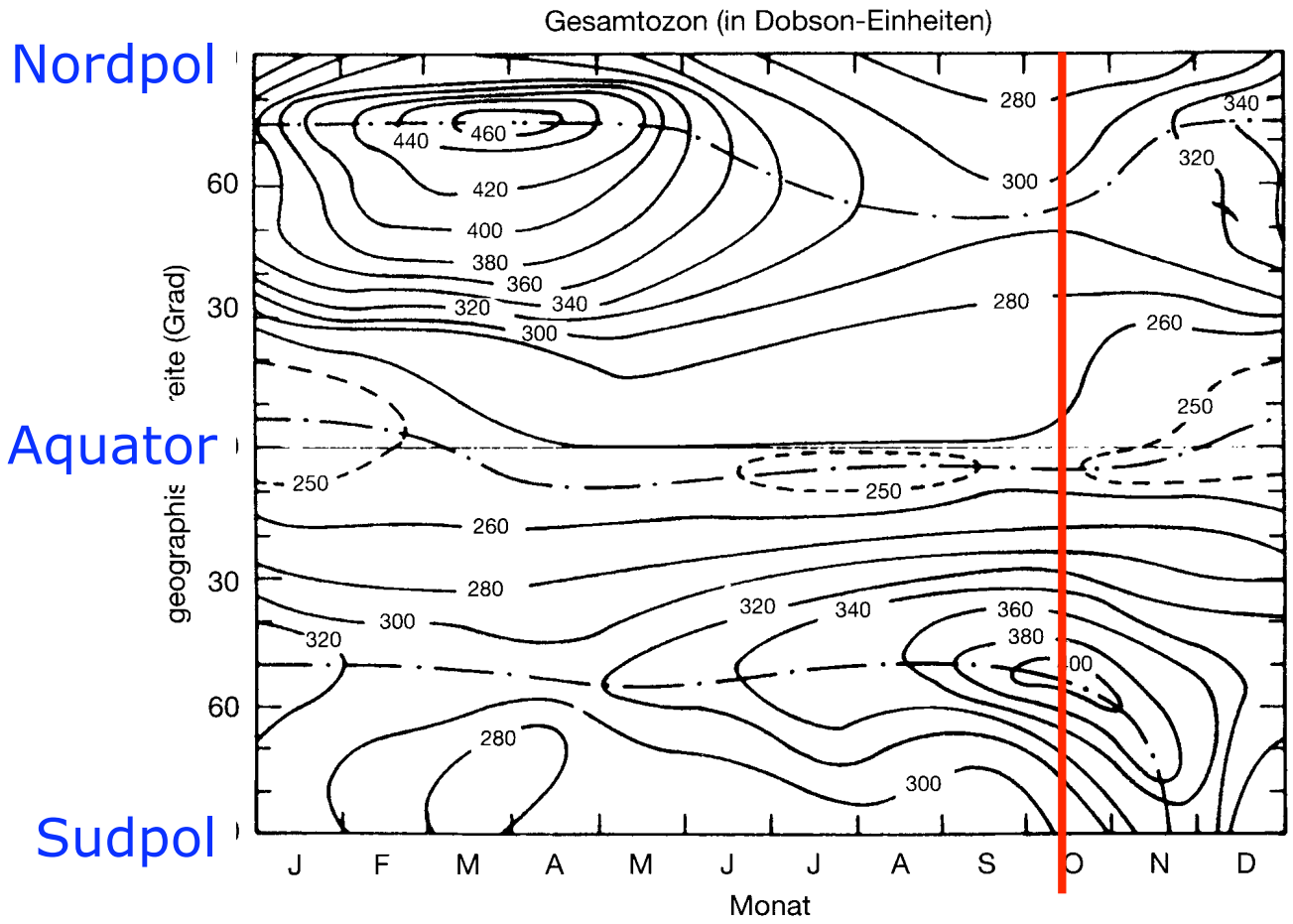


Maximum: 5-10 ppm (parts per million)

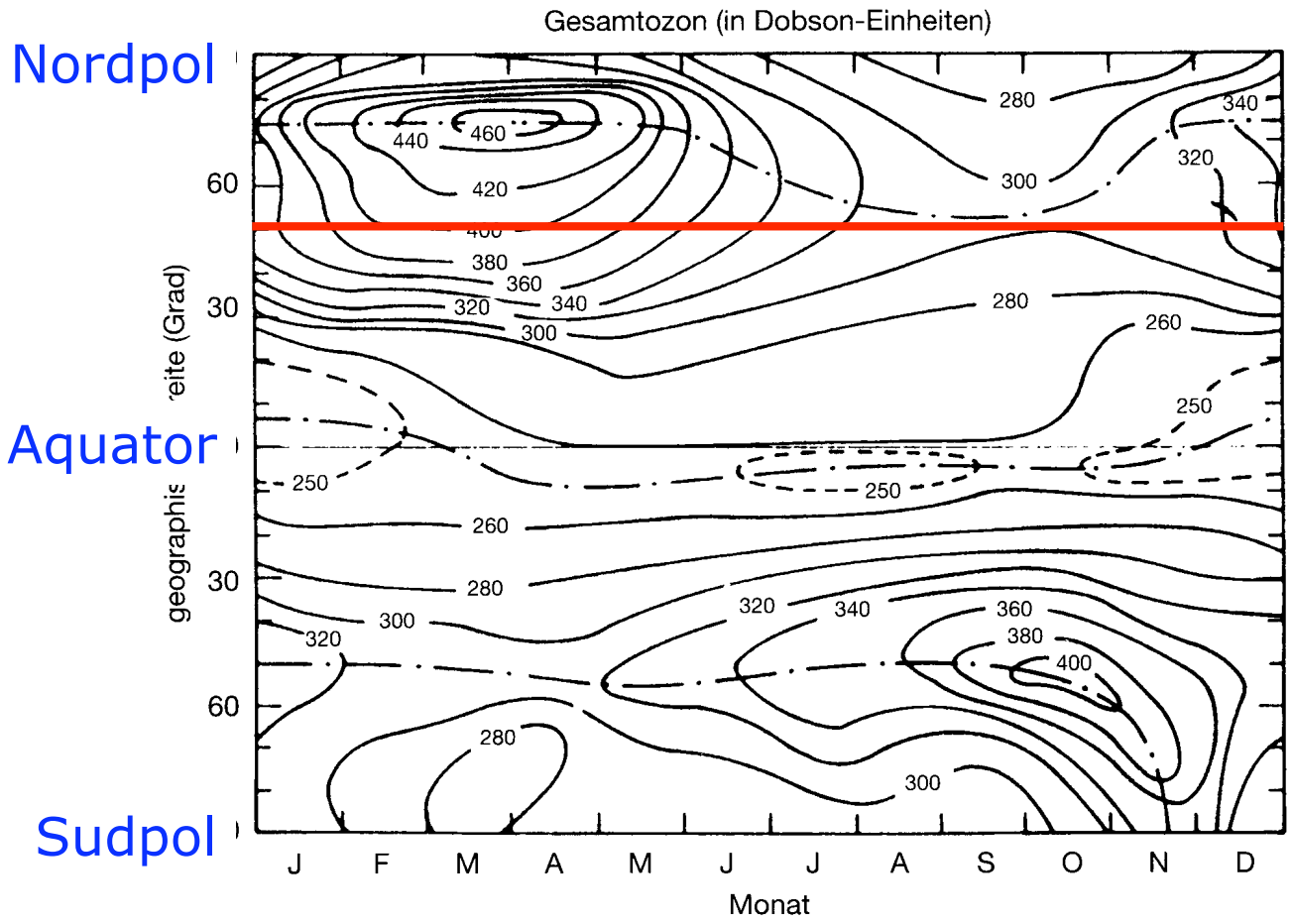
Die globale Ozonverteilung (ohne Ozonloch)



Die globale Ozonverteilung (ohne Ozonloch)

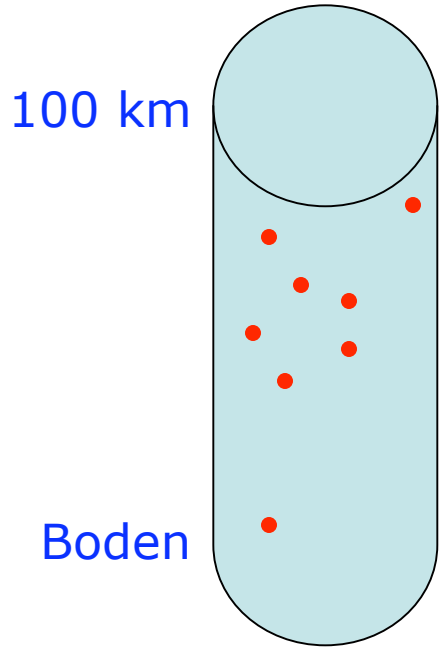


Die globale Ozonverteilung (ohne Ozonloch)



Dobson:
Die Einheit des Totalozons

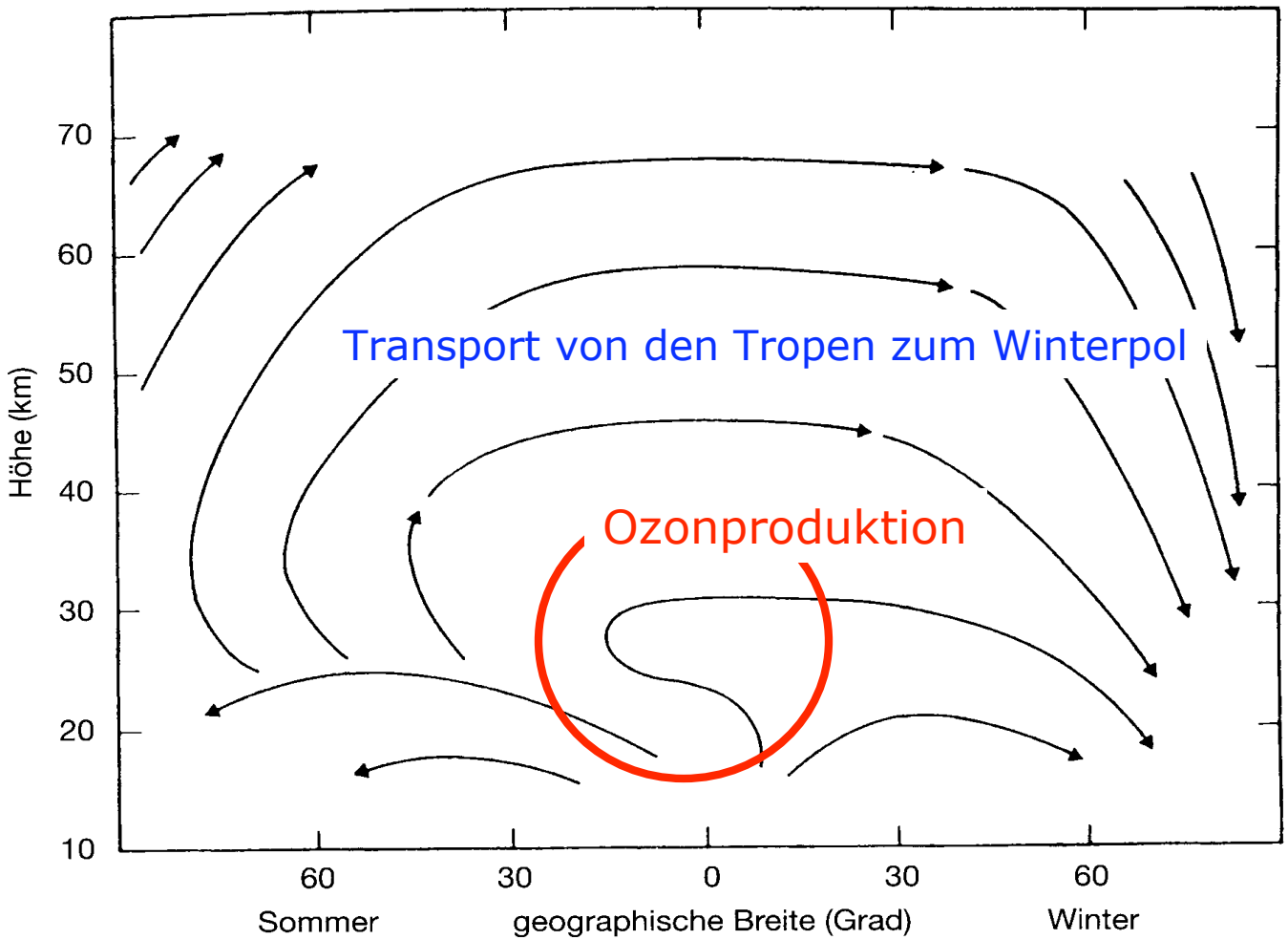
Totalozon =
Anzahl Ozonmoleküle in einer vertikalen Säule



300 Dobson Einheiten (DU)
entsprechen einer 3 mm dicken
Schicht von Ozonmolekülen bei
atmosphärischem Normaldruck

Die stratosphärische Zirkulation

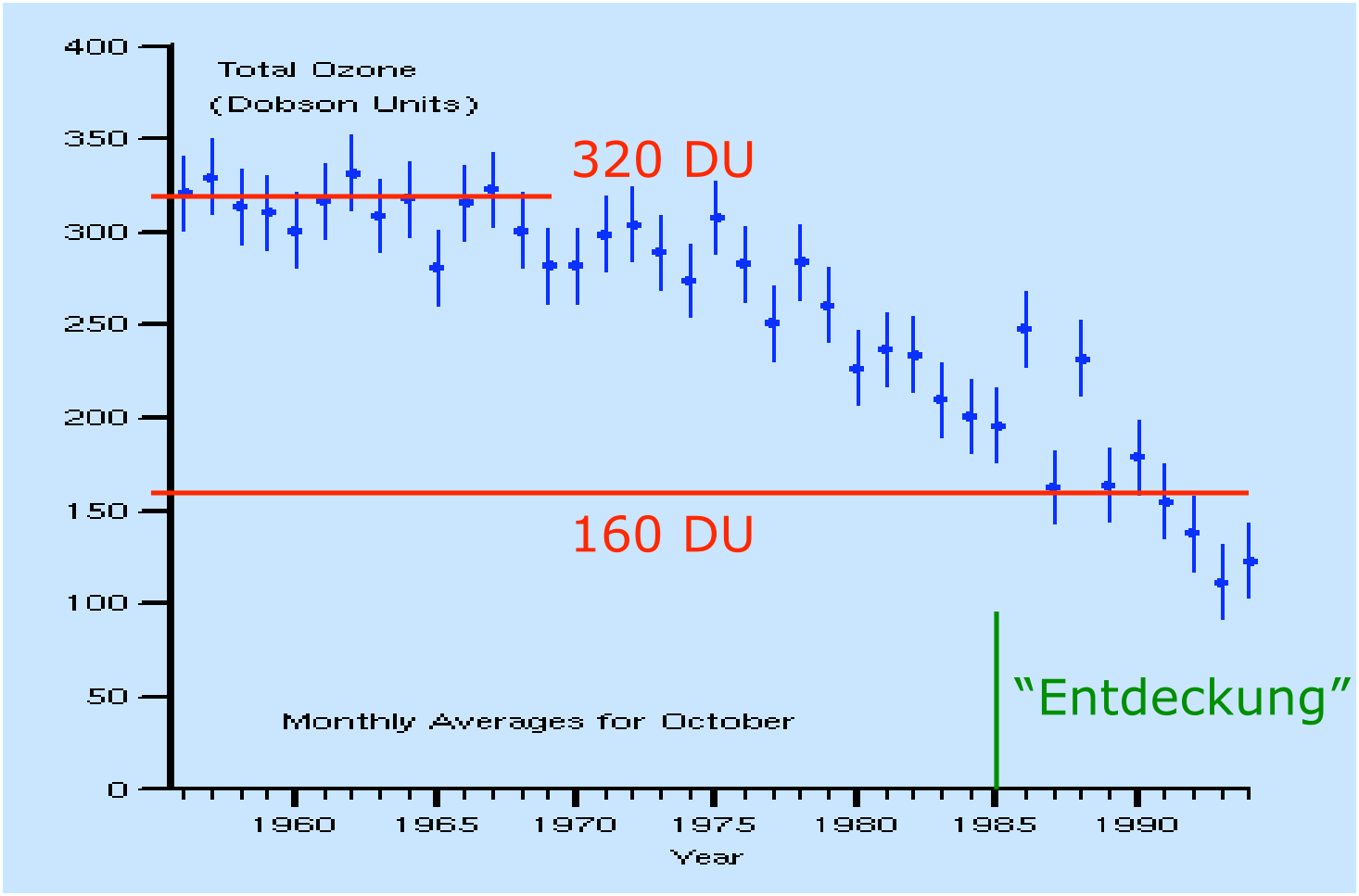
Die Ursache der globalen Verteilung des Ozons



1985: Die Entdeckung
des Ozonlochs

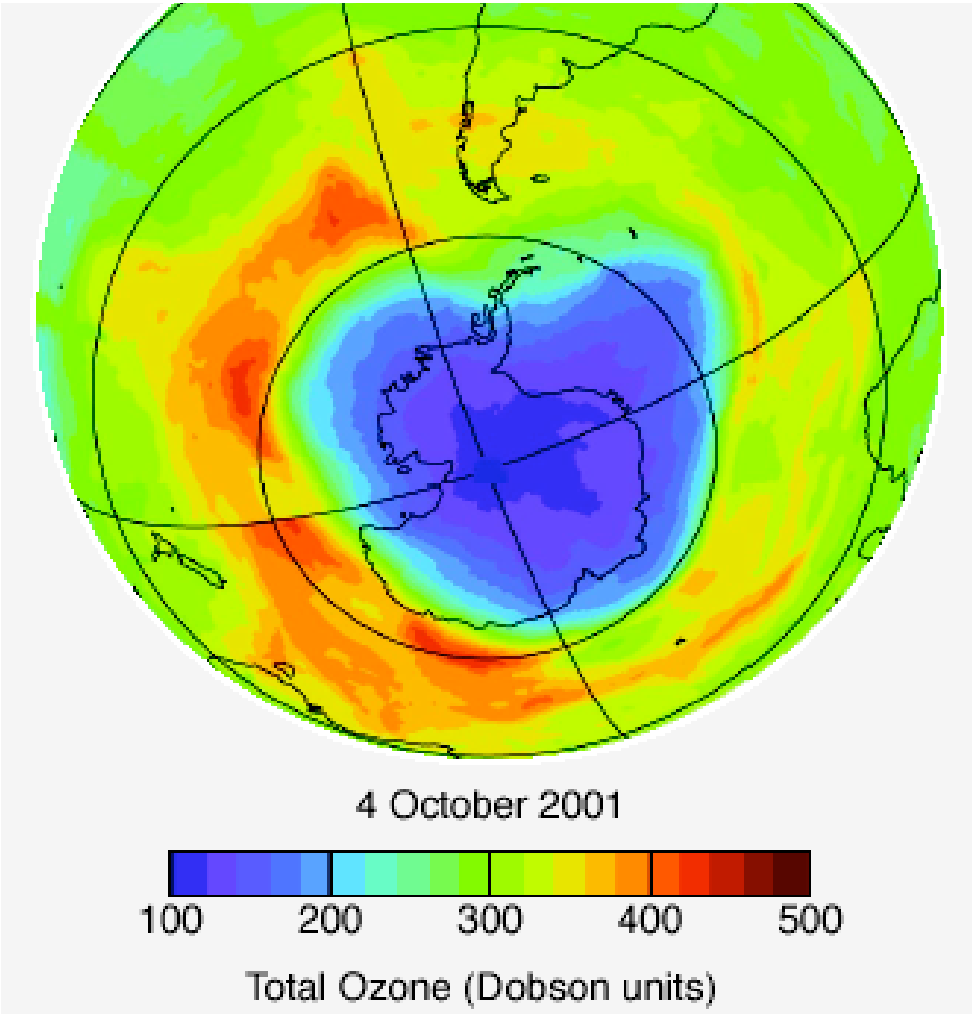
Publikation von Farman et al. 1985

Seit ca. 1970 verringert sich das Totalozon über der Antarktis im Frühjahr von Jahr zu Jahr …



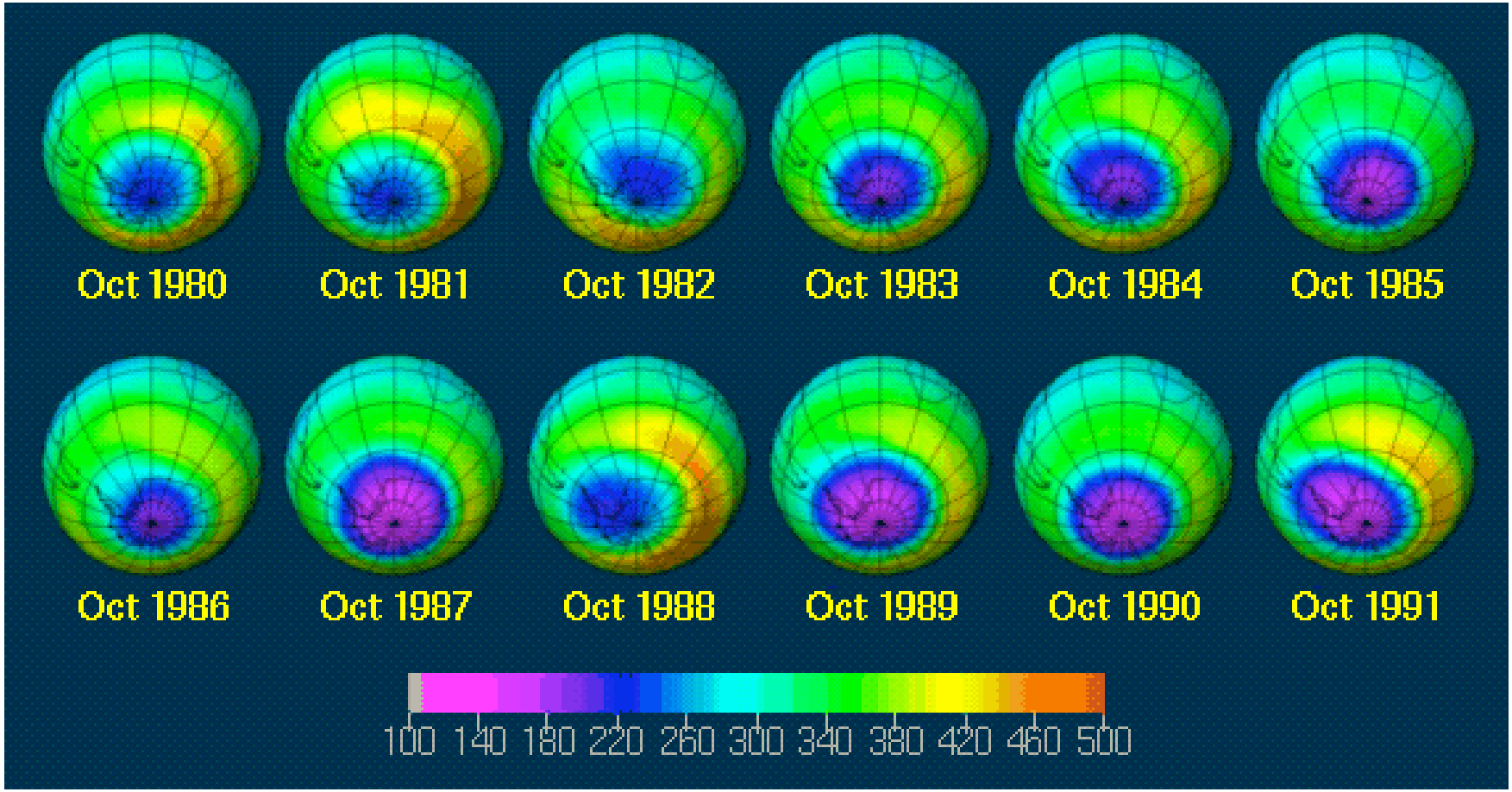
Das Ozonloch

… eine relativ scharf begrenzte Region über der Antarktis mit weniger als 100 DU Totalozon



Das Ozonloch

… wird von Jahr zu Jahr grösser (mit Schwankungen)



Animation

Zeitlicher Verlauf der antarktischen Ozonschicht

ON THE TRAIL OF THE MISSING OZONE
LOOK! LOOK!
I'M LOOKING BUT I DON'T SEE ANYTHING!!
EXACTLY!

1985: sehr viele offene Fragen

- warum wurde das Ozonloch erst jetzt entdeckt?

- warum tritt es über der Antarktis auf?

- warum im Frühjahr?

- warum ist es so scharf begrenzt?

- welcher Prozess ist für die Ozonreduktion verantwortlich?

- wie wird die Entwicklung weitergehen?

Umfrage
Was ist wichtig zur Erklärung des Ozonlochs?

- FCKWs (Fluorchlorkohlenwasserstoffe)?

- Wolken?

- Berge?

- Temperatur?

- Wirbel?

- Sonnenstrahlung?

1985: Hypothesen der chemischen Ozonzerstörung

Chapman 1930:

$$O_3 + h\nu\ (\lambda \leq 1140\ \text{nm}) \rightarrow O + O_2$$

$$O + O_3 \rightarrow 2\,O_2$$

$$\text{Netto:}\quad 2\,O_3 + h\nu \rightarrow 3\,O_2\,.$$

- Reaktion ist im Gleichgewicht mit der photochemischen Ozonproduktion
- Netto: kein Ozonabbau

Crutzen 1970: katalytischer Ozonabbau

$$X\bullet + O_3 \rightarrow XO\bullet + O_2$$

$$O_3 + h\nu \rightarrow O + O_2$$

$$O + XO\bullet \rightarrow X\bullet + O_2$$

$$\text{Netto: } 2\,O_3 + h\nu \rightarrow 3\,O_2$$

- mit X=NO und XO=NO_2 (Stickoxide)
- katalytisch: ein NO Molekül kann sehr viele Ozon-Moleküle zerstören
- kann polares Ozonloch nicht erklären

Molina und Rowland: Chlor als Katalysator

$$Cl\bullet + O_3 \rightarrow ClO\bullet + O_2$$

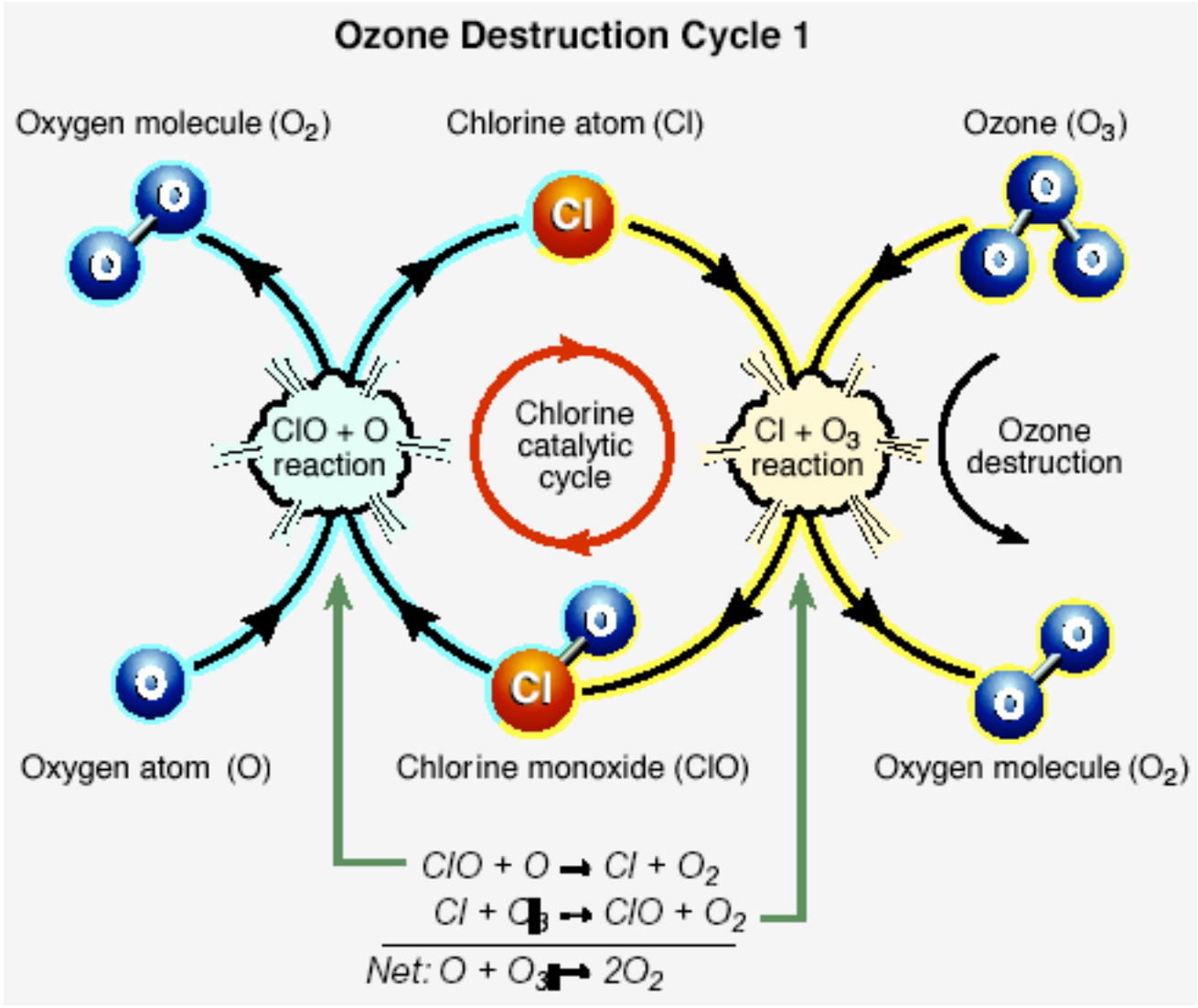
$$O_3 + h\nu\ (\lambda \leq 1140\ \text{nm}) \rightarrow O + O_2$$

$$ClO\bullet + O \rightarrow Cl\bullet + O_2$$

$$\text{Netto:}\quad 2\ O_3 + h\nu \rightarrow 3\ O_2\,,$$

- Vermutung: Chlor stammt aus den FCKWs (Spraydosen, Kühlschränke und Isolierschaum)

- kann polares Ozonloch nicht erklären


Ozone Destruction Cycle 1
Oxygen molecule (O_2)
Chlorine atom (Cl)
Ozone (O_3)
ClO + O reaction
Chlorine catalytic cycle
Cl + O_3 reaction
Ozone destruction
Oxygen atom (O)
Chlorine monoxide (ClO)
Oxygen molecule (O_2)
$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$
Net: $O + O_3 \rightarrow 2O_2$

"Ozonkiller" neutralisieren sich, z.B.

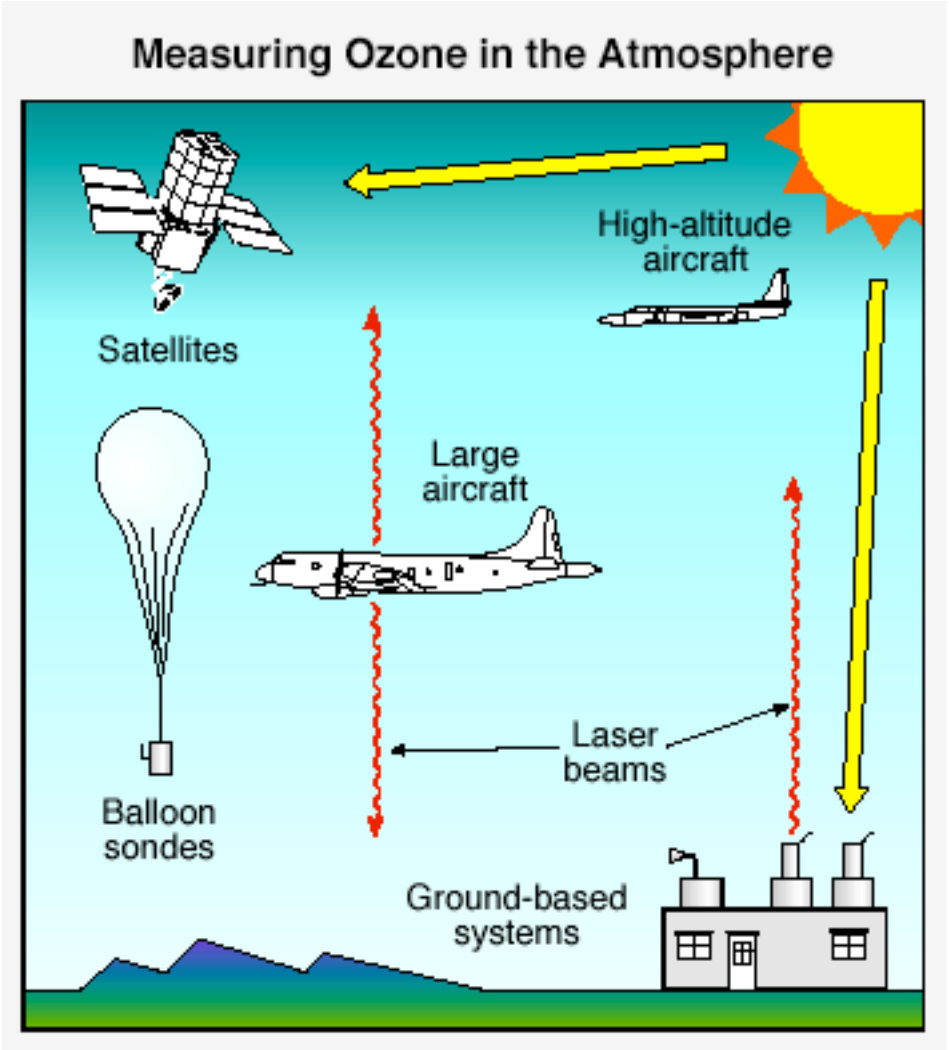
$$HO\bullet + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$$

$$ClO\bullet + NO_2 + M \rightarrow ClONO_2 + M$$

HNO_3 (Salpetersäure) und $ClONO_2$ sind sogenannte Reservoirspezies - in ihnen sind die Katalysatoren der Ozonzerstörung (HO und ClO) inaktiv.

Dies bedeutet, dass z.B. NO_2 ein "Freund" des stratosphärischen Ozons ist, das den "Feind" ClO neutralisieren kann.

Nach 1985:
Neue Resultate von intensiven
Forschungskampagnen



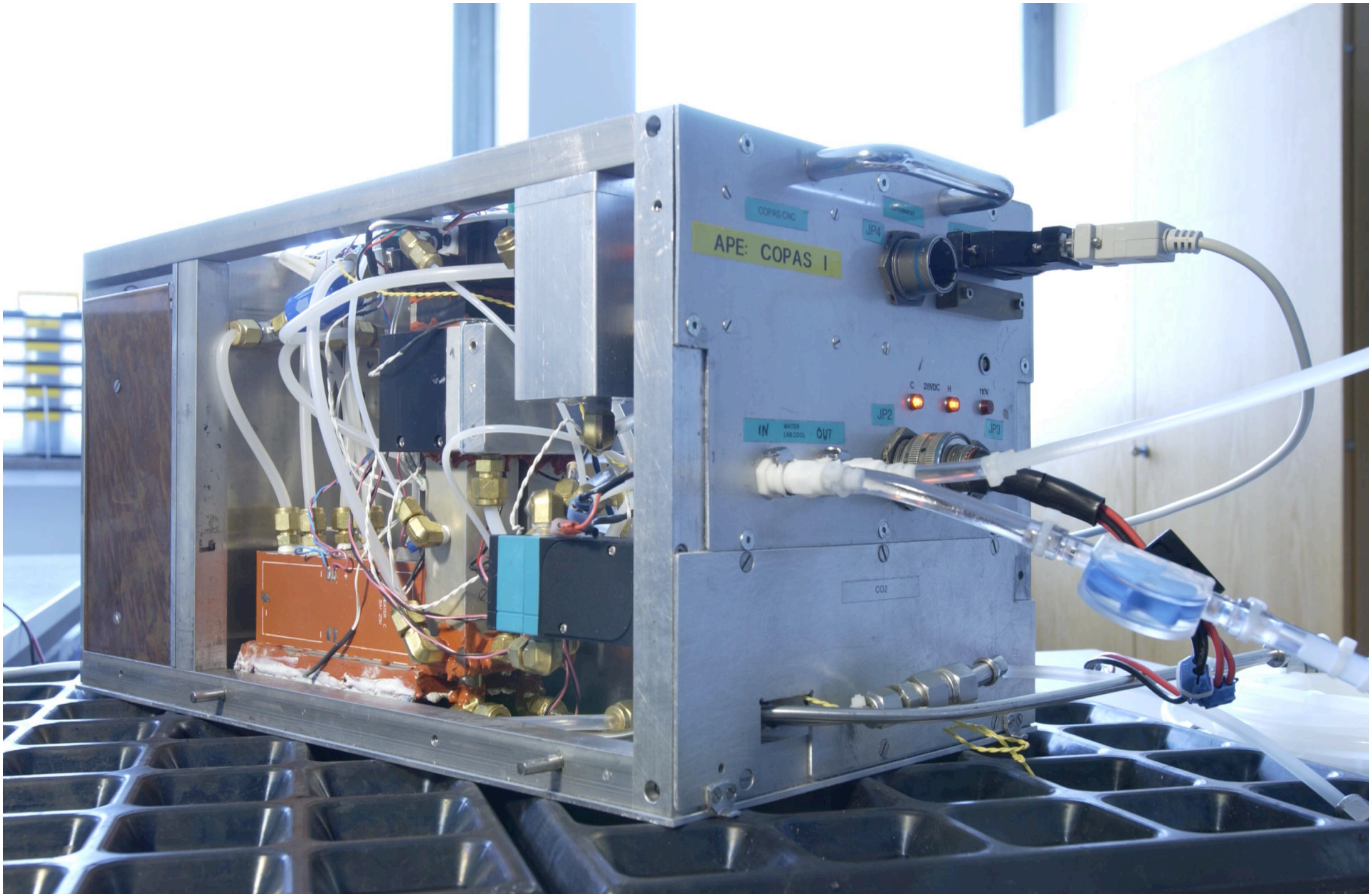
Einsatz von
- Forschungsflugzeugen
- Stratosphärenballonen

Entwicklung von neuen Messgeräten

GEOPHYSICA

55204

GFD
D-CGFD


APE: COPAS I
COPAS CNC
JP4
JP2
JP3
IN
WATER
LAB COOL
OUT
CO2

STRATOSPHÄREN-BALLONS

- Tragen große Nutzlasten (bis über 500 kg) bis auf Höhen über 30 km
- werden in Nord-Schweden und Süd-Frankreich gestartet
- fliegen bis 300 km weit weg

STRATOSPHÄREN-BALLONS

- Startvorbereitung in den frühen Morgenstunden
- Aufblasen des grossen Hauptballons von 100.000 Kubikmeter Volumen, d.h. ein Durchmesser von etwa 70 m

STRATOSPHÄREN-BALLONS

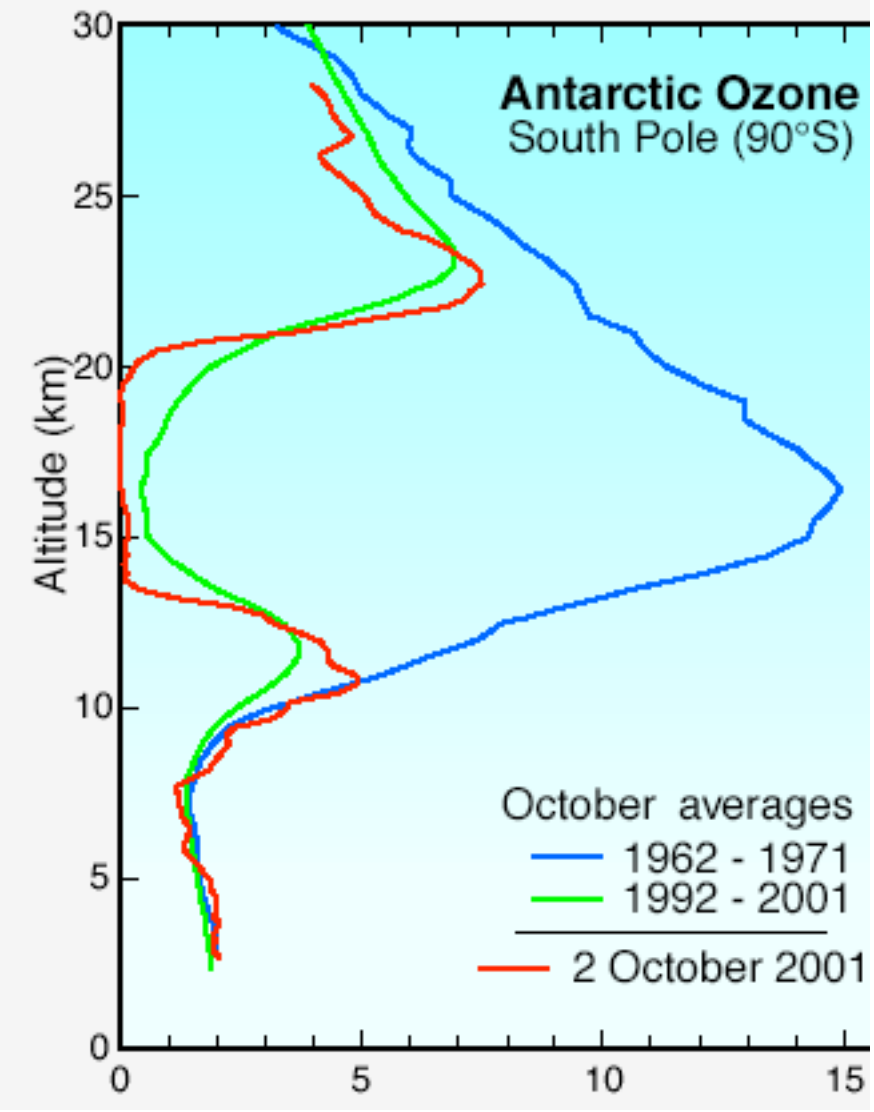
- Die Ruhe vor dem Start: das Instrument hängt unter dem kleinen Hilfsballon (rechts)

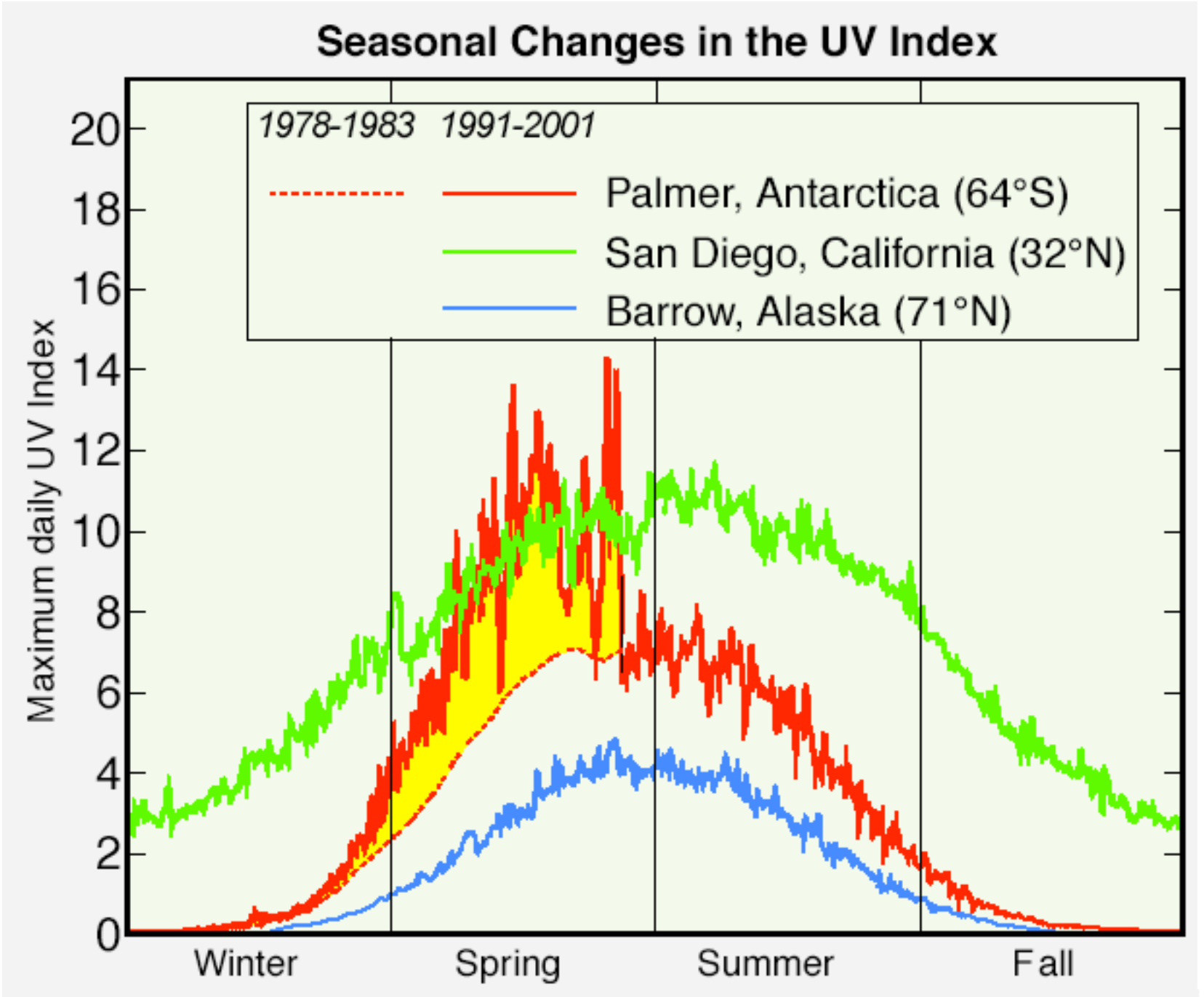
STRATOSPHÄREN-BALLONS

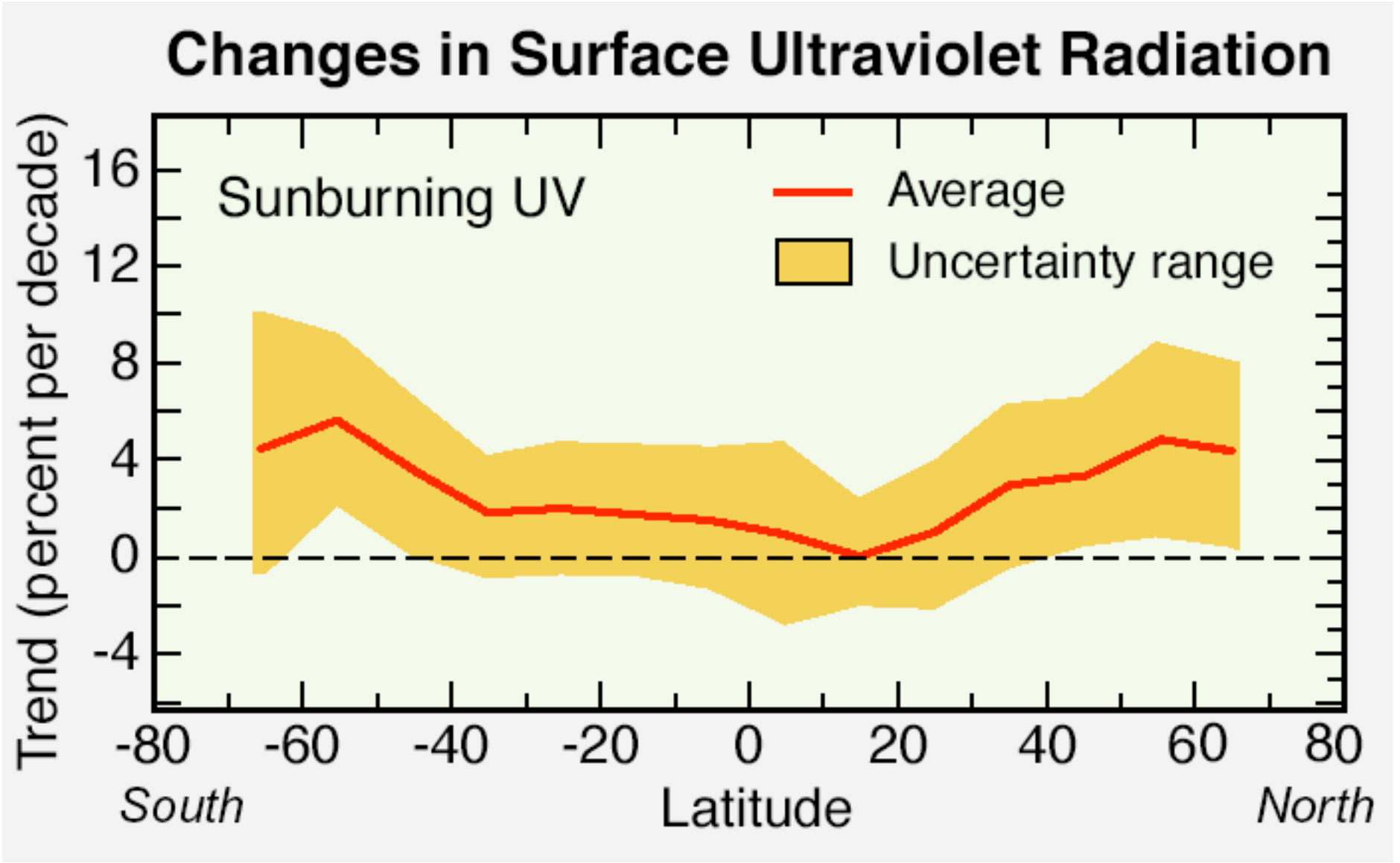
- Der Start: der Ballon ist nur zu einem kleinen Teil mit Gas gefüllt. Auf der Gipfelhöhe von etwa 30 km herrscht nur noch ein Druck von 10 hPa (1/100 des Bodendrucks). Erst dort wird er seine volle Größe und seinen Durchmesser von 70 m erreichen

Neue Resultate

Die Ozonzerstörung ist auf einer Höhe von 12-22 km in einigen Jahren total




Seasonal Changes in the UV Index
1978-1983
1991-2001
Palmer, Antarctica (64°S)
San Diego, California (32°N)
Barrow, Alaska (71°N)
Maximum daily UV Index
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
Winter
Spring
Summer
Fall


Changes in Surface Ultraviolet Radiation
Sunburning UV
Average
Uncertainty range
Trend (percent per decade)
16
12
8
4
0
-4
-80
-60
-40
-20
0
20
40
60
80
South
Latitude
North

Der Durchbruch

Solomon et al.: Heterogene Chemie auf Eiskristallen
in polaren Stratosphärenwolken (PSCs)

$$ClONO_2 + HCl \xrightarrow{\text{Eis}} Cl_2 \uparrow + HNO_3\,(\text{Eis}).$$

Cl_2 Moleküle zerfallen im Sonnenlicht zu Chlorradikalen:

$$Cl_2 + h\nu\ (\lambda<450\ \text{nm}) \rightarrow 2\ Cl\bullet$$

Der Durchbruch

Solomon et al.: Heterogene Chemie auf Eiskristallen in polaren Stratosphärenwolken (PSCs)

$$ClONO_2 + HCl \xrightarrow{\text{Eis}} Cl_2 \uparrow + HNO_3\,(\text{Eis}).$$

Das im Eis eingelagerte Salpetersäure Molekül ist nicht mehr frei, um via die folgende Reaktion den "Freund" NO_2 zu produzieren:

$$HNO_3 + h\nu\ (\lambda < 320\ \text{nm}) \rightarrow HO\bullet + NO_2$$

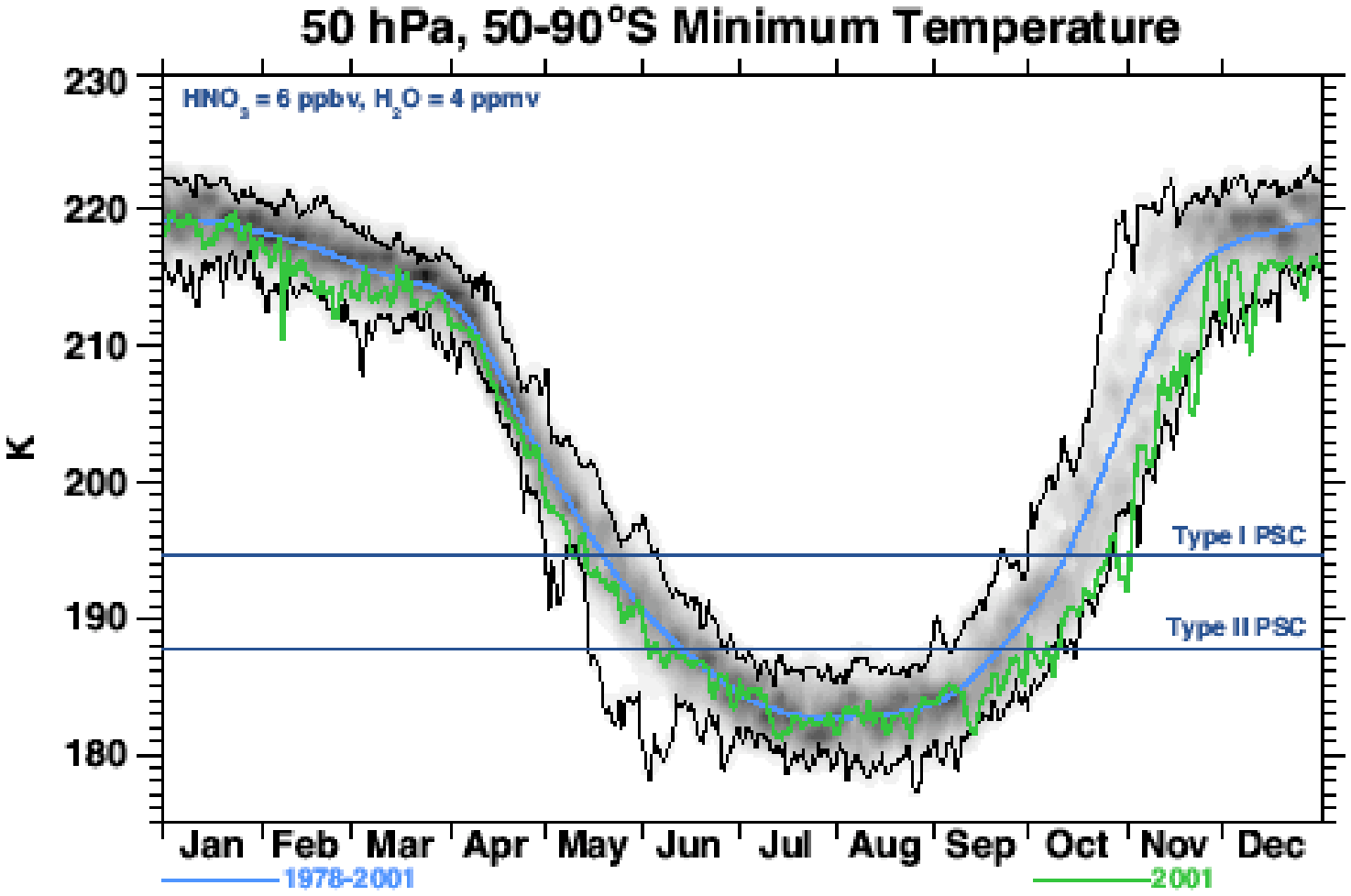
PSCs (Perlmutter- oder polare Stratosphärenwolken):
die Verantwortlichen für die Chloraktivierung

SCIENCEphotoLIBRARY

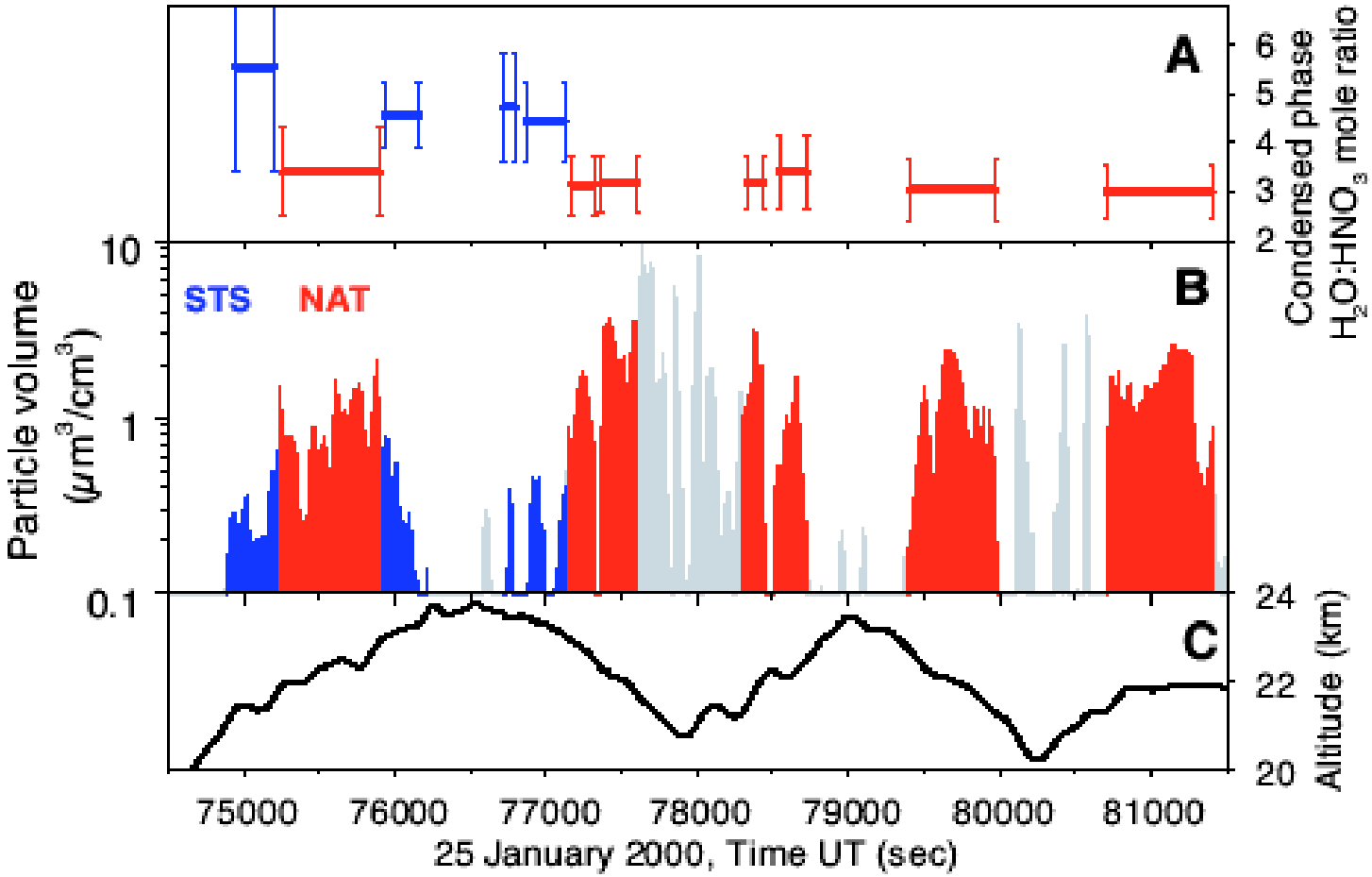
SCIENCEphotoLIBRARY

PSCs existieren nur bei sehr tiefen Temperaturen, sie sind flüssig oder fest und bestehen nicht nur aus Wasser ...

PSCs entstehen bei ca. -80 C von Juni-September



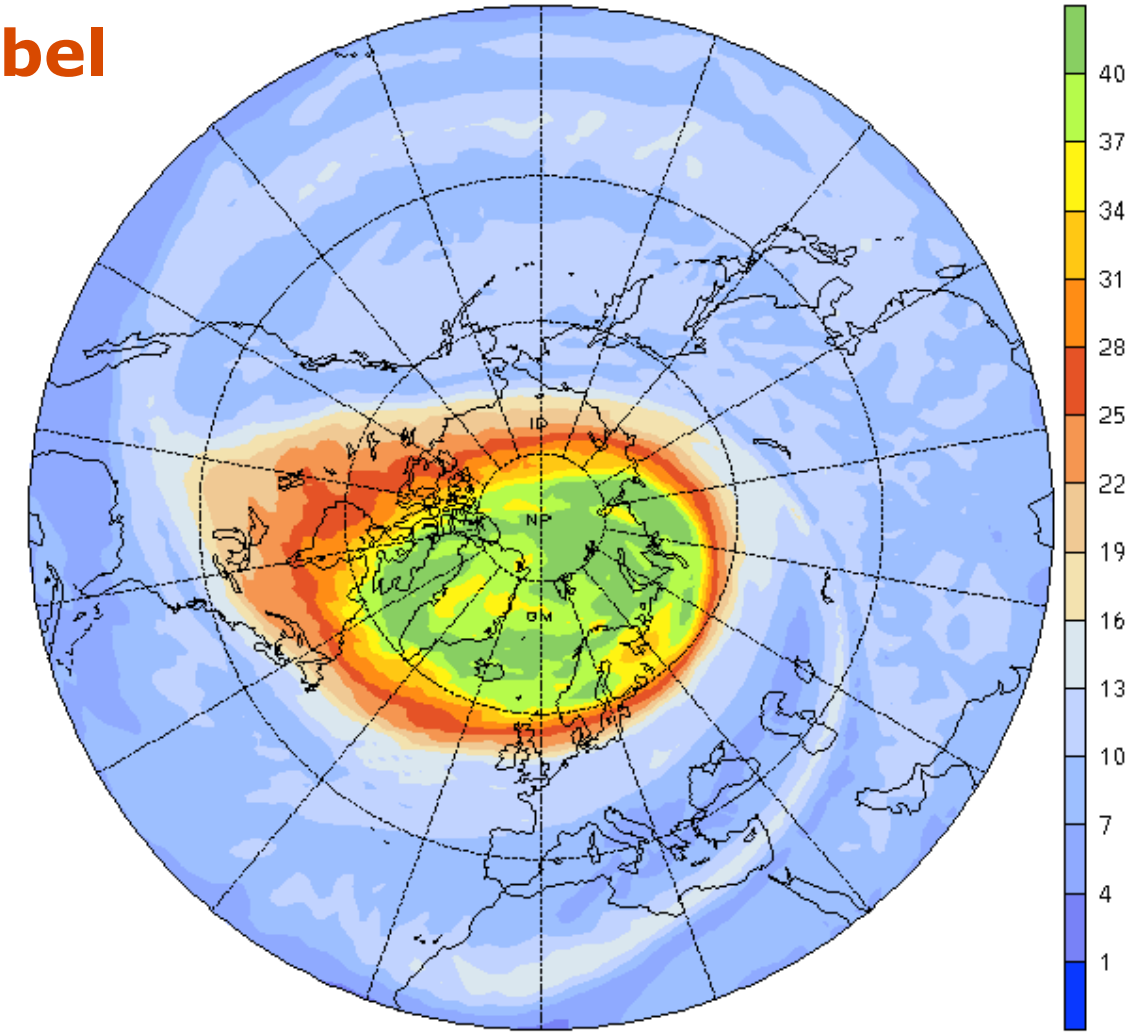
PSCs bestehen aus Salpetersäure und Wasser



Der Polarwirbel:
Ein weiterer entscheidender Faktor für die Bildung des Ozonlochs

Der Polarwirbel

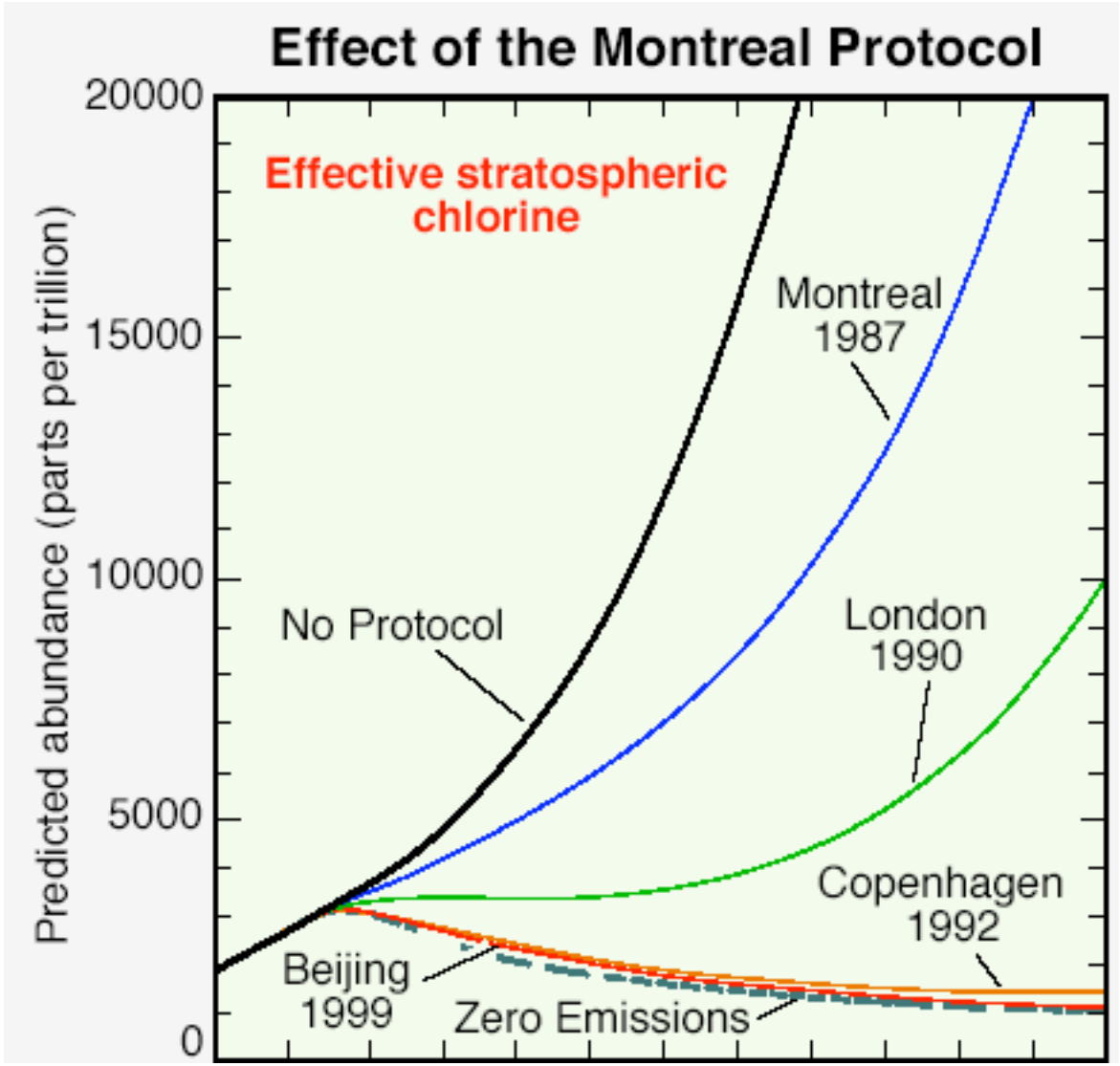
Bildet einen abgeschlossenen Kessel, aus dem die Luft während mehreren Monaten nicht entweichen kann



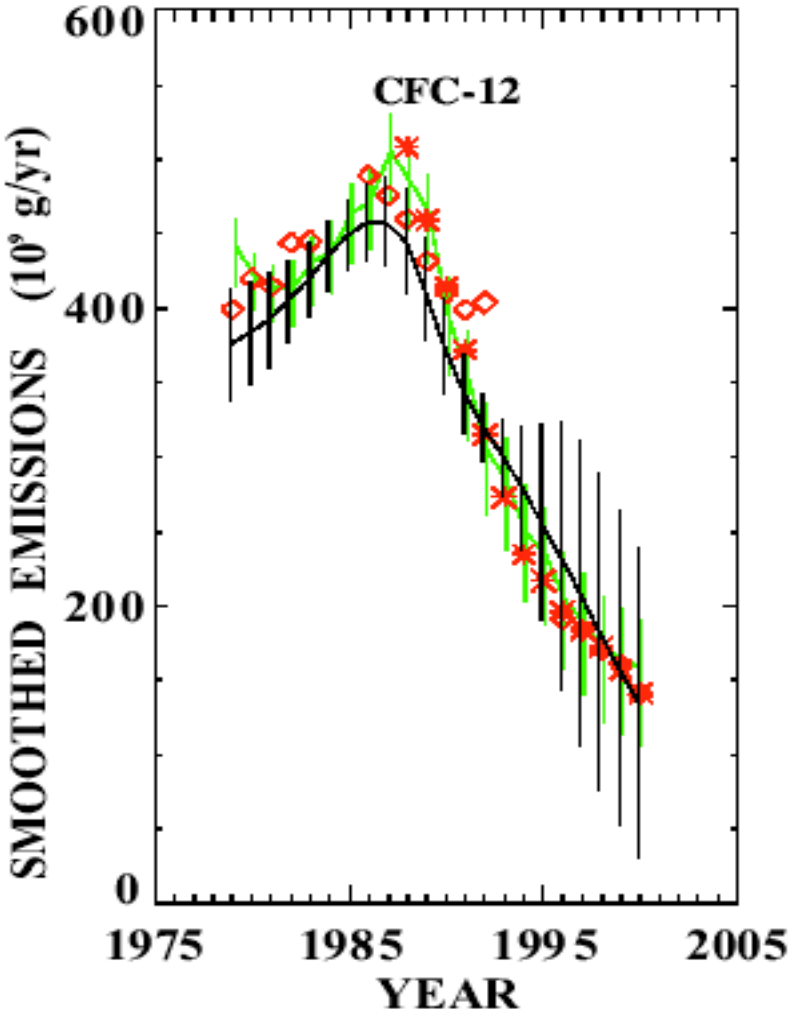
Animationen

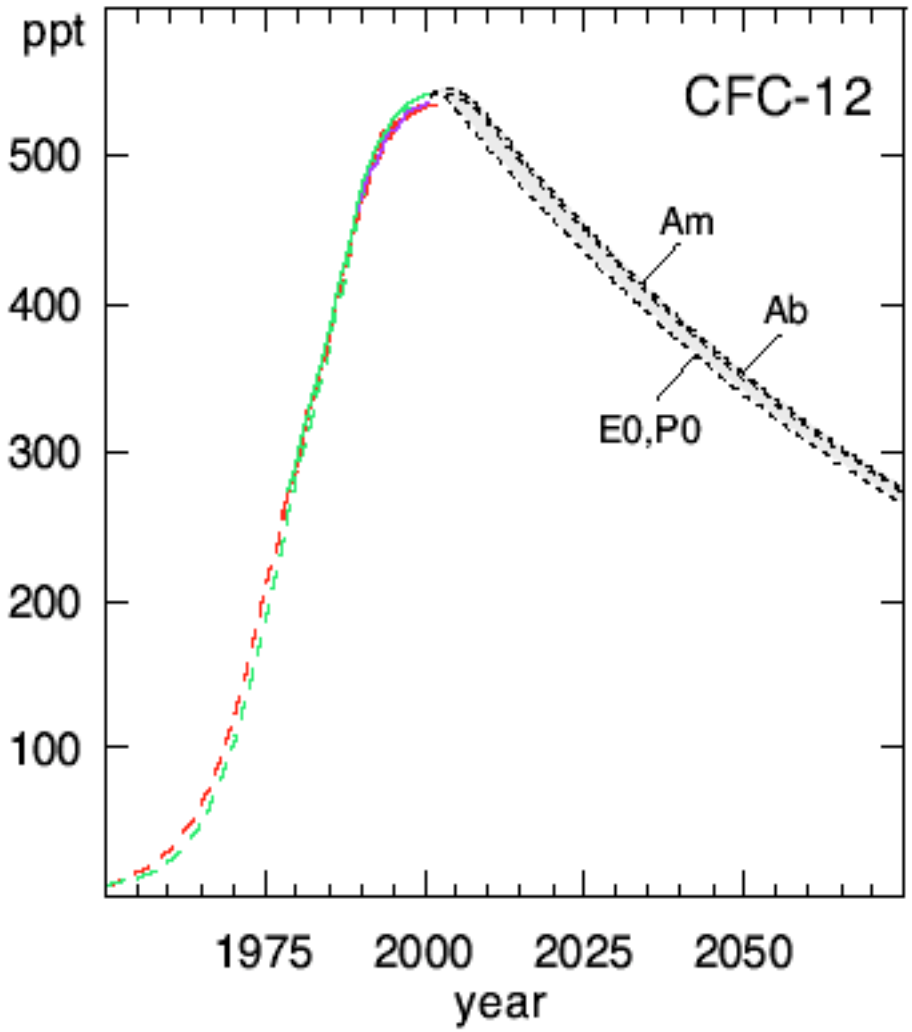
Polarwirbel und stratosphärische Temperaturen

Die Politik reagiert …

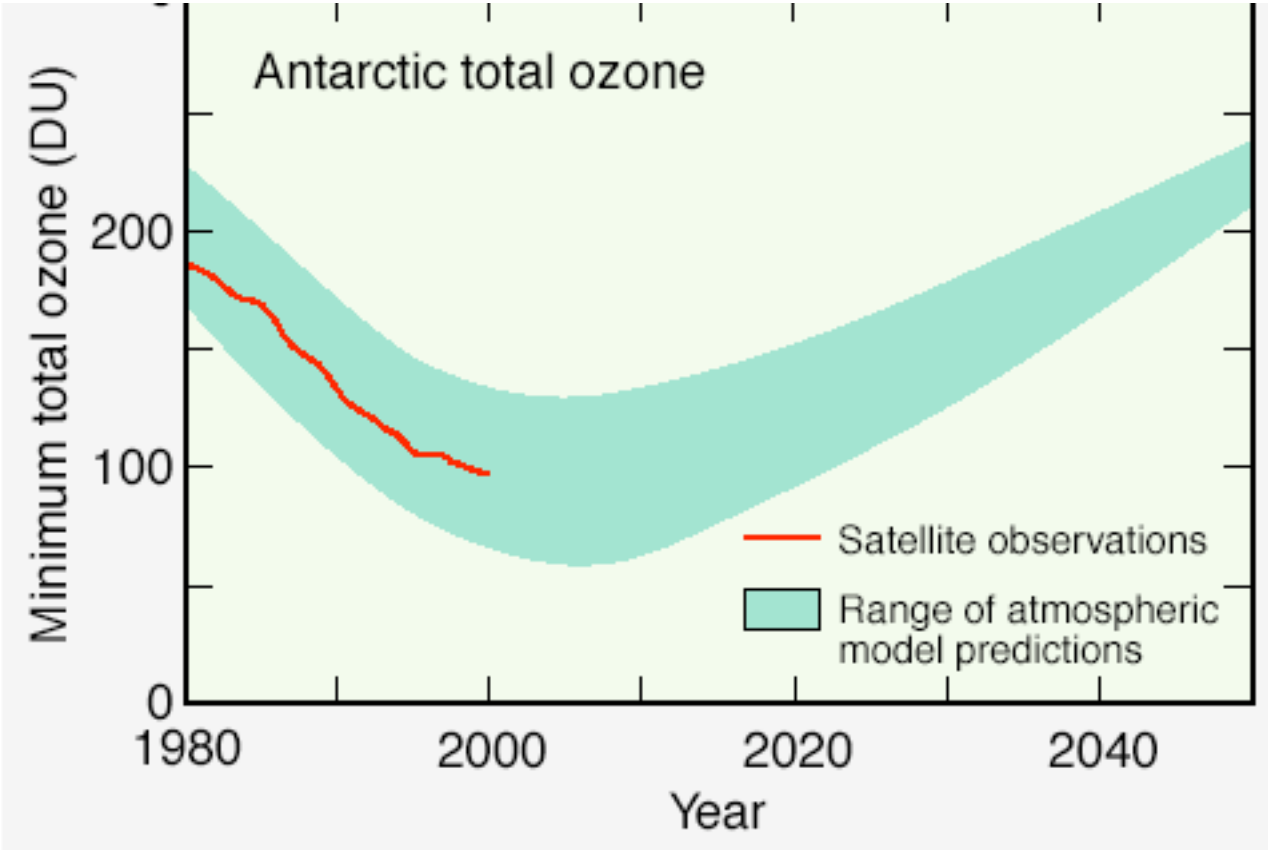

Effect of the Montreal Protocol
Predicted abundance (parts per trillion)
20000
15000
10000
5000
0
Effective stratospheric chlorine
Montreal 1987
No Protocol
London 1990
Copenhagen 1992
Beijing 1999
Zero Emissions

CFC-12: Emissionen und strat. Konzentrationen





Prognosen zur Erholung des Ozonlochs



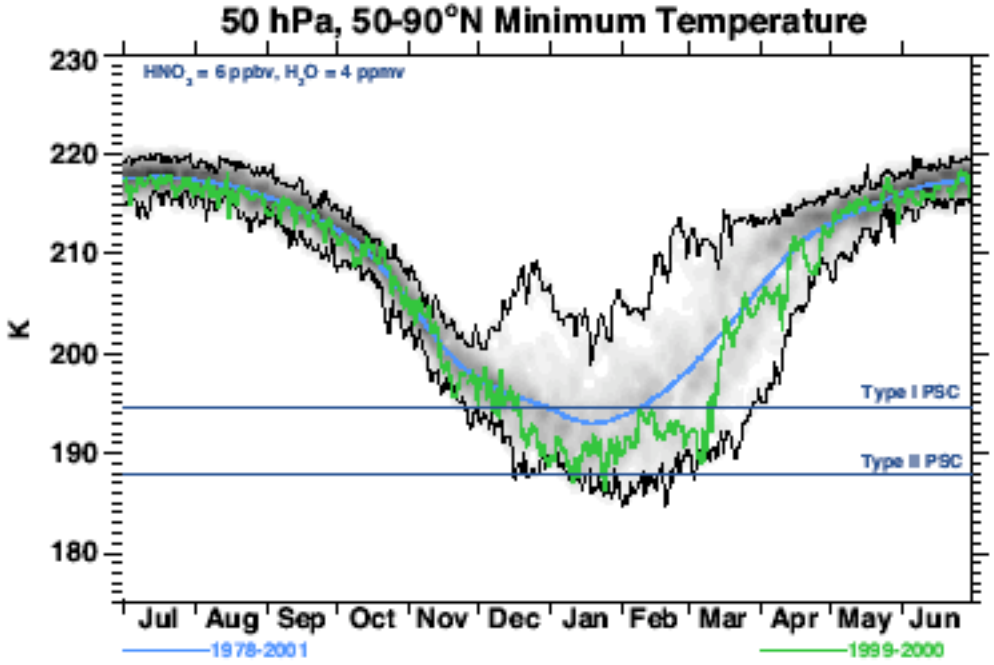
Das Ozonloch über der Arktis?

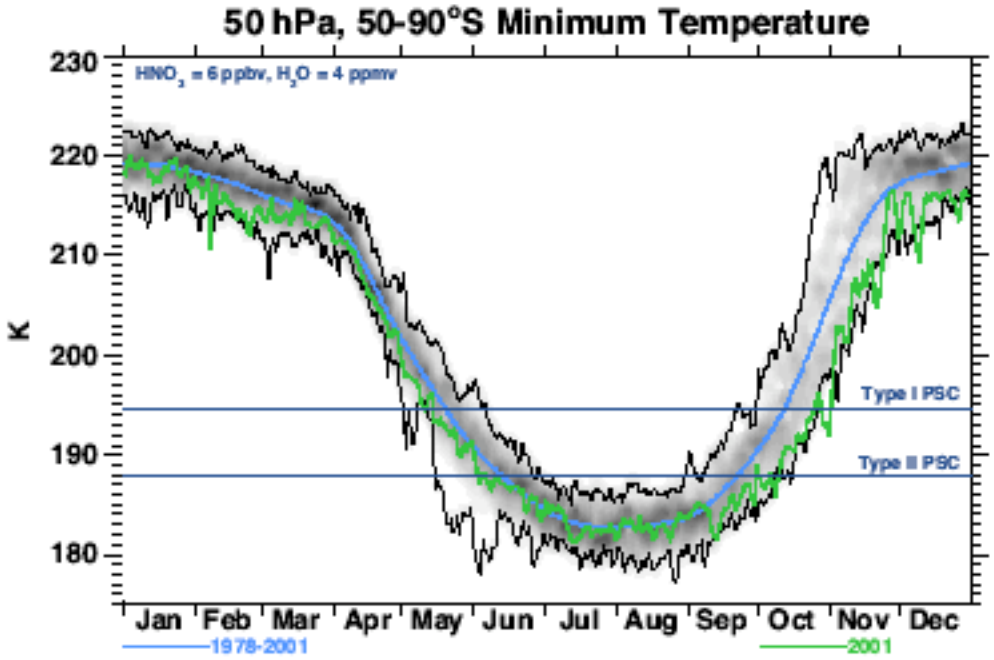
Arktis

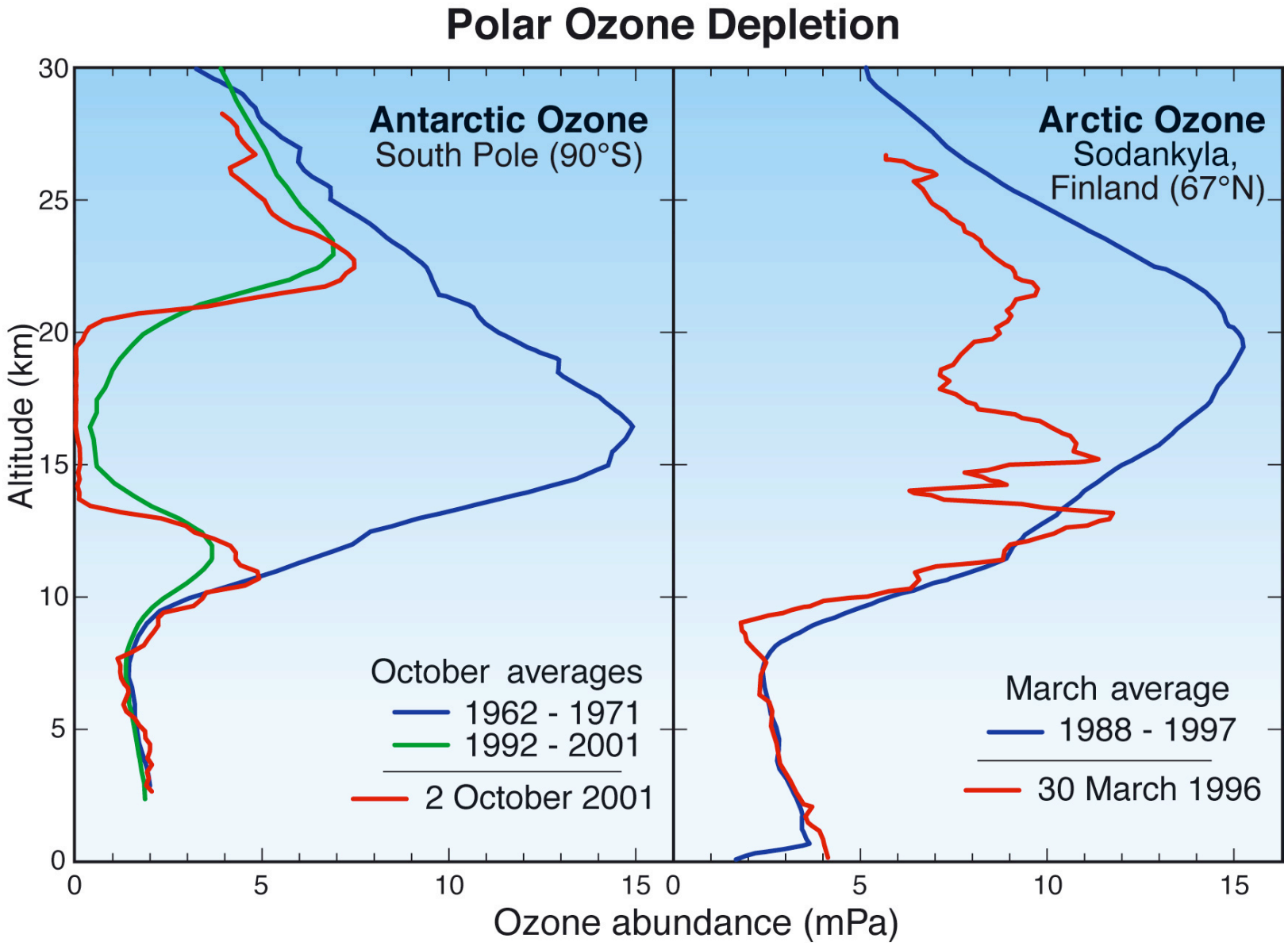
Im Vergleich zur Antarktis weniger …

- kalt
- PSCs
- Chloraktivierung
- Ozonzerstörung

Zudem grössere Unterschiede von Jahr zu Jahr

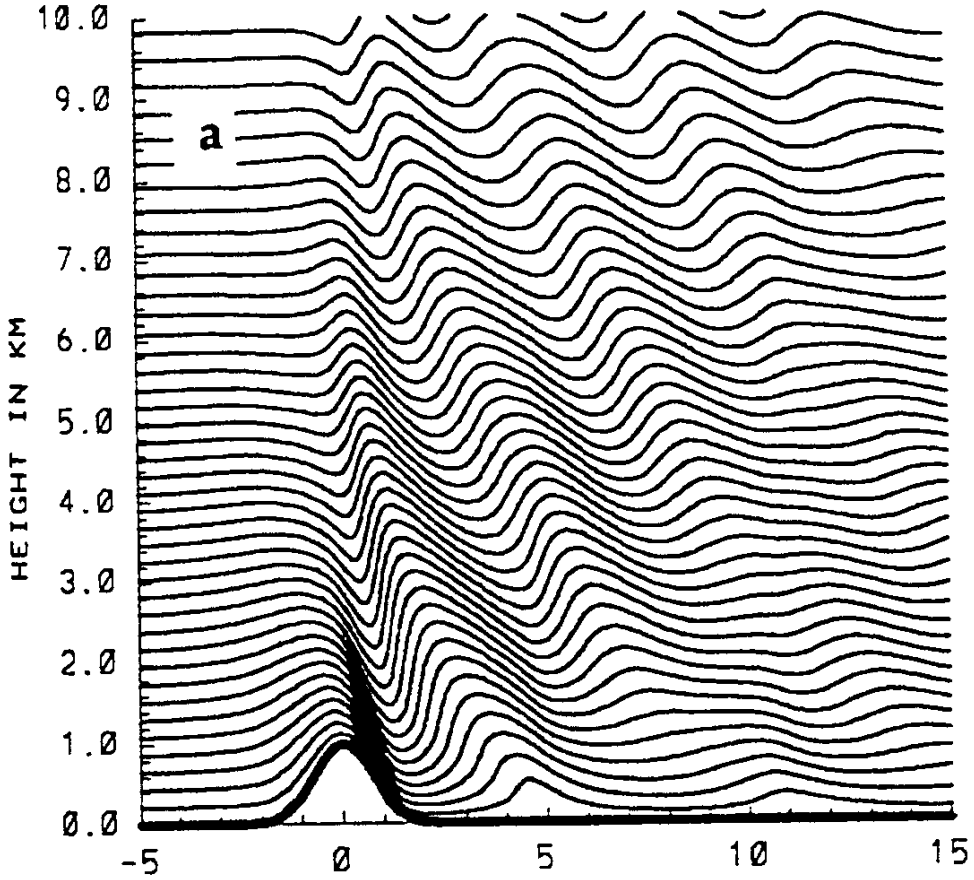





Polar Ozone Depletion
Antarctic Ozone
South Pole (90°S)
Arctic Ozone
Sodankyla,
Finland (67°N)
October averages
1962 - 1971
1992 - 2001
2 October 2001
March average
1988 - 1997
30 March 1996
Altitude (km)
Ozone abundance (mPa)
0
5
10
15
20
25
30

Gebirge (Skandinavien,
Grönland, Ural, ...) können
lokale PSCs erzeugen!

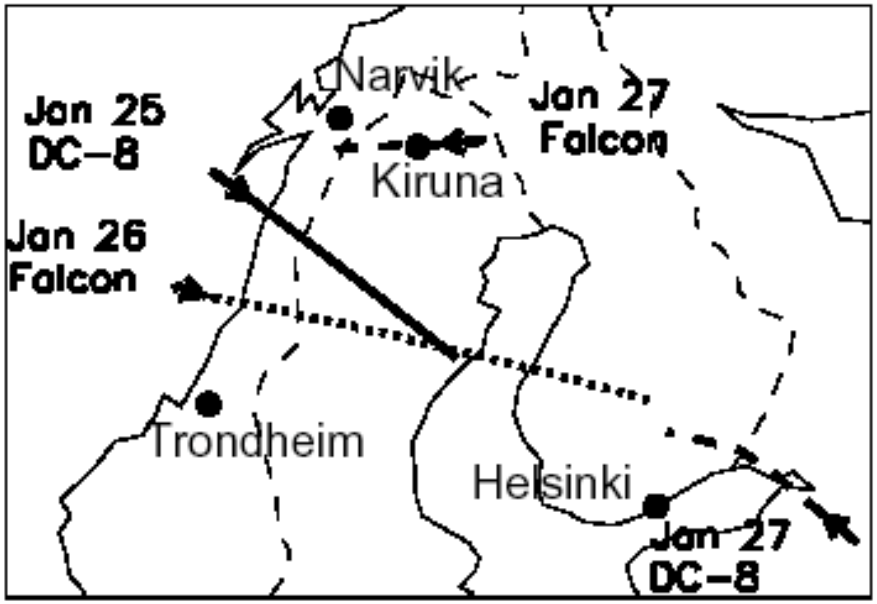
Berge erzeugen Schwerewellen

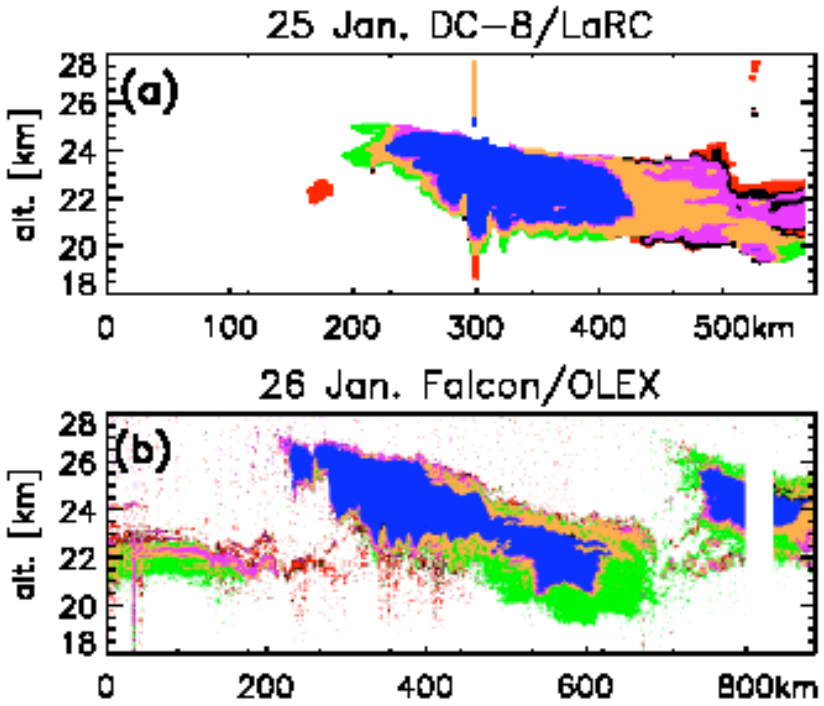


Luftpakete steigen auf (Abkühlung) und sinken wieder ab (Erwärmung)

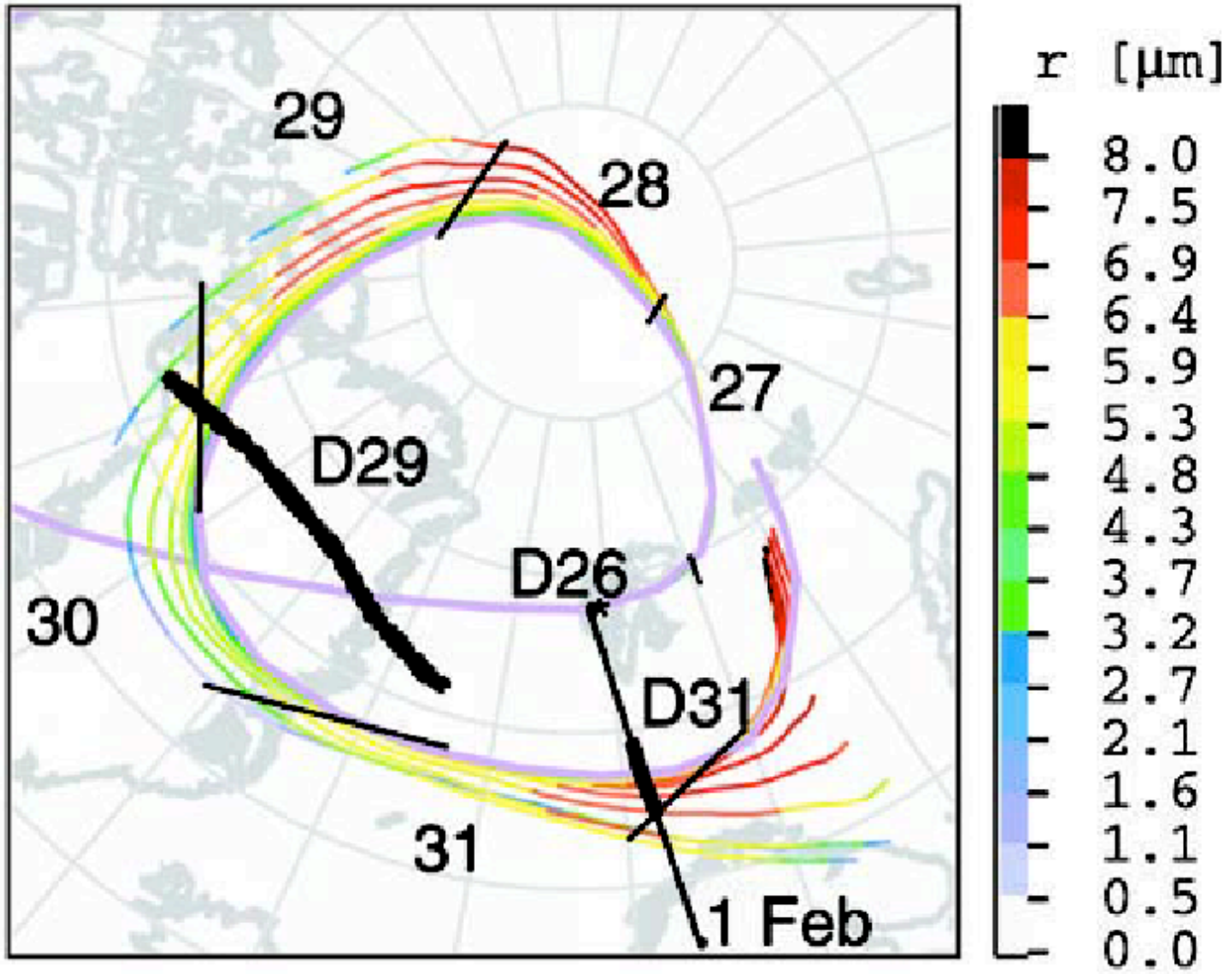
Effekte bis zu +/- 10K !

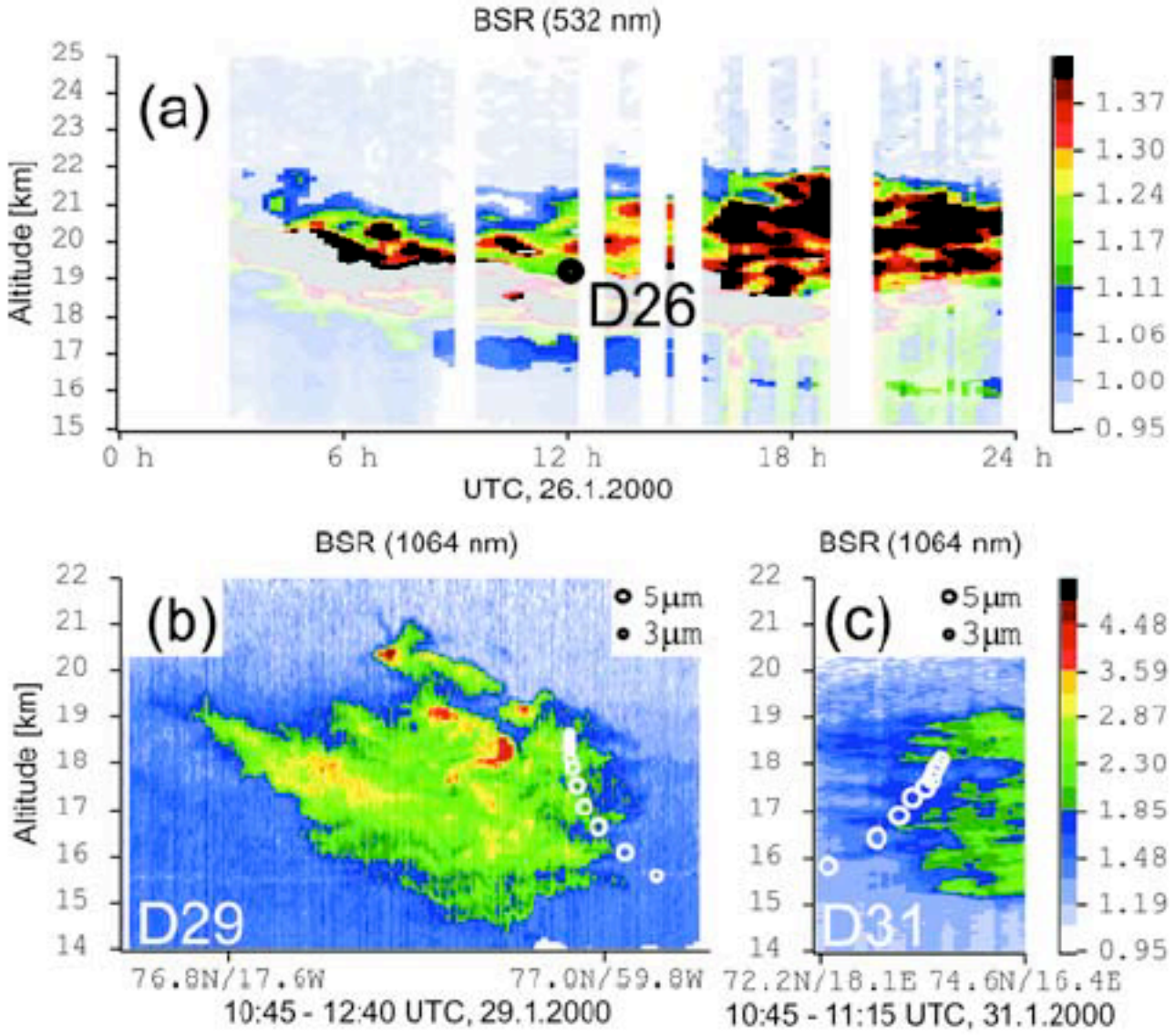
Schwerewellen erzeugen PSCs



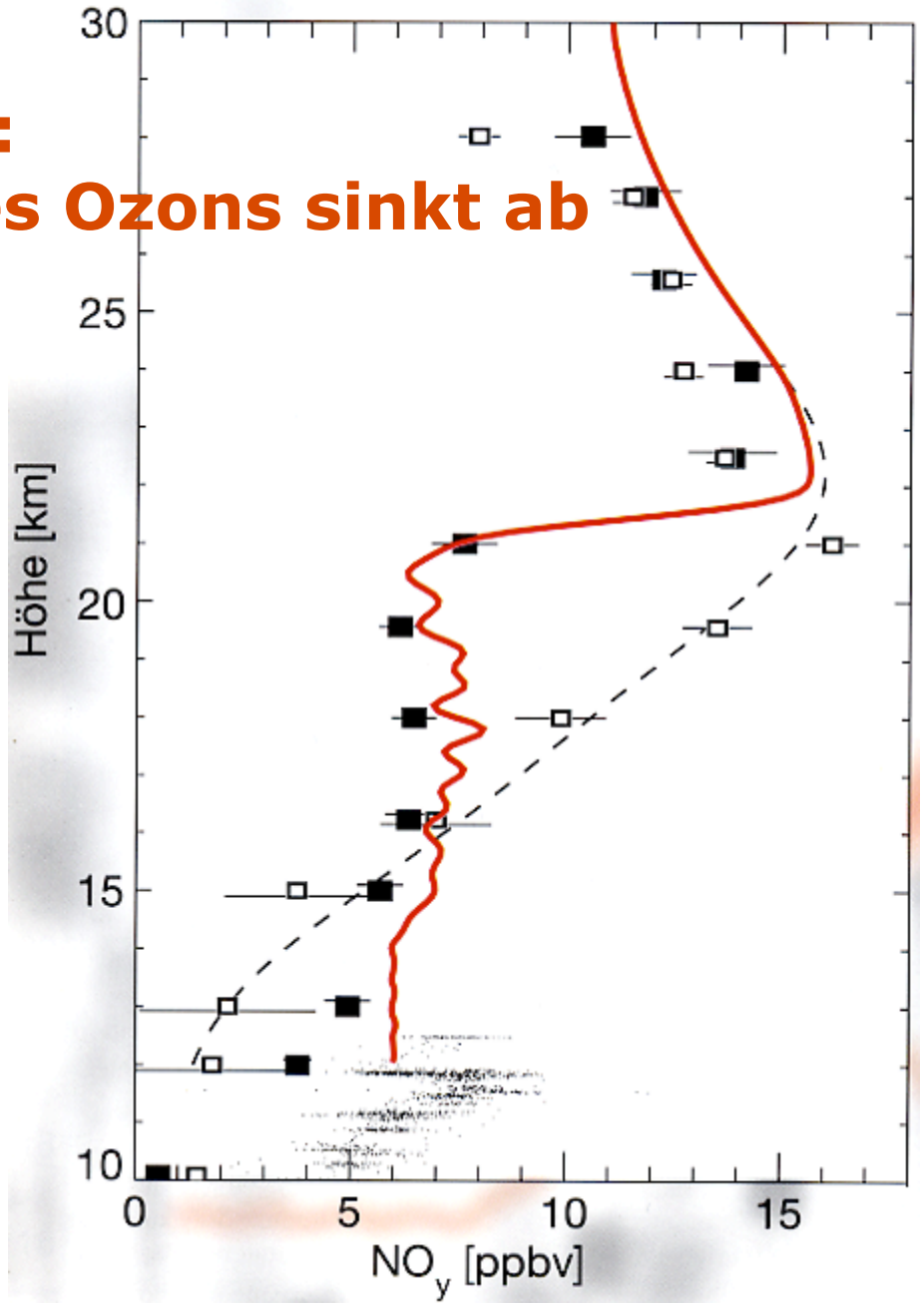


PSCs können im kalten Vortex um die Erde reisen




BSR (532 nm)
(a)
Altitude [km]
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
D26
0 h
6 h
12 h
18 h
24 h
UTC, 26.1.2000
1.37
1.30
1.24
1.17
1.11
1.06
1.00
0.95
BSR (1064 nm)
(b)
5µm
3µm
D29
76.8N/17.6W
77.0N/59.8W
10:45 - 12:40 UTC, 29.1.2000
BSR (1064 nm)
(c)
5µm
3µm
D31
72.2N/18.1E
74.6N/16.4E
10:45 - 11:15 UTC, 31.1.2000
4.48
3.59
2.87
2.30
1.85
1.48
1.19
0.95

Denitrifizierung: der “Freund” des Ozons sinkt ab



Zusammenfassung
(Ant)arktisches Ozonloch

- FCKWs: sind Quelle der Chlorradikale in der Stratosphäre

- Wolken: auf polaren Stratosphärenwolken spielt sich die entscheidende Chemie ab

- Berge: können wichtig sein, in dem sie Schwerewellen erzeugen, die in die Stratosphäre wandern und dort zu Abkühlung und ev. zur Wolkenbildung führen

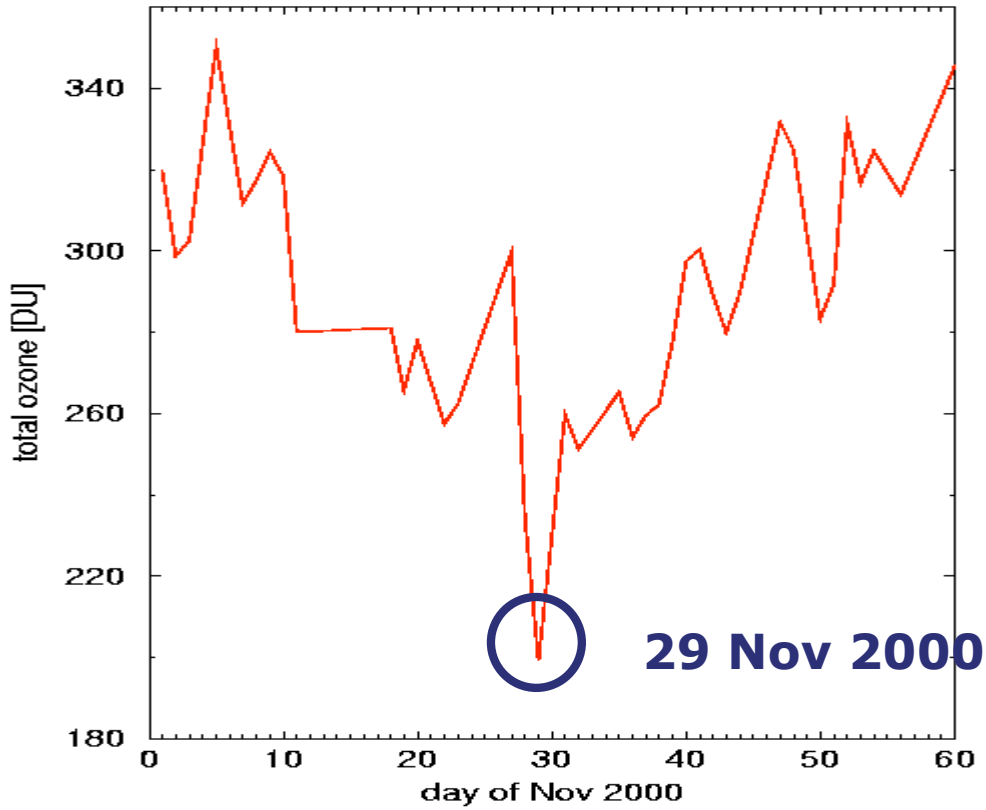
- Temperatur: ist ganz entscheidend für die Bildung von PSCs (diese existieren nur bei sehr tiefen Temperaturen)

- Wirbel: der Polarwirbel entsteht im polaren Winter und hält die Luftmassen über Monate zusammen; in diesem Wirbel läuft die Ozonzerstörung

- Sonnenstrahlung: entscheidend bei der Bildung von Chlorradikalen

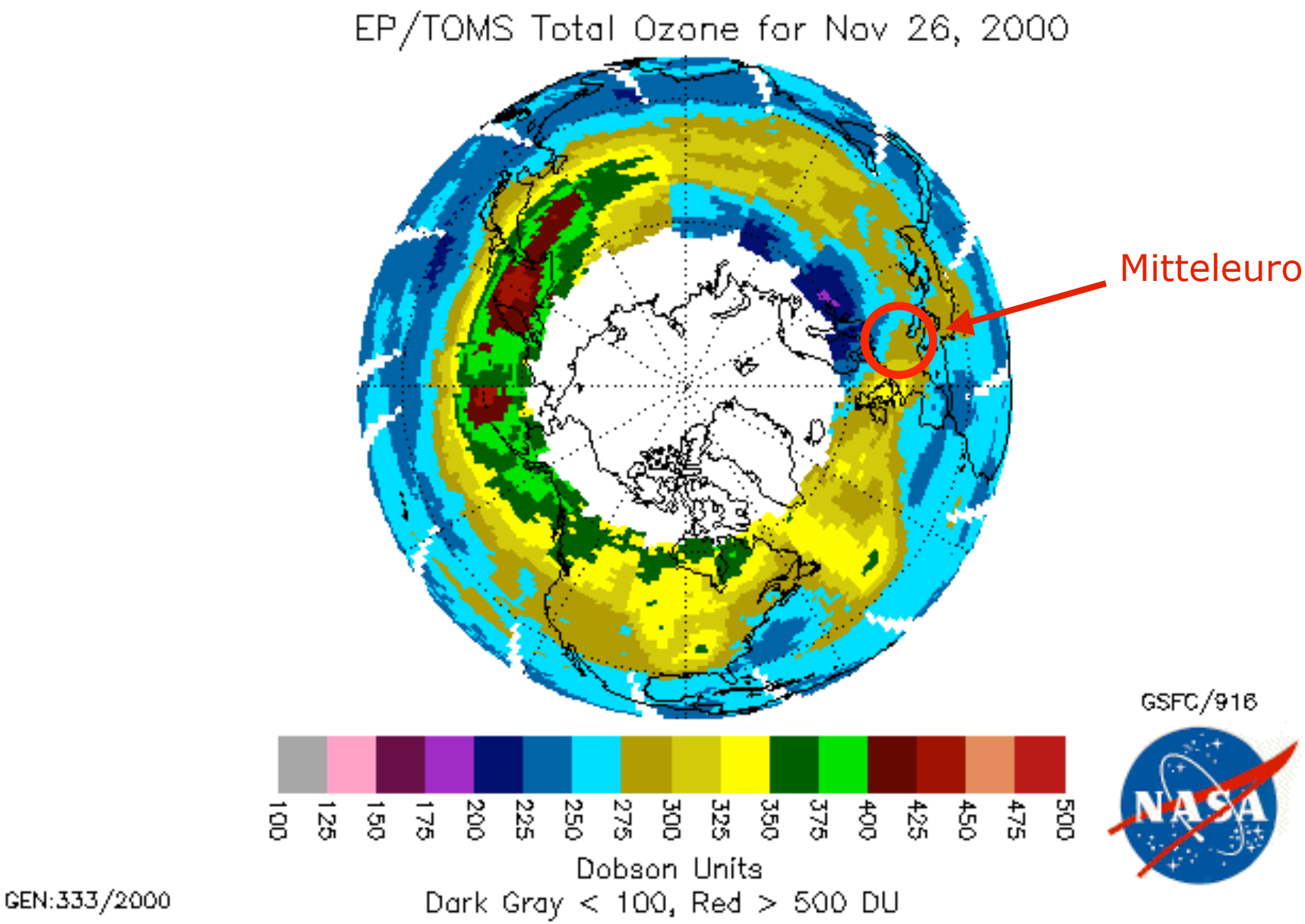
Ein Ozonloch über Europa?

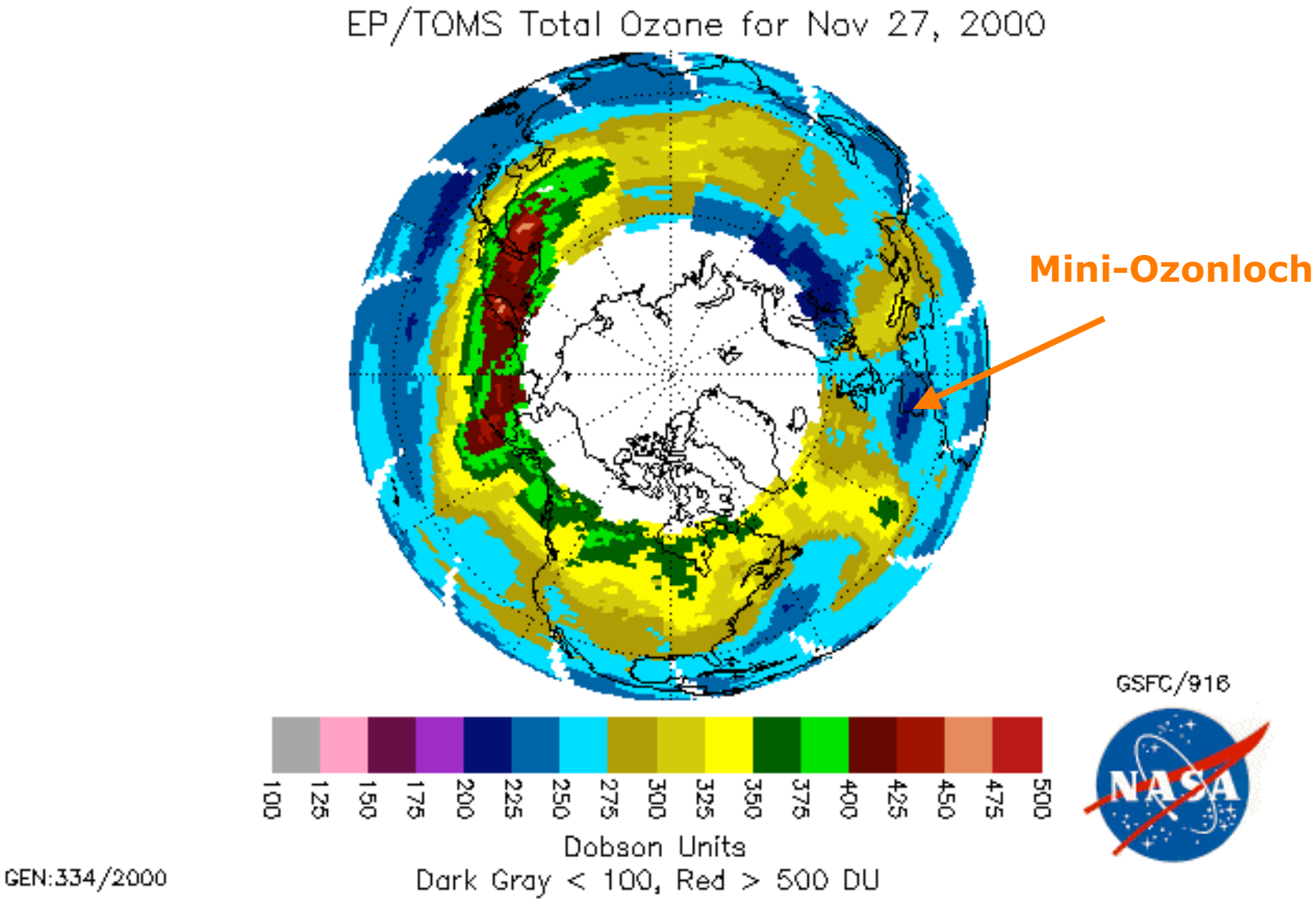
Ein Mini-Ozonloch
Messungen des Totalozons in Arosa

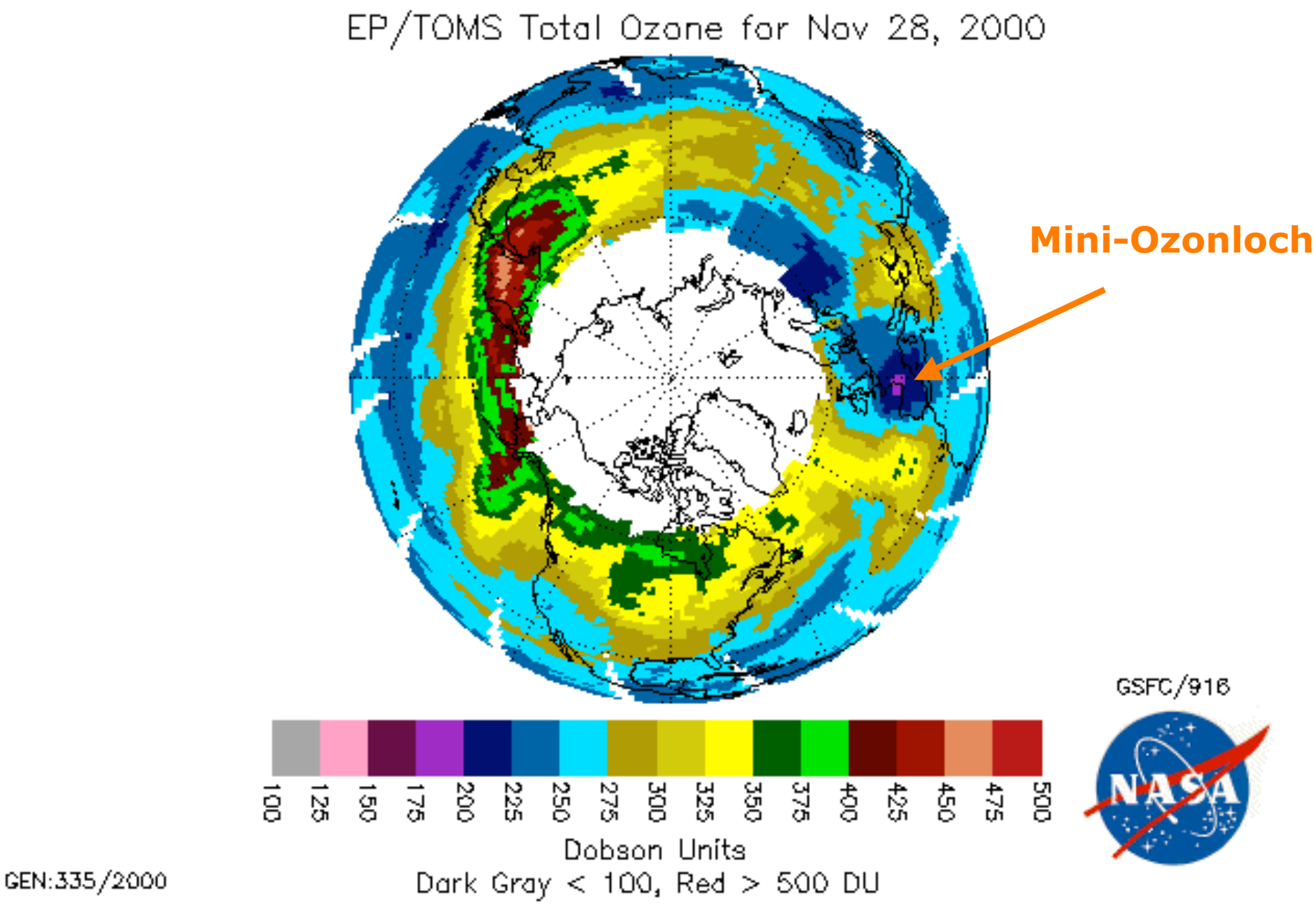


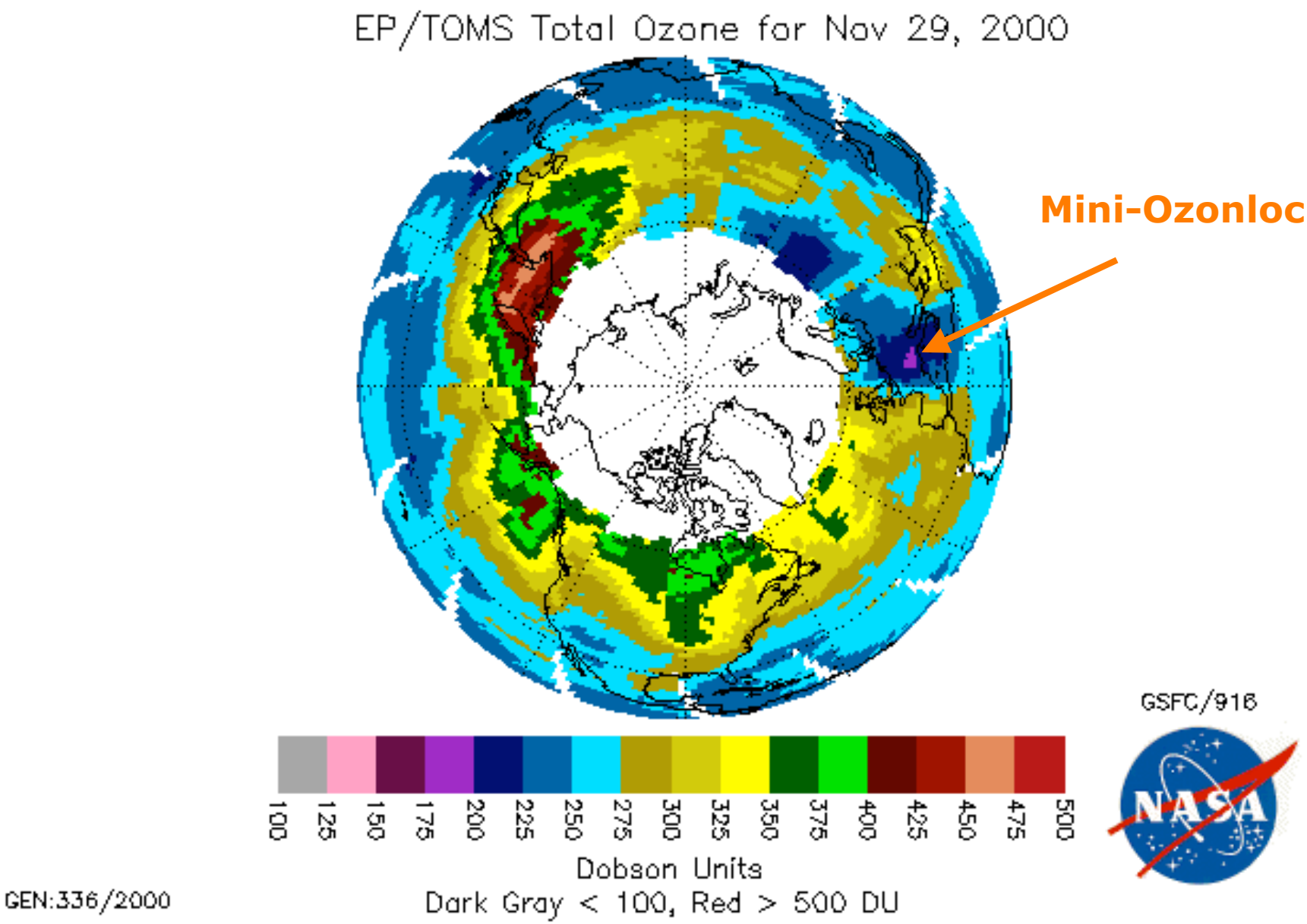
Normale Variabilität
ca. 300 +/- 30 DU

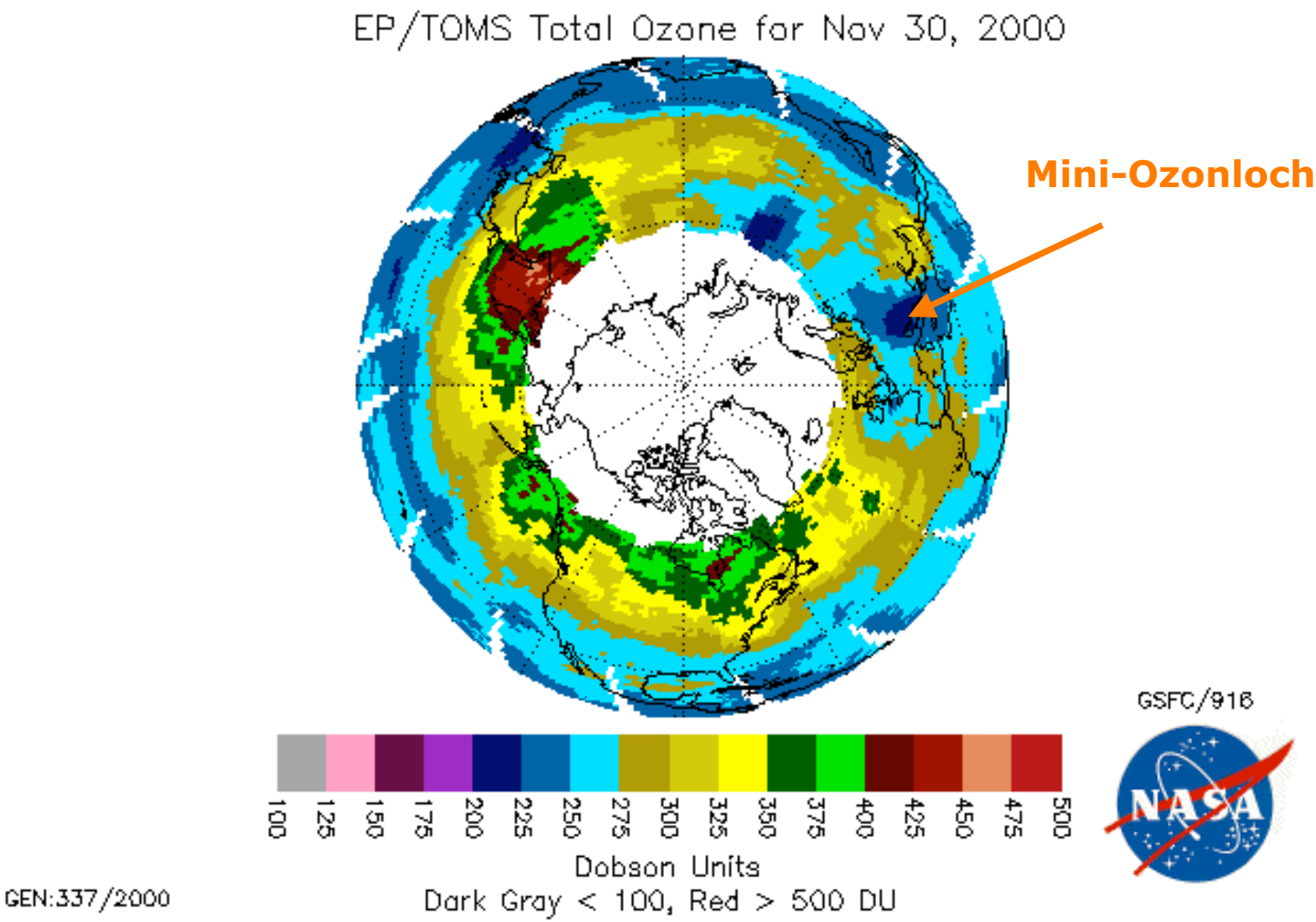
29 Nov 2000: nur 200 DU


EP/TOMS Total Ozone for Nov 26, 2000
Mitteleuropa
GSFC/916
100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500
Dobson Units
Dark Gray < 100, Red > 500 DU
GEN:333/2000

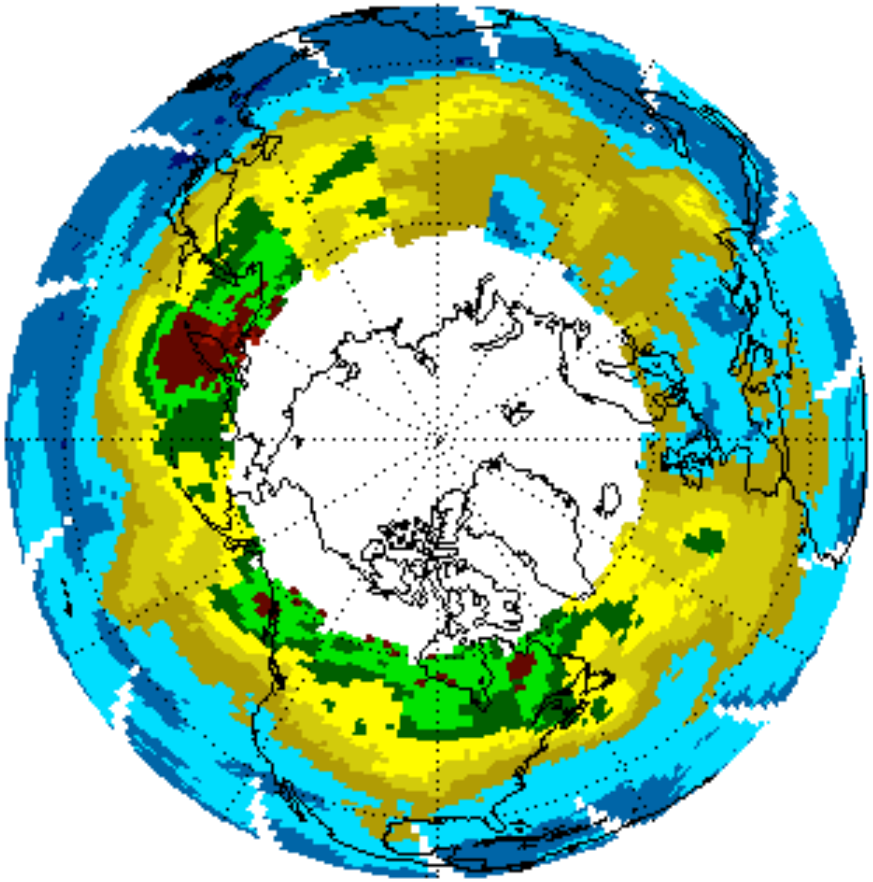

EP/TOMS Total Ozone for Nov 27, 2000
Mini-Ozonloch
GSFC/916
100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500
Dobson Units
Dark Gray < 100, Red > 500 DU
GEN:334/2000

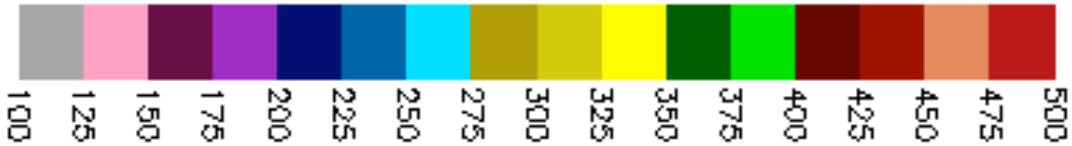

EP/TOMS Total Ozone for Nov 28, 2000
Mini-Ozonloch
GSFC/916
100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500
Dobson Units
Dark Gray < 100, Red > 500 DU
GEN:335/2000


EP/TOMS Total Ozone for Nov 29, 2000
Mini-Ozonloch
GSFC/916
100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500
Dobson Units
Dark Gray < 100, Red > 500 DU
GEN:336/2000


EP/TOMS Total Ozone for Nov 30, 2000
Mini-Ozonloch
GSFC/916
100 125 150 175 200 225 250 275 300 325 350 375 400 425 450 475 500
Dobson Units
Dark Gray < 100, Red > 500 DU
GEN:337/2000

EP/TOMS Total Ozone for Dec 1, 2000





Dobson Units

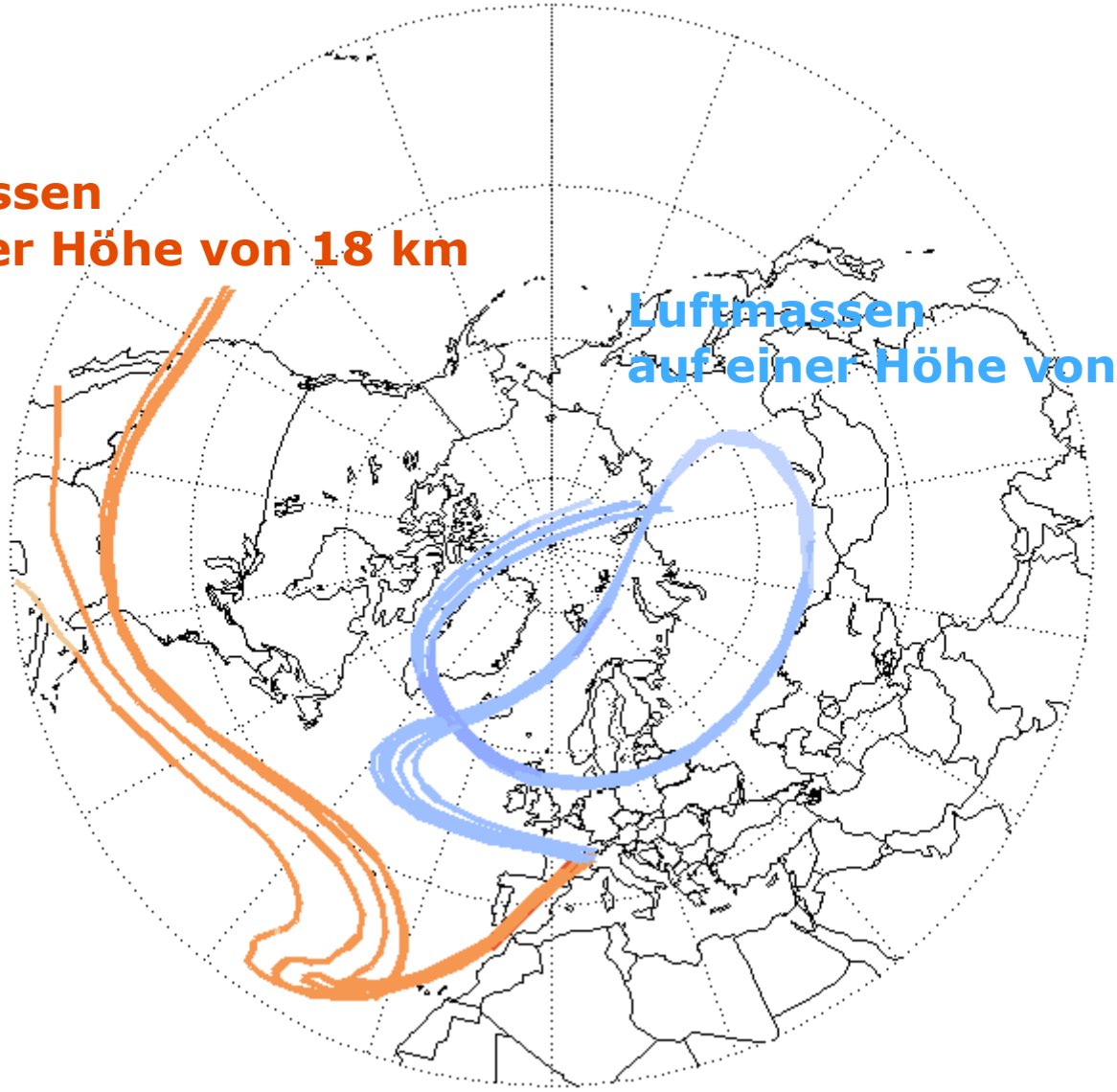
Dark Gray < 100, Red > 500 DU

GSFC/916

GEN:338/2000

Herkunft der Luftmassen im Mini-Ozonloch

Luftmassen
auf einer Höhe von 18 km



Luftmassen
auf einer Höhe von 26 km

Mini-Ozonlöcher in den mittleren Breiten

Sind alleine durch Transportprozesse in der Stratosphäre erklärbar.

Chemische Prozesse spielen bei ihrer Bildung (fast) keine Rolle.

Sie führen genauso zu einer erhöhten schädlichen UV Strahlung wie die polaren Ozonlöcher - die Ozonreduktion beschränkt sich jedoch auf einen kleineren Raum und eine kürzere Zeit.

Sie treten 2-3 Mal jährlich auf (an verschiedenen Orten).

Schlussbemerkung: Ozonloch und Klimaänderung

Herzlichen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit
und ein schönes Wochenende …