

# Kapitel 6

## Meteorologie der arktischen Winter 1991/92, 1994/95 und 1995/96

Aus Kapitel 3 geht hervor, welche wichtige Rolle die meteorologische Situation eines Winters für das Zustandekommen chemischen Ozonabbaus spielt. Für den Ozonabbau sind besonders Temperatur, Lage und Stabilität des Polarwirbels ausschlaggebend. Aus diesen Größen geht hervor, welches Potential für PSC-Bildung in dem Winter vorhanden war und wieviel Sonnenlicht die im Wirbel eingeschlossenen Luftmassen während der verschiedenen Phasen des Winters erhalten haben.

### 6.1 Definition des Polarwirbels

Zunächst soll in diesem Abschnitt eine Abgrenzung des Bereichs vorgenommen werden, der in der vorliegenden Arbeit als Polarwirbel bezeichnet wird. Wie in Kapitel 3 beschrieben, bildet der Polarwirbel eine zu einem gewissen Grade von der Umgebung isolierte Luftmasse. Der Bereich des maximalen horizontalen PV Gradienten ( $\Delta PV_{\max}$ ) stellt die Begrenzung dar, die den turbulenten Luftmassenaustausch am effektivsten unterdrückt. Zur Berechnung der Lage von  $\Delta PV_{\max}$  wurde täglich für eine große Anzahl von PV-Isolinien der Radius ( $r$ ) des Kreises berechnet, der den gleichen Flächeninhalt umschließt wie die Isolinie. Die Fläche innerhalb einer gegebenen PV Isolinie wurde aus den EZMW Analysen in  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  Auflösung berechnet, indem die Fläche aller Gitterzellen mit größeren PV Werten als der PV Wert der jeweiligen Isolinie aufintegriert wurden. Der PV Wert bei  $\Delta PV_{\max}$  wird von dem PV Wert angenähert, bei dem die Ableitung  $dPV/dr$  ihr Maximum annimmt.

Tabelle 6.1 zeigt die zeitliche Entwicklung der Lage von  $\Delta PV_{\max}$ , ausgedrückt in nPV, auf der 475 K Isentrope für die drei untersuchten Winter. Es zeigt sich, daß die Lage von  $\Delta PV_{\max}$  zeitlich verhältnismäßig konstant ist und sich meist zwischen  $38 \text{ s}^{-1}$  und  $41 \text{ s}^{-1}$  nPV Werten befindet.

Tabelle 6.2 zeigt beispielhaft für eine Phase des EASOE Winters wie die Lage von  $\Delta PV_{\max}$  mit der Höhe variiert. Die Lage von  $\Delta PV_{\max}$  oberhalb von 400 K ist auch relativ höhenkonstant, wenn sie in nPV angegeben wird. Dieses Verhalten bestätigt sich auch für andere untersuchte Zeiträume. Es legt nahe, bei der Definition der Wirbelkante einen höhenunabhängigen nPV Wert zu verwenden.

Im Gegensatz zu vielen anderen Methoden zur Bestimmung von Ozonverlusten ist die Match Methode nicht darauf angewiesen, daß der untersuchte Bereich gut gegen Austauschprozesse isoliert ist. Daher kann in dieser Arbeit die Definition des Untersuchungsgebiets frei vorgenommen werden. Die Bereiche, in denen die Temperaturen tief genug werden, um PSC-Bildung zu

Datum [ Tag des Jahres ]	nPV bei $\Delta PV_{\max}$ [ $s^{-1}$ ]	Anteil des Wirbels, der von nPV bei $\Delta PV_{\max}$ eingeschlossen wird [ % ]
1991/92		
7	$40.3 \pm 0.7$	87
21	$39.3 \pm 1.2$	89
35	$37.5 \pm 1.0$	92
49	$37.4 \pm 1.4$	91
63	$39.4 \pm 0.6$	84
77	$38.1 \pm 1.9$	83
1994/95		
7	$41.4 \pm 0.7$	84
21	$41.4 \pm 0.8$	82
35	$37.3 \pm 0.9$	94
49	$38.9 \pm 0.7$	81
63	$41.0 \pm 0.7$	76
77	$38.9 \pm 1.0$	76
1995/96		
7	$38.2 \pm 0.5$	93
21	$38.6 \pm 0.5$	92
35	$38.7 \pm 0.8$	90
49	$36.7 \pm 0.8$	95
63	$36.3 \pm 0.8$	99
77	$39.3 \pm 1.3$	71

**Tabelle 6.1:** Zeitliche Variation der Position des maximalen horizontalen PV Gradienten in nPV. Weiterhin ist der prozentuale Anteil der Wirbelfläche (definiert als die Fläche innerhalb von  $36 s^{-1}$  nPV) gegeben, die von der zum maximalen PV Gradienten gehörenden PV Isolinie umschlossen wird.

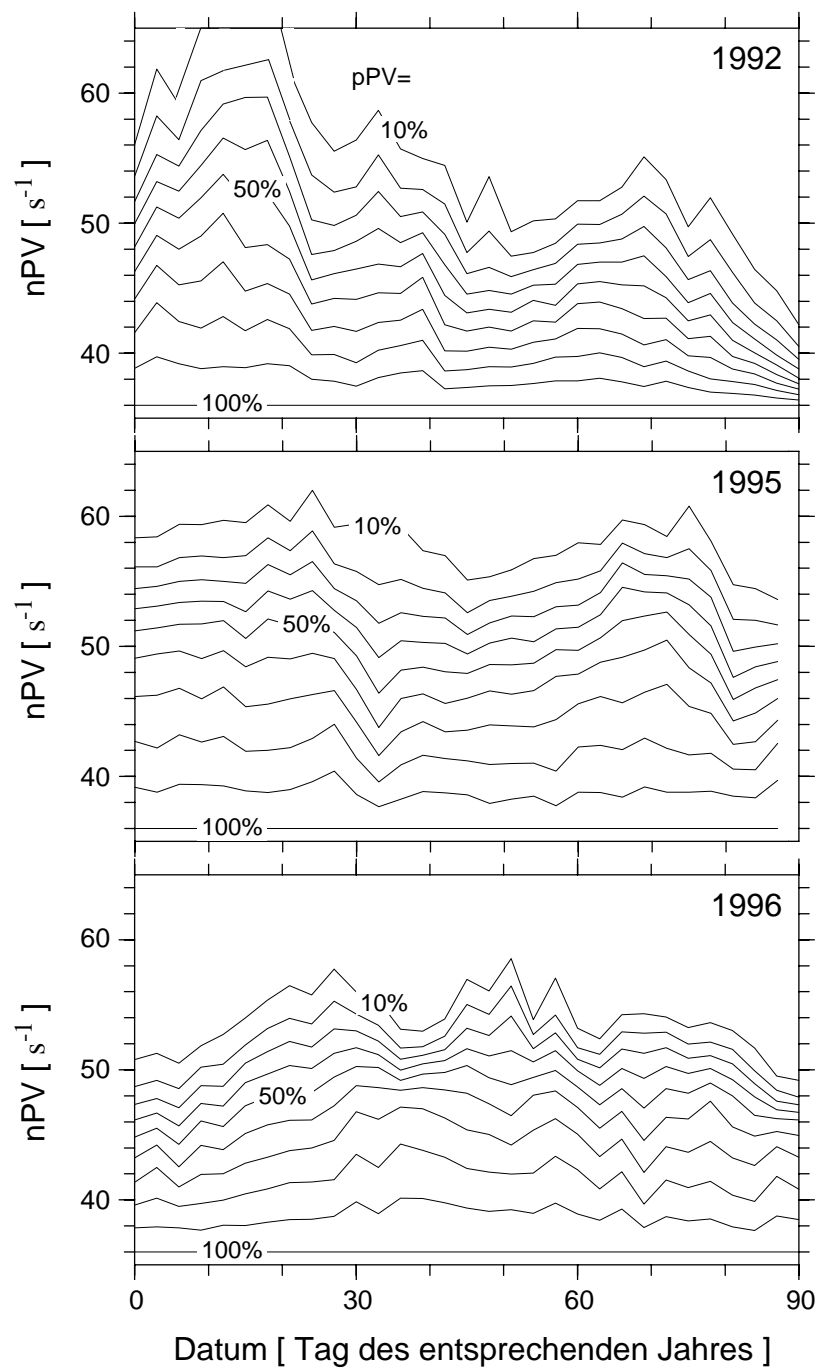
Potentielle Temperatur [ K ]	nPV beim maximalen PV Gradienten [ s <sup>-1</sup> ]
350	kein ausgeprägtes Maximum
380	43.6 ± 0.6
400	40.9 ± 0.8
425	38.9 ± 0.4
450	38.5 ± 0.3
475	38.8 ± 0.3
500	38.6 ± 0.5
525	38.2 ± 0.5
550	37.7 ± 0.5

**Tabelle 6.2:** Die Lage des maximalen PV-Gradienten in normed PV für verschiedene isentrope Flächen als Mittel über den Zeitraum 1. Januar bis 9. Februar 1992

erlauben, ragen häufig etwas aus dem Bereich der am besten isolierten Luftmasse heraus. Deshalb soll hier als Untersuchungsgebiet eine Luftmasse gewählt werden, die auch den Bereich direkt außerhalb der Lage von  $\Delta PV_{\max}$  umschließt. In der vorliegenden Arbeit wird einheitlich  $36 \text{ s}^{-1}$  nPV als äußere Begrenzung des Untersuchungsgebiets gewählt. Der Bereich mit nPV-Werten von mehr als  $36 \text{ s}^{-1}$  nPV wird hier als innerhalb des Polarwirbels bezeichnet. Wie aus Tabelle 6.1 ersichtlich, ist der Polarwirbel bei dieser Definition im Mittel in der Fläche etwa 10-15% größer als der Bereich innerhalb der von  $\Delta PV_{\max}$  definierten PV Isolinie. Bei der Untersuchung der Ozonverluste zeigt sich, daß mit dieser Definition des Polarwirbels zumindest im Jahr 1995 im wesentlichen der gesamte polare Ozonverlust erfaßt wird. Dies wäre nicht der Fall, wenn der PV Wert bei  $\Delta PV_{\max}$  als Außengrenze des Wirbels verwendet werden würde (siehe Abbildung 7.13).

### 6.1.1 pPV als Koordinatensystem im Wirbel

Als an den Wirbel gekoppelte Koordinate wird hier die Größe pPV eingeführt. pPV gibt an, welcher Anteil der Gesamtfläche des Polarwirbels von der dazugehörigen Isolinie von nPV umschlossen wird. Damit läuft pPV von 0% im Wirbelzentrum zu 100% bei der nPV Isolinie, die zur Definition des Wirbelrands verwendet wird. Der Vorteil von pPV ist, daß gleiche Intervalle in pPV gleichen Anteilen der Wirbelfläche entsprechen. Abbildung 6.1 zeigt für die drei behandelten Winter die Zuordnung zwischen pPV und nPV.



**Abbildung 6.1:** Die Beziehung zwischen pPV und nPV für die untersuchten Zeiträume. Dargestellt ist der Verlauf von nPV für jeweils die pPV Werte 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100%. Der nPV Wert zu 100% pPV ist definitionsgemäß  $36 \text{ s}^{-1}$ .

## 6.2 Abschätzung der Bereiche mit PSC-Bedingungen

Da das Auftreten von PSCs für die chemische Situation im Polarwirbel so außerordentlich wichtig ist, wurde hier als Indikator für die PSC Aktivität zu jedem Zeitpunkt und auf verschiedenen Isentropen die Fläche ( $A_{\text{NAT}}$ ) berechnet, innerhalb derer die EZMW Temperaturen unterhalb von  $T_{\text{NAT}}$  lagen. Dabei wurde analog zu Pawson et al. [1995] vorgegangen, die eine ähnliche Analyse für die Winter 1984-1994 mit den Berliner Stratosphärentemperaturen durchgeführt haben. In der vorliegenden Arbeit wurden die EZMW Temperaturanalysen in einem  $1.125^\circ \times 1.125^\circ$  Gitter verwendet. Die EZMW Flächen wurden zunächst auf 71 Isentropen mit 5 K vertikalem Abstand im Bereich 350 bis 700 K interpoliert. Die von Hanson und Mauersberger [1988] angegebene Formel für die NAT Gleichgewichtstemperatur wurde verwendet, um für jeden Gitterpunkt zu bestimmen, ob  $T_{\text{NAT}}$  unterschritten war. Dabei wurde ein  $\text{H}_2\text{O}$ -Mischungsverhältnis von 4.6 ppm und ein  $\text{HNO}_3$ -Mischungsprofil verwendet, welches vom Limb Infrared Monitor of the Stratosphere (LIMS) im Januar 1978 gemessen wurde [Gille und Russell, 1984].  $A_{\text{NAT}}$  wurde in jedem Niveau als Integral über die Flächen aller Gitterzellen bestimmt, in denen die Temperatur hinreichend kalt war. Weiterhin wurde analog die Fläche ( $A_{\text{EIS}}$ ) berechnet, in der die Temperatur unterhalb von  $T_{\text{EIS}}$  lag. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in den folgenden Abschnitten jeweils bei der Behandlung der einzelnen Winter gezeigt.

Die verwendete Abschätzung darf nur als grober Indikator für die Intensität des PSC Auftretens verstanden werden. Die wahre Zusammensetzung der PSC I Partikel ist Gegenstand vieler aktueller Forschungen (z.B. [Molina et al., 1993; Tolbert, 1994; Tabazadeh et al., 1994; Toon und Tolbert, 1995; Tabazadeh et al., 1996]). Vieles spricht dafür, daß PSC-Partikel häufig nicht aus NAT bestehen, sondern eine ganze Anzahl verschiedener Kondensate aus  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_3$ , und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  stabil vorkommen können. Dabei liegen anscheinend die meisten Kondensationstemperaturen dieser Kondensate etwas unterhalb der NAT Kondensationstemperatur. Die hier gezeigten Bereiche  $A_{\text{NAT}}$  (die im folgenden vereinfachend als Bereiche mit PSC-Bedingungen bezeichnet werden) sollten also eher als obere Grenze für die PSC-Bildung aufgefaßt werden.

Natürlich zeigen auch die atmosphärischen Konzentrationen von  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{HNO}_3$  eine räumliche und zeitliche Variabilität. Dies gilt insbesondere für  $\text{HNO}_3$ , dessen Konzentration sich im Verlauf eines Winters deutlich ändern kann. Die hier verwendeten Werte geben bestenfalls typische Werte der  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{HNO}_3$ -Mischungsverhältnisse an. Demnach können die tatsächlichen Flächen mit NAT-Bedingungen teilweise beträchtlich von den hier berechneten Werten abweichen. Genauere Untersuchungen über den Einfluß der verwendeten Annahmen für die  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{HNO}_3$ -Konzentrationen auf das Potential zur PSC-Bildung in der Nordhemisphäre finden sich z.B. in [Newman et al., 1993] und [Pawson et al., 1995].

Als weitere Unsicherheit in der Bestimmung der Bereiche mit PSC-Bedingungen kommt noch der Fehler der EZMW Temperatur hinzu. Durch die geringe Modellauflösung werden lokale Temperaturfluktuationen nicht erfaßt, was an einem gegebenen Ort zu Abweichungen von der wahren Temperatur um einige Kelvin führen kann. [Knudsen et al., 1996].

## 6.3 Abschätzung des diabatischen Absinkens im Wirbel

Um das mittlere diabatische Absinken der Luftmassen im Polarwirbel abzuschätzen, wurden dieselben diabatischen Erwärmungsraten ( $d\Theta/dt$ ) von SLIMCAT verwendet, die auch in Abschnitt 5.5.1.2 der vertikalen Korrektur der Trajektorien dienten. Eine Beschreibung der Berechnung von  $d\Theta/dt$  findet sich dort.

Auf allen Flächen, auf denen  $d\Theta/dt$  gegeben war, wurde der zugehörige PV-Wert durch vierdimensionale Interpolation aus den vom EZMW auf Gitterpunkten bereitgestellten PV-Daten ausgelesen. Dann wurde täglich das mit der Fläche der jeweiligen Gitterzelle gewichtete Mittel über alle  $d\Theta/dt$ -Werte gebildet, die an diesem Tag im Wirbel lagen. Dabei wurde auch über alle vier pro Tag vorliegenden  $d\Theta/dt$ -Felder gemittelt, so daß das Ergebnis dieser Operation Tagesmittel der über den Wirbel gemittelten diabatischen Raten waren. Diese Mittelung wurde für alle Flächen durchgeführt, auf denen  $d\Theta/dt$  vorlag. Abschließend wurde für verschiedene Startflächen das diabatische Absinken aus den täglichen Profilen des mittleren  $d\Theta/dt$  integriert. Dabei wurde zwischen den Flächen der Profile linear interpoliert, um  $d\Theta/dt$  am jeweils aktuellen Ort der Luftschicht zu erhalten. Dieser über den Wirbel gemittelte Ansatz berücksichtigt eventuelle Unterschiede der diabatischen Erwärmungsraten zwischen verschiedenen Wirbelbereichen nicht. Das integrierte mittlere Absinken sollte also nur als eine Abschätzung verstanden werden, wobei einem bewußt sein muß, daß einzelne Luftmassen eine von dieser mittleren Abwärtsbewegung abweichende Geschichte haben können. Die Ergebnisse der Abschätzungen sind in den Abschnitten angegeben, die die Polarwirbel der jeweiligen Winter beschreiben.

#### **6.4 Berechnung der mittleren Sonnenscheindauer pro Tag im Polarwirbel**

Die über den Polarwirbel gemittelte Sonnenscheindauer pro Tag ( $S_{\text{WIRBEL}}$ ) ist eine wichtige Größe zur Interpretation der Ozonabbauraten. Sie wurde täglich auf den Isentropen 350, 380, 400, 435, 475, 550 und 665 K bestimmt.

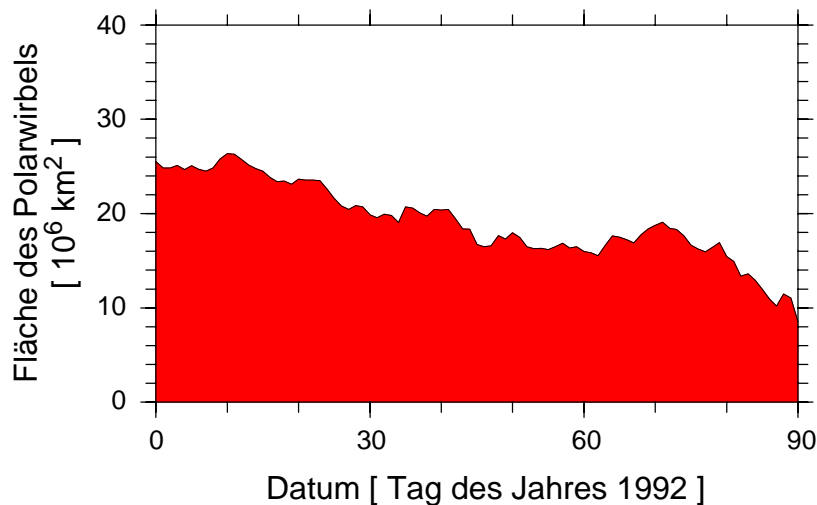
$S_{\text{WIRBEL}}$  ist jeweils identisch mit dem 24-Stundenmittel des Flächenanteils des Wirbels, der in der Sonne liegt. Es wurde stündlich für alle im Polarwirbel gelegenen Gitterpunkte der EZMW Daten in  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  Auflösung berechnet, ob sie in der Sonne liegen oder nicht. Zur Bestimmung des PV Wertes wurde dazu zwischen den zeitlich nächstliegenden Daten der alle 24 Stunden vorliegenden PV Werte interpoliert. Zur Berechnung des Beleuchtungszustands des Gitterpunktes wurde die gleiche Methode eingesetzt, die bei der Berechnung von  $t_s$  verwandt worden war. Für die dafür benötigte geometrische Höhe der Gitterpunkte wurde der in Tabelle 2.1 angegebene Zusammenhang verwendet. Es wurde dann sowohl die Gesamtfläche des Wirbels als auch die sonnenbeschienene Fläche über die Flächen der einzelnen Gitterzellen aufintegriert. Der Quotient aus beiden Flächen wurde über 24 Stunden gemittelt.

Das gleiche Verfahren wurde verwendet, um die über die inneren 50 Flächenprozent des Wirbels gemittelte Sonnenscheindauer pro Tag ( $S_{\text{KERN}}$ ) zu berechnen sowie die entsprechende Größe für die äußeren 50 Flächenprozent ( $S_{\text{RAND}}$ ).

#### **6.5 Stabilität des Polarwirbels, QBO und Solarzyklus**

Wie von Labitzke und van Loon [1988] gezeigt, besteht ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Stabilität des Polarwirbels und den jeweiligen Phasen der Quasi-Biennial Oszillation (QBO)<sup>1</sup> und des etwa 11-jährigen Solarzyklusses<sup>2</sup>. Labitzke und van Loon [1988] zeigten, daß sich im solaren Minimum und QBO Westphase (definiert am 50 hPa Wind über Singapur) regelmäßig stabile Polarwirbel bilden. Demgegenüber kommt es bei QBO Ostphase im solaren Minimum bis auf wenige Ausnahmen zu mittwinterlichen großen Stratosphären-

- 
1. siehe Naujokat und Marquardt [1992] für eine zusammenfassende Darstellung der QBO
  2. siehe Labitzke und van Loon [1992] für eine zusammenfassende Darstellung des Einflusses des Solarzyklusses auf die Stratosphäre



**Abbildung 6.2:** Fläche des Polarwirbels in der 475 K Isentrope während Januar bis März 1992.

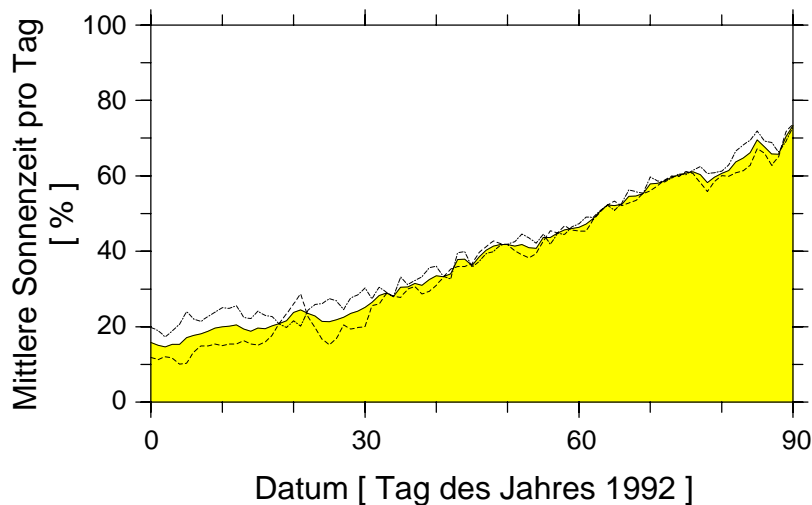
wärmungen. Im solaren Maximum dreht sich diese Korrelation um und die mittwinterlichen Stratosphärenenerwärmungen sind in der Regel bei QBO Westphase beobachtet worden. Die Korrelation bestätigte sich auch in den auf Labitzke und van Loon, 1988] folgenden Jahren [Labitzke und van Loon, 1992; Labitzke und van Loon, 1993; Naujokat et al., 1995].

Durch ein zufälliges Zusammentreffen kam es in dem Zeitraum 1991/92 bis 1995/96 nur zu Konstellationen, in denen das Auftreten von großen mittwinterlichen Stratosphärenenerwärmungen nach dieser Statistik unwahrscheinlich ist, und tatsächlich wurde in keinem Winter seit 1991/92 eine solche beobachtet - also auch in keinem der hier untersuchten Winter.

## 6.6 Die Polarwirbel der drei untersuchten Winter

### 6.6.1 Winter 1991/92

1991 bildete sich bereits im Frühwinter ein starker, kalter Polarwirbel aus. Ein Wärmeverstoß Mitte Dezember in der oberen Stratosphäre machte sich in der Zirkulation der hier betrachteten unteren Stratosphäre kaum bemerkbar, so daß bei weiterer Abkühlung ab der letzten Dezemberwoche die PSC-Temperaturen unterschritten wurden. In der ersten Januarhälfte begann mit einer starken Erhöhung der Amplitude der planetarischen Welle 1 eine kräftige Stratosphärenenerwärmung, die ihren Höhepunkt Mitte Januar erreichte, jedoch nicht zu einem Zusammenbruch des Polarwirbels führte. Es wurden sogar im Zuge der Hebungs Vorgänge bei der Erwärmung kurz vor Mitte Januar die kältesten Temperaturen im Polarwirbel erreicht. Danach stiegen die Temperaturen im Wirbel zügig an und ab der zweiten Januarhälfte waren kaum noch Existenzbedingungen für PSCs gegeben [Naujokat et al., 1992]. Abbildung 6.2 zeigt, daß der Polarwirbel im Zuge der Erwärmung Mitte Januar deutlich an Masse verloren hat, danach jedoch mit nahezu unveränderter Fläche bis Mitte März weiterbestand. Da die Erwärmung im Januar nicht zu einem Zusammenbruch des Polarwirbels führte, wird sie nicht als große mittwinterliche Stratosphärenenerwärmung klassifiziert. Sie war dennoch ein ausgeprägtes 'minor warming' [Naujokat et al., 1992].



**Abbildung 6.5:** Ausgefüllte Fläche: Über den Polarwirbel gemittelte Tageslänge in Prozent von 24 Stunden während Januar bis März 1992. Gestrichelte Linie: Die gleiche Größe für die inneren 50 Flächen-% des Wirbels. Strichpunktierte Linie: Desgleichen für die äußeren 50 Flächenprozent.

Abbildung 6.3 zeigt  $A_{\text{NAT}}$  für den Winter 1991/92 im Höhen-/Zeitschnitt. Die PSC-Periode dauerte von Ende Dezember bis in die zweite Januarhälfte. Die Bereiche mit möglicher PSC Bildung erreichten dabei eine vertikale Ausdehnung von etwa 400 K bis 530 K mit einem ausgeprägten Maximum um 475 K. Aufgrund der baroklinen Lage während der Erwärmung waren die Flächen mit PSC-Bedingungen während des gesamten Januars vom Kern des Wirbels verschoben. Sie erstreckten sich meist in einem Sektor des Wirbels von der Wirbelaußenkante bis zum Wirbelkern. Dieser Bereich lag dabei relativ konstant über einer blockierenden troposphärischen Antizyklone über dem Nordatlantik. Abbildung 6.4a zeigt den Wirbel und den Bereich mit PSC-Bedingungen beispielhaft an einem Tag dieser Phase. Aufgrund der zyklonalen Strömung im Wirbel durchströmen in einer solchen Situation innerhalb einiger Tage große Teile der Luftmasse innerhalb des Polarwirbels die Bereiche mit PSC-Bedingungen. Newman et al. [1993] haben mit Trajektorienrechnungen gezeigt, daß auf der 460 K Isentrope bis zum 15. Januar über 90% der Luftmasse innerhalb des Polarwirbels durch Bereiche mit PSCs geströmt sind. Newman et al. [1993] benutzen 25 PVU in 460 K als Außenkante des Wirbels; das entspricht ca. 30 nPV. Für die spätere Interpretation des Ozonabbaus ist zu beachten, daß auch das letzte Auftreten von PSC-Bedingungen an der äußeren Wirbelkante stattfand (Abbildung 6.4b).

Der zeitliche Verlauf von  $S_{\text{WIRBEL}}$  in 475 K ist in Abbildung 6.5 als ausgefüllte Fläche dargestellt. Zusätzlich sind  $S_{\text{KERN}}$  (gestrichelt) und  $S_{\text{RAND}}$  (strichpunktiert) in die Abbildung eingetragen.  $S_{\text{WIRBEL}}$  nimmt von etwa 15% Anfang Januar auf etwa 60-70% Ende März zu. Die bereits vor Äquinox auf über 50% angestiegenen Werte kommen dadurch zustande, daß in 475 K (ca. 20 km Höhe) die Sonne bereits bei einem szw von etwa  $95^\circ$  sichtbar wird. Größere Abweichungen von der gleichmäßigen mittleren Zunahme kommen durch Verschiebungen des Wirbels vom Pol oder starke Verformungen des Wirbels zustande. So zeichnet sich die Verschiebung während der Erwärmung um den 20. Januar hier als eine positive Abweichung von  $S_{\text{WIRBEL}}$  vom mittleren Verlauf ab.  $S_{\text{RAND}}$  ist Anfang Januar etwa 1,5 bis 2 mal größer als  $S_{\text{KERN}}$ . Dieser Unterschied geht im Laufe von Februar/März langsam zurück. Zu beachten ist,



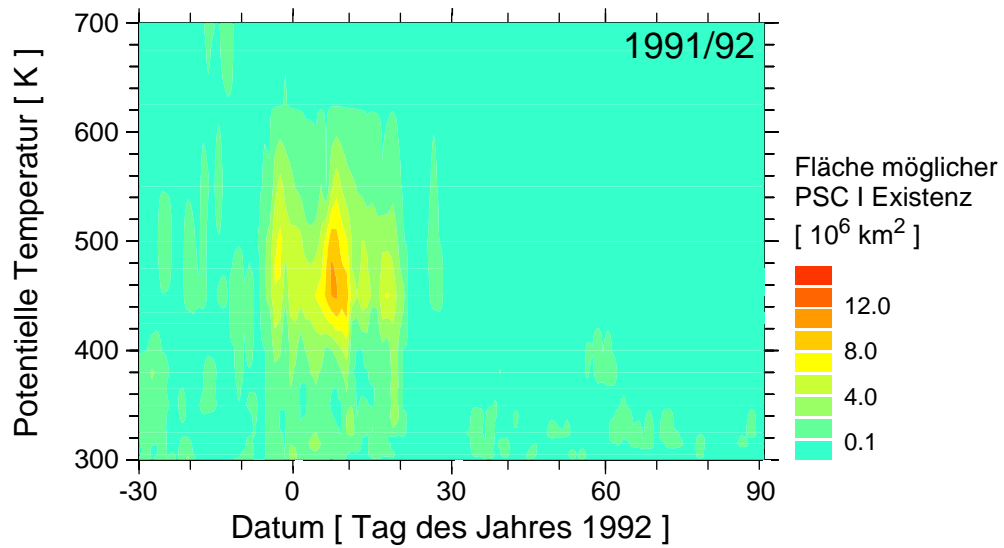


Abbildung 6.3: Höhen-/Zeitschnitt von  $A_{\text{NAT}}$  während Dezember 1991 bis März 1992.

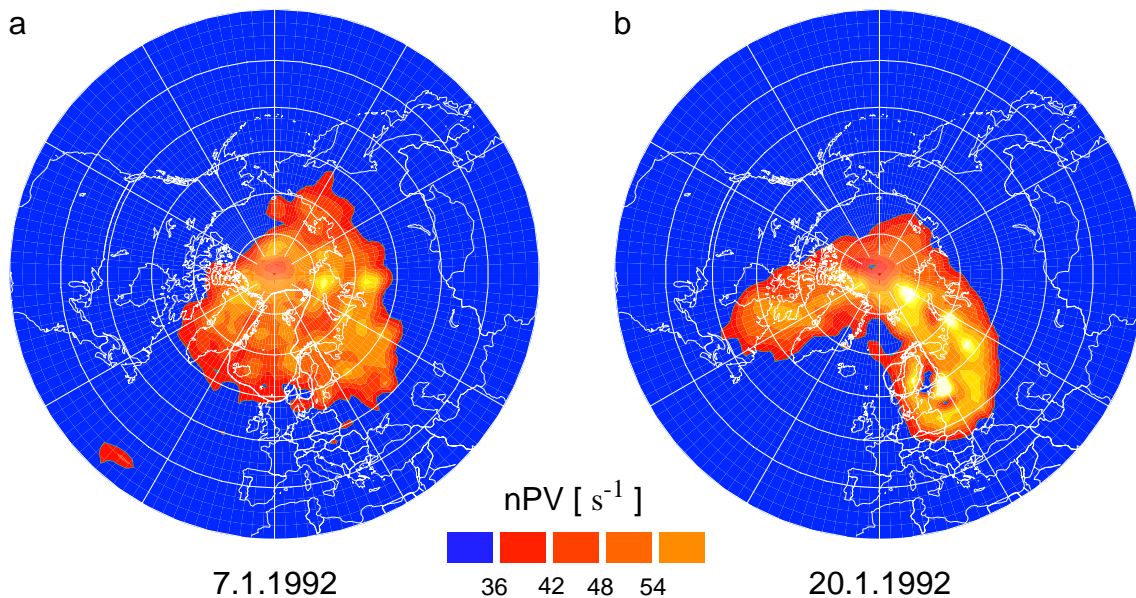
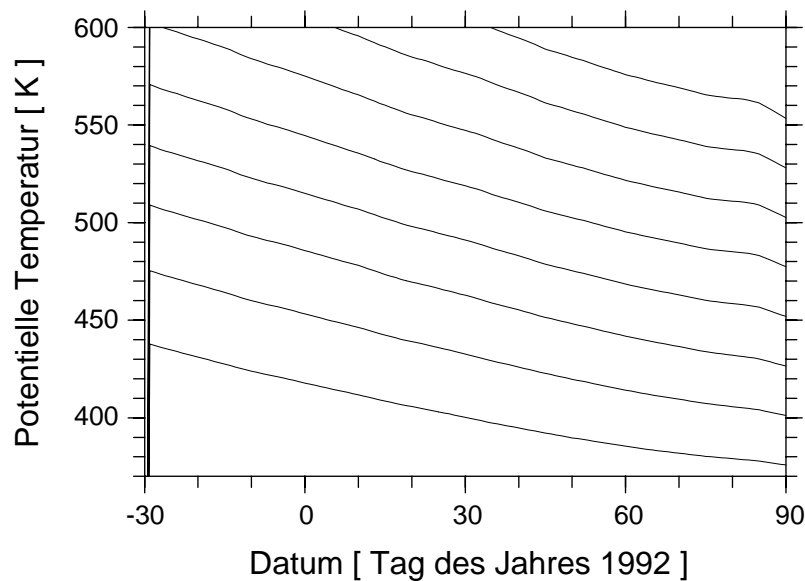


Abbildung 6.4: Karten von nPV auf der 475 K Isentropenfläche an zwei Tagen während 1992. Die Karten zeigen den Ausschnitt nördlich von  $30^\circ\text{N}$ , der Greenwich Meridian zeigt nach unten. Der Bereich innerhalb des Polarwirbels ist orange dargestellt. Die Bereiche mit möglicher PSC Existenz sind mit einer dickeren weißen Linie umrandet.



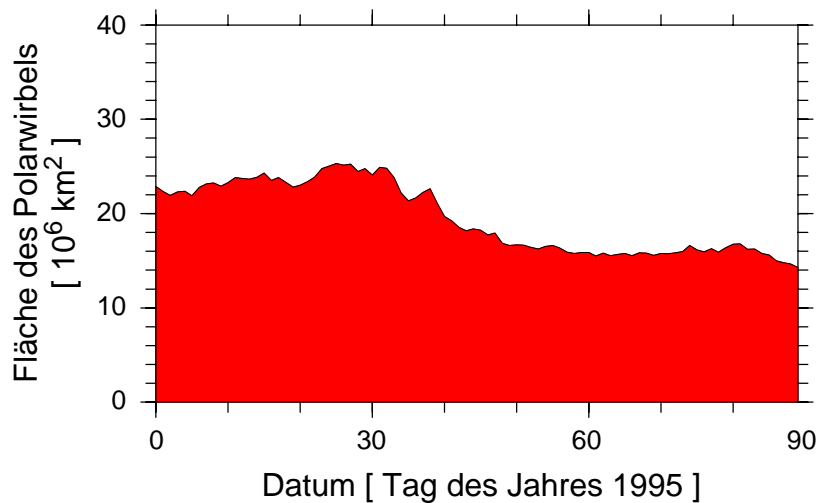
**Abbildung 6.6:** Über den Polarwirbel gemittelte diabatische Abstiegsbewegung der Luftmassen während Dezember 1991 bis März 1992.

daß sich dieses Verhältnis während stark gestörter Lagen auch umdrehen kann. So ist während einer sehr kurzen Periode um den 20. Januar die mittlere Tageslänge im Wirbelkern länger als im Wirbelrand.

Abbildung 6.6 zeigt das mittlere diabatische Absinken einiger Luftschichten im Wirbel.

### 6.6.2 Winter 1994/95

Der Polarwirbel entwickelte sich bereits im Herbst 1994 stärker und kälter als normal. Eine schwache Kanadische Erwärmung um den Monatswechsel November/Dezember änderte daran wenig. In dem weiterhin außergewöhnlich kalten und starken Wirbel wurden die PSC Temperaturen in der ersten Dezemberhälfte unterschritten. In der hier betrachteten unteren Stratosphäre folgte eine sehr kalte ungestörte mittwinterliche Phase bis in die zweite Januarhälfte. Eine Störung in der oberen Stratosphäre um den Jahreswechsel setzte sich nicht nach unten durch. Während einiger Tage dieser Periode traten die jeweils an diesem Datum tiefsten Minimumtemperaturen in der 30-jährigen Berliner Reihe auf. Ein zweiter Erwärmungsimpuls begann Mitte Januar mit einer Erhöhung der Amplitude der planetarischen Welle 1. Diese Erwärmung setzte sich bis Ende Januar in die untere Stratosphäre durch und führte zum vorläufigen Ende der PSC-Periode in der ersten Februarwoche und einer Schwächung des Wirbels verbunden mit einem deutlichen Substanzverlust Anfang Februar (Abbildung 6.7). Während der Erwärmungsphase wurde der Wirbel ungewöhnlich weit nach Sibirien abgedrängt. Der Wirbel stabilisierte sich jedoch im weiteren Verlauf wieder und begann erneut abzukühlen, so daß in der ersten Märzhälfte erneut PSC Temperaturen unterschritten wurden. Diese Phase wurde jedoch bald von der endgültigen Erwärmung beendet, die Anfang März in der oberen Stratosphäre begann und sich gegen Mitte März bis in die untere Stratosphäre durchsetzte. Die Auflösung des Polarwirbels und Umstellung auf Sommerzirkulation vollzog sich langsam während des Aprils [Naujokat et al., 1995; Naujokat und Pawson, 1996].



**Abbildung 6.7:** Fläche des Polarwirbels in der 475 K Isentrope während Januar bis März 1995.

Der Höhen-/Zeitschnitt der Bereiche mit PSC-Bedingungen während dieses ungewöhnlich kalten Winters wird in Abbildung 6.8 gezeigt. Die PSC-Periode setzte in 410-500 K in der ersten Dezemberwoche ein. Im Laufe des Dezembers wuchs die vertikale Ausdehnung der PSC-Bedingungen nach oben an und reichte kurz vor der Jahreswende bis über 600 K. Nur durch die Erwärmung um die Jahreswende im oberen Bereich kurzzeitig unterbrochen, dauerte diese Situation bis Mitte Januar an. Die Flächen mit PSC-Bedingungen gingen dann im oberen Bereich beginnend zurück und die erste PSC-Periode endete in 410 K in der ersten Februarwoche. In dieser ersten Phase waren die Flächen mit PSC-Bedingungen sehr groß und meistens deutlich vom Wirbelkern verschoben. Abbildung 6.9a zeigt ein typisches Beispiel. Die bereits erwähnte zweite PSC-Phase des Winters begann Anfang März und blieb auf den Bereich von ca. 400 K bis 480 K beschränkt. Die während dieser Phase aufgetretenen Flächen mit PSC-Bedingungen waren jedoch im Vergleich zu der ersten Phase viel kleiner. Im Gegensatz zu der früheren PSC-Phase waren die Bereiche mit PSC-Bedingungen im März nahezu konzentrisch um den Wirbelkern angeordnet (Abbildung 6.9b, 7.3.).

Abbildung 6.10a zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren Sonnenscheindauer pro Tag im 1995er Polarwirbel. Auffällig ist die sehr starke positive Abweichung dieser Größe vom mittleren Verlauf zwischen dem 20. Januar und dem 10. Februar. So war die mittlere Tageslänge im Wirbel bereits um den 22. Januar so lang wie am 20. Februar. Abbildung 6.10b und c zeigen die mittlere Lage des Wirbels während der ungestörten Situation vom 1. bis 10. Januar (b) und während der gestörten Lage vom 22. bis 25. Januar (c). Der Vergleich dieser Teilbilder verdeutlicht das Zustandekommen der starken Anomalie der mittleren Tageslänge durch die Verschiebung des Wirbels vom Pol und seine längliche Verformung. Die in Abbildung 6.10a eingezeichneten mittleren Tageslängen im Wirbelkern und im Wirbelrand unterscheiden sich um den 20. Januar herum nicht. Um den 28. Januar herum weisen sie dann kurzzeitig das normale Verhältnis mit längeren Tageslängen im Wirbelrand auf, welches sich vom 2. Februar an für eine längere anormale Periode bis zum 12. Februar umkehrt. Im Mittel kann also davon ausgegangen werden, daß der Wirbelkern zwischen Ende Januar und Mitte Februar 1995 nicht weniger Sonnenlicht erhalten hat als der Wirbelrand.

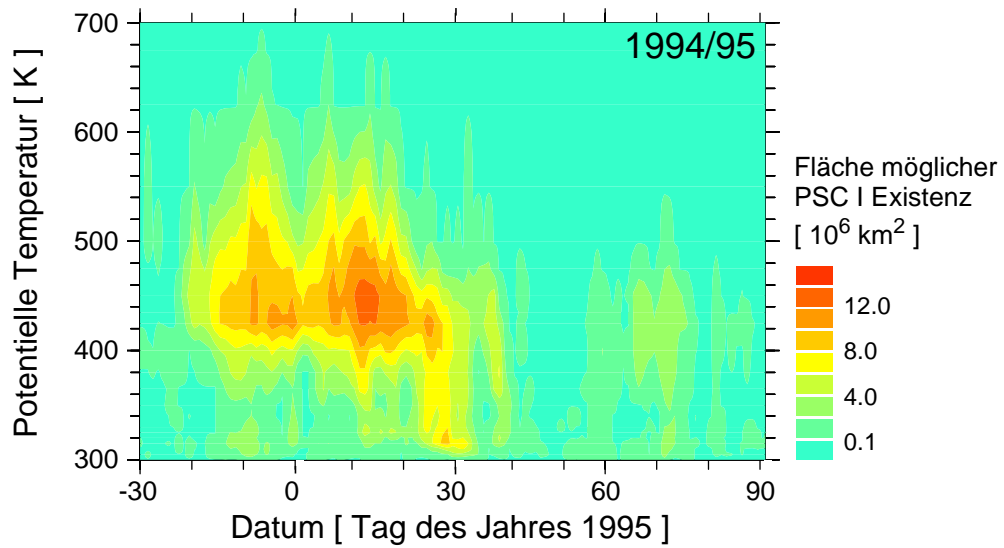


Abbildung 6.8: Höhen-/Zeitschnitt von  $A_{NAT}$  während Dezember 1994 bis März 1995.

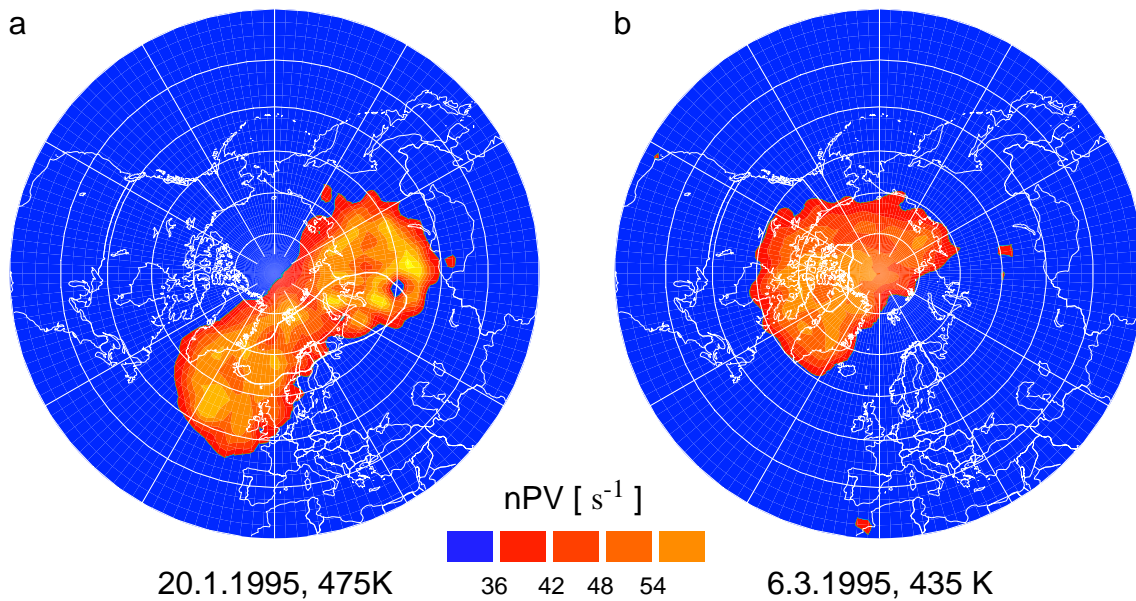
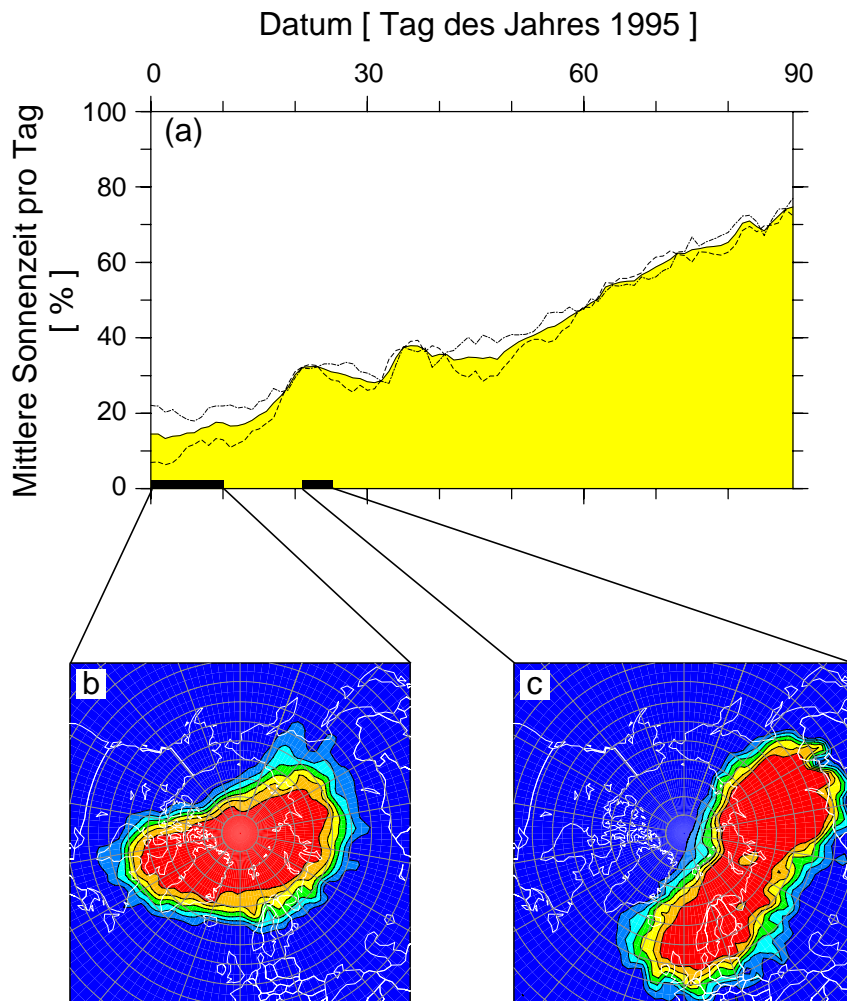


Abbildung 6.9: Karten von nPV auf der 475 K Isentropenfläche an zwei Tagen während 1995. Die Karten zeigen den Ausschnitt nördlich von  $30^{\circ}N$ , der Greenwich Meridian zeigt nach unten. Der Bereich innerhalb des Polarwirbels ist orange dargestellt. Die Bereiche mit möglicher PSC Existenz sind mit einer dickeren weißen Linie umrandet.

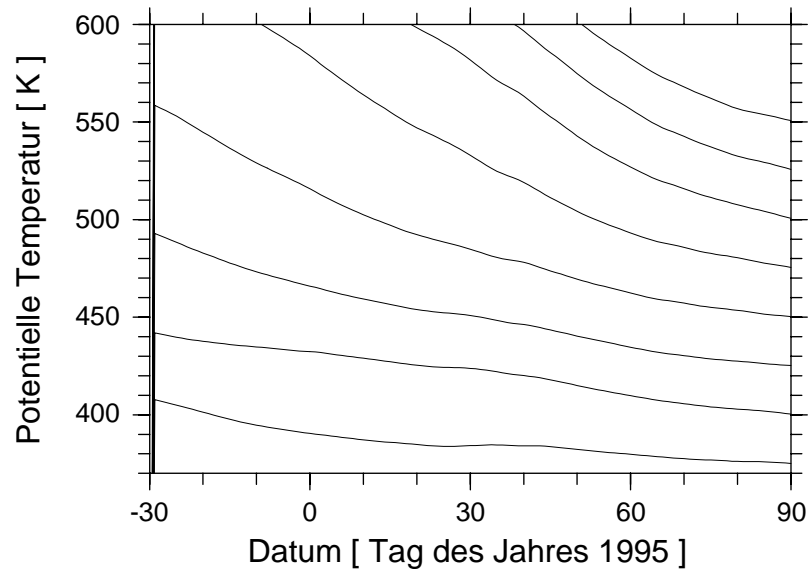


**Abbildung 6.10:** (a) ausgefüllte Fläche: Über den Polarwirbel gemittelte Tageslänge in Prozent von 24 Stunden während Januar bis März 1995. Gestrichelte Linie: Die gleiche Größe für die inneren 50 Flächen-% des Wirbels. Strichpunktierte Linie: Desgleichen für die äußeren 50 Flächenprozent. (b) über den ersten der in (a) durch schwarze Balken angedeuteten Zeiträume gemittelte Lage des Polarwirbels. Der Wirbelrandbereich ist in Hellgrau dargestellt. (c) wie (b) aber für den zweiten in (a) angedeuteten Zeitraum.

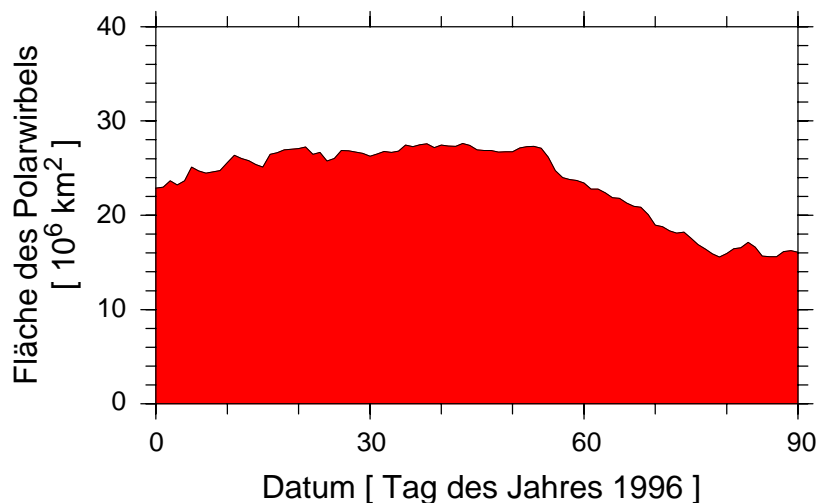
Das mittlere diabatische Absinken im Wirbel 1994/95 ist in Abbildung 6.11 dargestellt.

### 6.6.3 Winter 1995/96

Auch 1995/96 entwickelte sich der Polarwirbel bereits im Herbst stärker und kälter als normal. Der Wirbel blieb dabei während des gesamten Winters bis zum März nahezu ungestört, wenn man von zwei schwachen Stratosphärenenerwärmungen im Februar mit nur geringem Einfluß absieht. Dies ermöglichte eine fortgesetzte Abkühlung des Wirbels während des Dezembers und der ersten Januarhälfte, die um Mitte Januar extrem kalte Temperaturen verursachte. Dabei wurden über längere Zeiträume die jeweils kältesten Minimumtemperaturen der 30-jährigen Berliner Reihe gemessen. Nach einer kürzeren leichten Temperaturerhöhung im Wirbel um Ende Januar wurden Mitte Februar wiederum kurz Rekordkälten gemessen. Während des gesamten Zeitraums bis Ende Februar wuchs dabei die Fläche des Wirbels weiter an, was Ende Februar



**Abbildung 6.11:** Über den Polarwirbel gemittelte diabatische Abstiegsbewegung der Luftmassen während Dezember 1994 bis März 1995.



**Abbildung 6.12:** Fläche des Polarwirbels in der 475 K Isentrope während Januar bis März 1996.

zu einem extrem großen Polarwirbel führte (Abbildung 6.12). Anfang März setzte die Frühjahrsumstellung mit einer Stratosphärenenerwärmung ein, die jedoch durch die damit verbundenen Hebungsvorgänge bei anwachsender Baroklinität im Polarwirbel zunächst noch einmal extrem kalte Temperaturen in der ersten Märzwoche verursachte. Danach stiegen die Temperaturen im Wirbel schnell an. Die Auflösung des Wirbels vollzog sich jedoch erst im April [Geb und Naujokat, 1995; Geb und Naujokat, 1996a; Geb und Naujokat, 1996b; Geb und Naujokat, 1996c] und [Kuhlbarsch und Naujokat, 1996].

Abbildung 6.13 zeigt analog zu den Vorjahren die Bereiche mit PSC-Bedingungen. Auf den ersten Blick fällt auf, daß in diesem Jahr von den hier untersuchten Wintern die ausgeprägteste PSC-Aktivität stattfand. Auch im langjährigen Vergleich rangiert der 1995/96 Winter unter den Wintern mit den ausgeprägtesten PSC-Bedingungen [Naujokat und Pawson, 1996]. Die PSC-Periode begann Mitte Dezember ungewöhnlich hoch in 520 K. Die PSC-Bedingungen setzten sich im Verlauf des Dezembers nach unten durch. Zur Jahreswende war der gesamte Bereich zwischen etwa 420 K und 600 K mit großen Flächen möglicher PSC Existenz erfüllt. Diese Situation hielt nahezu unverändert bis Ende Januar an. Das Maximum der Fläche mit PSC-Bedingungen wurde dabei in der ersten Januarhälfte um 520 K erreicht. Nach nur kurzer Unterbrechung zum Monatswechsel setzte sich die PSC-Periode mit leicht reduzierter vertikaler Mächtigkeit zwischen 400 K und 550 K fort. Die Flächen mit möglichen PSC-Bedingungen waren dabei im Januar und Februar in den meisten Höhenbereichen so groß, daß sie schon bei leichter Verschiebung vom Wirbelkern bis zum Wirbelrand reichten. Abbildung 6.14a zeigt eine typische Situation dieser Periode. Es kann also davon ausgegangen werden, daß es im Wirbel kaum Luftmassen gab, die nicht zumindest periodisch PSC-Bedingungen ausgesetzt waren. Ende Februar reduzierte sich die Fläche mit möglicher PSC-Existenz drastisch. Kleinere Bereiche bestanden bis in die erste Märzwoche fort. Das letzte Auftreten von PSC-Bedingungen lag eindeutig im Wirbelrandbereich (siehe Abbildung 6.14b). Ab dem 11. März blieben die EZMW Temperaturen überall mindestens 4 K über der NAT Kondensationstemperatur. Ab diesem Zeitpunkt ist auch eine lokale PSC-Bildung durch lokale Temperaturfluktuationen sehr unwahrscheinlich und wäre höchstens sehr lokal im Bereich starker Leewellenaktivität noch denkbar.

Im Zuge dieses extrem kalten Winters traten auch signifikante Flächen mit PSC II Bedingungen auf. Ein Höhen-/Zeitschnitt dieser Bereiche ist in Abbildung 6.15 gegeben. Zu beachten ist die gegenüber Abbildung 6.13 geänderte Farbskala. Die längste Periode mit möglicher PSC II Bildung trat ca. vom 8.1. bis zum 27.1. in 500 K - 510 K auf.

Wie für diesen ungewöhnlich ungestörten Winter nicht anders zu erwarten, weicht die mittlere Sonnenscheindauer pro Tag im Wirbel kaum vom mittleren zeitlichen Verlauf ab (Abbildung 6.16). Dabei erhält der Wirbelrand zu allen Zeiten deutlich mehr Sonne, als der Wirbelkern.

Abbildung 6.17 zeigt das mittlere diabatische Absinken der Luftmassen im Wirbel 1995/96.

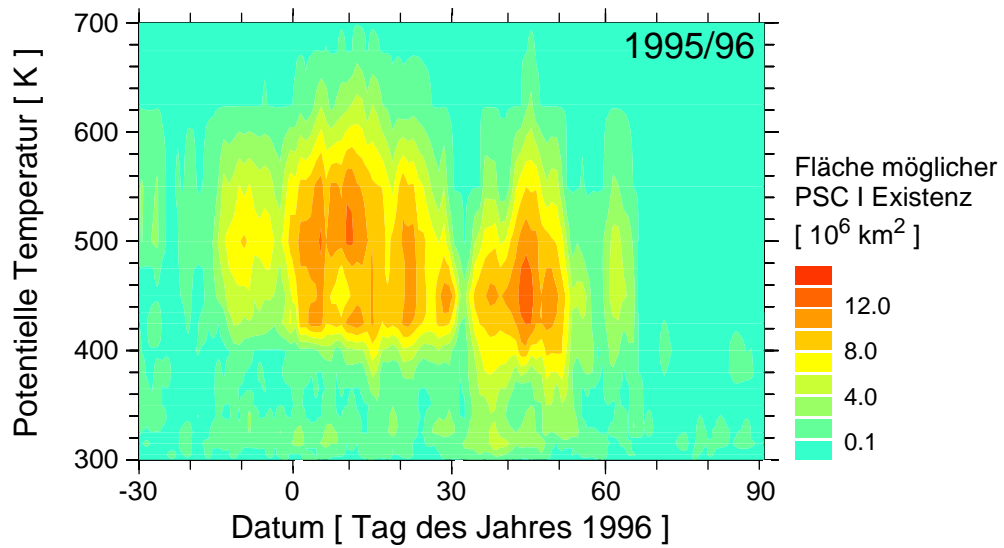


Abbildung 6.13: Höhen-/Zeitschnitt von  $A_{\text{NAT}}$  während Dezember 1995 bis März 1996.

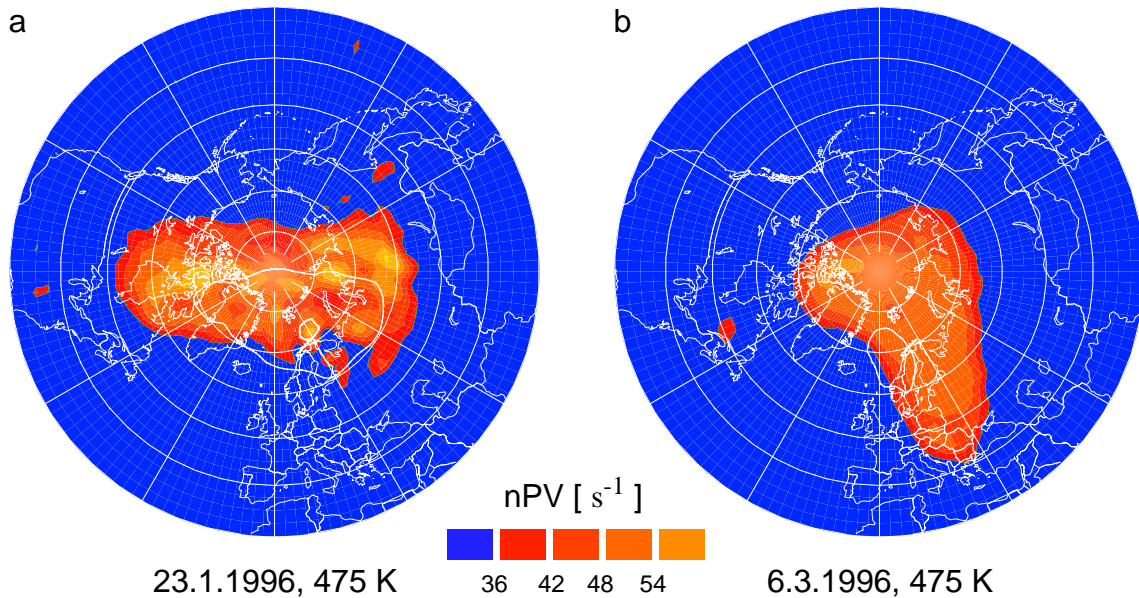
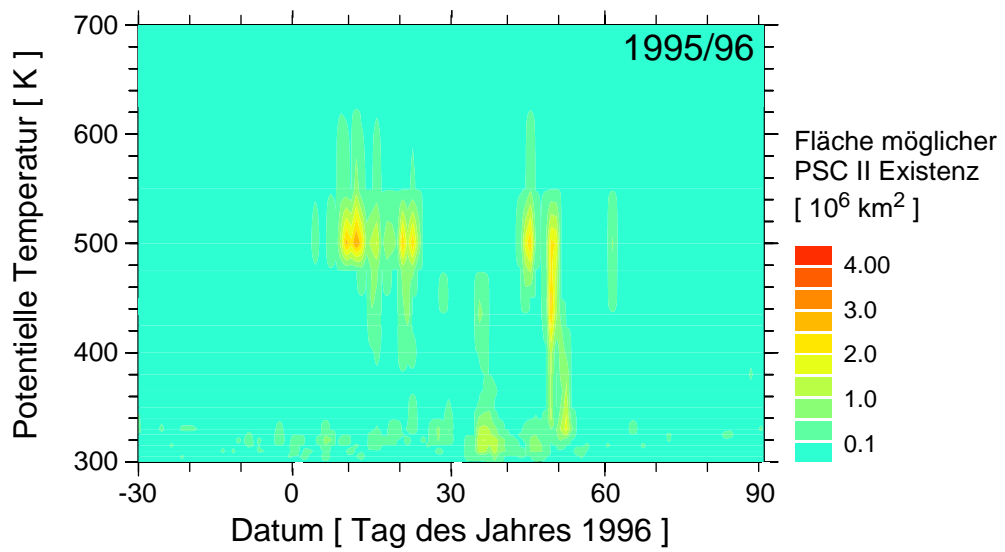
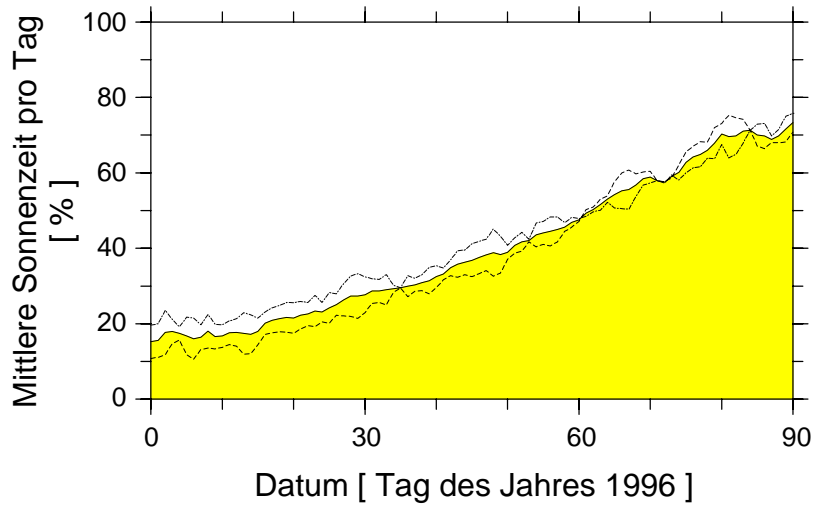


Abbildung 6.14: Karten von nPV auf der 475 K Isentropenfläche an zwei Tagen während 1996. Die Karten zeigen den Ausschnitt nördlich von  $30^\circ\text{N}$ , der Greenwich Meridian zeigt nach unten. Der Bereich innerhalb des Polarwirbels ist orange dargestellt. Die Bereiche mit möglicher PSC-Existenz sind mit einer weißen Linie umrandet. Die Bereiche mit möglicher PSC II Bildung sind mit einer dickeren weißen Linie angedeutet.

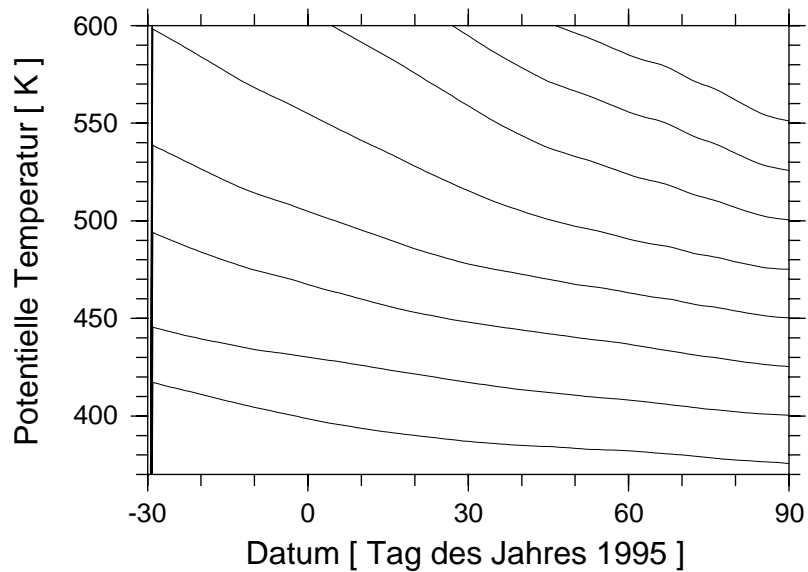




**Abbildung 6.15:** Höhen-/Zeitschnitt von  $A_{EIS}$  während Dezember 1995 bis März 1996.



**Abbildung 6.16:** Ausgefüllte Fläche: Über den Polarwirbel gemittelte Tageslänge in Prozent von 24 Stunden während Januar bis März 1992. Gestrichelte Linie: Die gleiche Größe für die inneren 50 Flächen-% des Wirbels. Strichpunktierte Linie: Desgleichen für die äußeren 50 Flächenprozent.



**Abbildung 6.17:** Über den Polarwirbel gemittelte diabatische Abstiegsbewegung der Luftmassen während Dezember 1994 bis März 1995.