

Kapitel 5

Stratosphärische Meteorologie im Beobachtungszeitraum

Im Rahmen dieser Arbeit werden Lidar-Messungen von PSCs analysiert, die in den arktischen Wintern 1996/1997 bis 1999/2000 erfolgten. In diesem Kapitel wird daher die synoptische Situation der polaren Stratosphäre während der einzelnen Winter beschrieben. Hierbei zeigt sich die große Variabilität der nordhemisphärischen Dynamik, die in sehr unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen zur Bildung polarer Stratosphärenwolken während der einzelnen Winter resultiert. Die folgenden Ausführungen zu den meteorologischen Beobachtungen beruhen auf Analysedaten der Stratosphärengruppe des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

5.1 Winter 1996/1997

Der stratosphärische Winter, dessen Ende durch den Zusammenbruch der polaren Wirbels (*Final Warming*, Kap.2.5) gekennzeichnet ist, reichte im Winter 1996/1997 bis weit in den April/Anfang Mai hinein – und dauerte damit deutlich länger als gewöhnlich. Insgesamt handelte es sich, wie auch bei den beiden vorangegangenen Winter, um einen kalten stratosphärischen Winter (*Pawson und Naujokat, 1999*).

Der frühe Winter war dabei eher mild, da der Wirbel von einem *Canadian Warming* (Kap.2.5) gestört wurde, gekennzeichnet durch geringe Windgeschwindigkeiten und hohe Temperaturen in der Polarregion. Anschließend hat sich der Polarwirbel Ende Dezember stabilisiert, wobei die strahlungsbedingte Abkühlung erst im Januar zu beobachten war, dann allerdings deutlich durch den März hinweg anhielt. Während dieses Zeitraums traten kaum bzw. nur sehr schwache dynamische Störungen auf, es wurden keine weiteren Stratosphärenerwärmungen beobachtet. Unter diesen Bedingungen eines stabilen Polarwirbels konnten sich entsprechende Kaltluftgebiete entwickeln, deren Temperaturen

auch die Existenztemperatur für PSCs T_{NAT} unterschritten. Die nordhemisphärische Minimumtemperatur T_{min} lag in einer Höhe von 30 hPa (~ 23 km) von Anfang Januar bis Anfang März und in einer Höhe von 50 hPa (~ 18 km) sogar von Anfang Januar bis Anfang April unterhalb von T_{NAT} . Die Ausdehnung der Fläche A_{τ} , in der mit $T < T_{NAT}$ die Existenz von PSCs möglich ist, war zunächst geringer, jedoch ab Anfang/Mitte März mit einer Flächenausdehnung von 3% der Nordhemisphäre deutlich größer als das langjährige Mittel, was auf den stabilen Wirbel zurückzuführen ist. Ende April/Anfang Mai erfolgte die Umstellung zur Sommerzirkulation, eingeleitet durch die Verlangsamung des Polarnachtjets von hohen zu niedrigen Windgeschwindigkeiten.

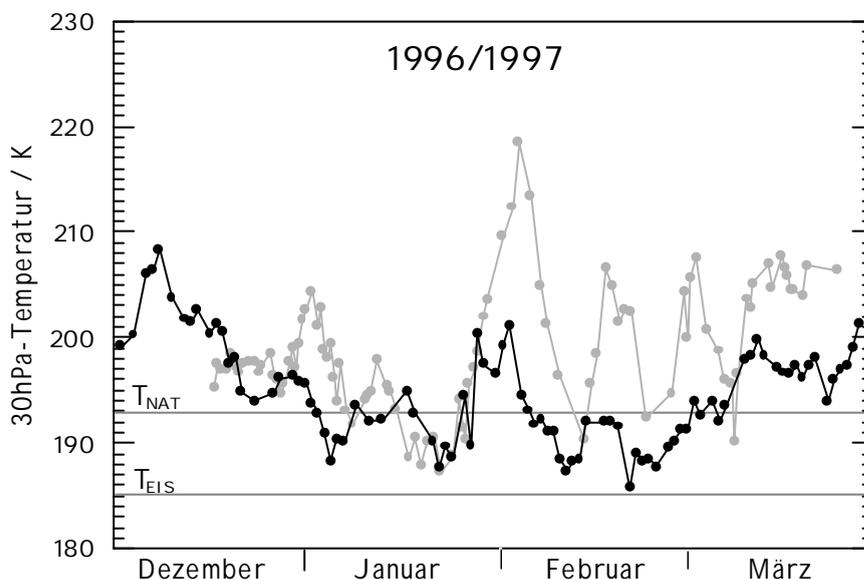


Abb.5.1: Temperaturen in einer Höhe von 30 hPa, ermittelt aus den täglichen Radiosondenaufstiegen in Sodankylä [grau] und Ny-Ålesund [schwarz] vom 1.Dez. 1996 bis zum 31.März 1997, dazu die NAT-Existenztemperatur T_{NAT} und der Eisgefrierpunkt T_{Eis} [dunkelgrau].

In Abb.5.1 sind die 30 hPa –Temperaturen der Radiosondenmessungen aus Sodankylä und Ny-Ålesund während des Winters 1996/1997 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die PSC-Existenztemperatur T_{NAT} an beiden Stationen während mehrerer Perioden unterschritten wurde. Die 30 hPa -Temperatur aus Sodankylä weist verschiedene Maxima auf, die darauf schließen lassen, dass die Station zu diesen Zeiten nicht im Kältegebiet des Wirbels lag.

Diese Annahme wird durch Abb.5.2 bestätigt. Hier sind die Werte der potentiellen Vorticity auf zwei isentropen Flächen, 475 K und 550 K, für beide Stationen dargestellt. Zusätzlich ist für jede isentrope Fläche ein Schwellwert eingezeichnet, der als Orientierung dafür dient, ob sich die Station innerhalb, im Randgebiet oder außerhalb des

polaren Wirbels befindet (Schulz, 2000; vgl. Kap.2.2.3). Die Werte der potentiellen Vorticity entstammen dem T106-Modell des *European Centre for Mediumrange Weatherforecast* (ECMWF).

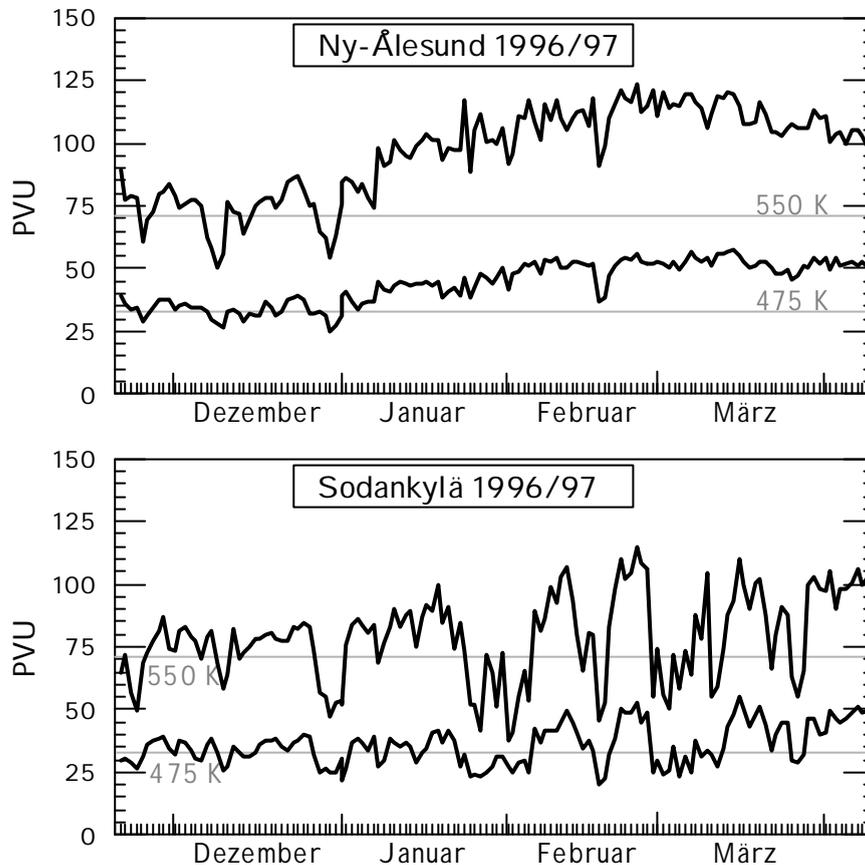


Abb.5.2: Potentielle Vorticity auf der 475K bzw. 550K -Fläche in Ny-Ålesund [oben] und Sodankylä [unten] vom 20.Nov.1996 bis zum 10.April 1997. Die grauen Linien markieren den Rand des polaren Wirbels. Die PV-Werte stammen aus dem ECMWF-T106-Modell.

Aus dem oberen Teil der Abb.5.2 ist zu entnehmen, dass sich die Station Ny-Ålesund ab Anfang Januar durchweg innerhalb des Polarwirbels befindet, gekennzeichnet durch ausnahmslos hohe PV-Werte oberhalb des angegebenen Schwellwertes auf beiden isentropen Flächen. Im Gegensatz dazu variieren die Werte der potentiellen Vorticity über der Station Sodankylä sehr stark, sie schwanken im Bereich des Schwellwertes und liegen im Wechsel für mehrere Tage darüber oder darunter. So sind beispielsweise die hohen Temperaturen von mehr als 210 K Anfang Februar einer Luftmasse zuzuordnen, die außerhalb des Polarwirbels liegt. Dieser Unterschied der Stationen in ihrer Lage relativ zum polaren Wirbel ist geographisch bedingt und zeigt sich in nahezu allen Wintern. Die Station Ny-Ålesund befindet sich meistens im Zentrum des Polarwirbels, während Sodankylä zumeist im Randgebiet liegt. Diese Konstellation bewirkt auch, dass an den

Stationen unterschiedliche Bedingungen für die Bildung polarer Stratosphärenwolken vorliegen. Der Unterschied ist von einiger Wichtigkeit und wird im Zusammenhang mit den PSC-Beobachtungen in den Kapiteln 7 bis 10 aufgegriffen werden.

5.2 Winter 1997/1998

Der milde stratosphärische Winter 1997/1998 war dynamisch wesentlich aktiver als die vorangegangenen Winter, die dynamische Anregung aus der Troposphäre deutlich stärker. Während der Wintermonate fanden mehrere unterschiedlich stark ausgeprägte *Minor Midwinter Warmings* statt, die zur Erwärmung des Polarwirbels führten. Die Erwärmung der stratosphärischen Polarregion resultierte so mehrmals in einem umgekehrten Temperaturgradienten zwischen den mittleren Breiten und dem Pol. Als Folge verlangsamte sich der mittlere zonale Wind während des gesamten Winters zu schwachem Westwind in den mittleren Breiten – eine Drehung auf Ostwind erfolgte jedoch nur in der oberen Stratosphäre.

Von den *Minor Warmings* reichte die kleine Erwärmung Ende Dezember / Anfang Januar am weitesten in die untere Stratosphäre, allerdings führte auch sie nicht zum Zusammenbruch des polaren Wirbels, so dass während des Winters kein *Major Midwinter Warming* auftrat. Im Laufe des Winters war der Wirbel häufig stark vom Pol verschoben, elongiert oder geteilt. Aufgrund der dynamischen Einflüsse waren auch die Temperaturen jeweils nur für kurze Perioden tief. Die ausgeprägteste Kälteperiode, bei der auch Temperaturen unter T_{NAT} auftraten, ereignete sich im Dezember. Im Januar waren nochmals für wenige Tage die Bedingungen zur PSC-Existenz gegeben. Die Kälteperioden mit $T < T_{NAT}$ waren insgesamt zeitlich und räumlich sehr begrenzt.

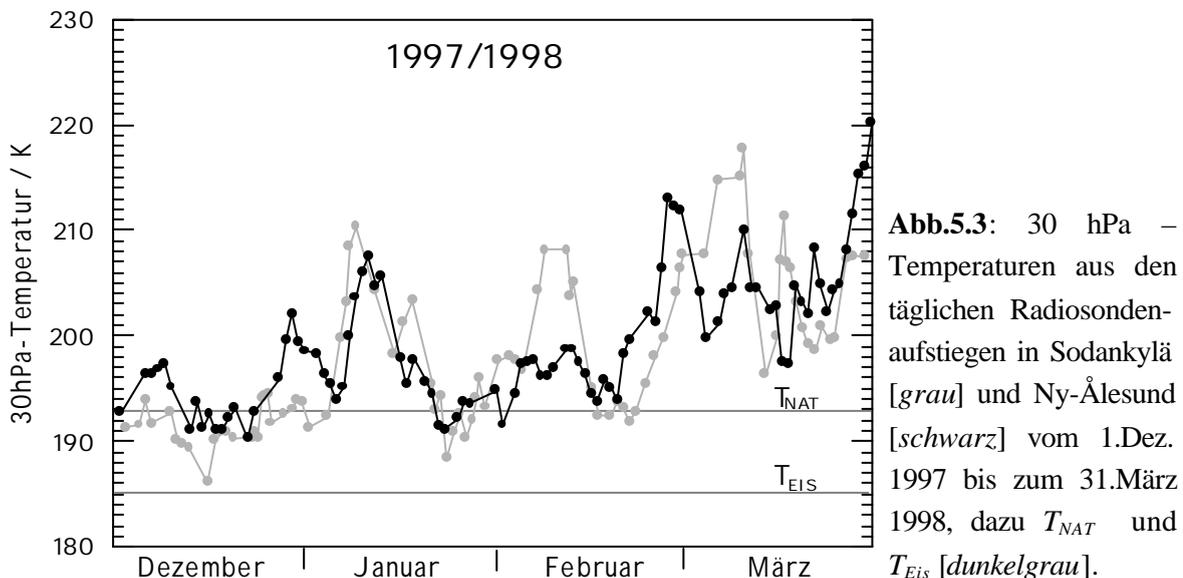


Abb.5.3: 30 hPa – Temperaturen aus den täglichen Radiosondaufstiegen in Sodankylä [grau] und Ny-Ålesund [schwarz] vom 1. Dez. 1997 bis zum 31. März 1998, dazu T_{NAT} und T_{Eis} [dunkelgrau].

Die Auflösung des polaren Wirbels im Frühjahr begann mit einer Umkehr des Temperaturgradienten zwischen den mittleren und den polaren Breiten gegen Ende März und erfolgte endgültig mit der Umkehr des zonal gemittelten Windes der mittleren Breiten am 10. April.

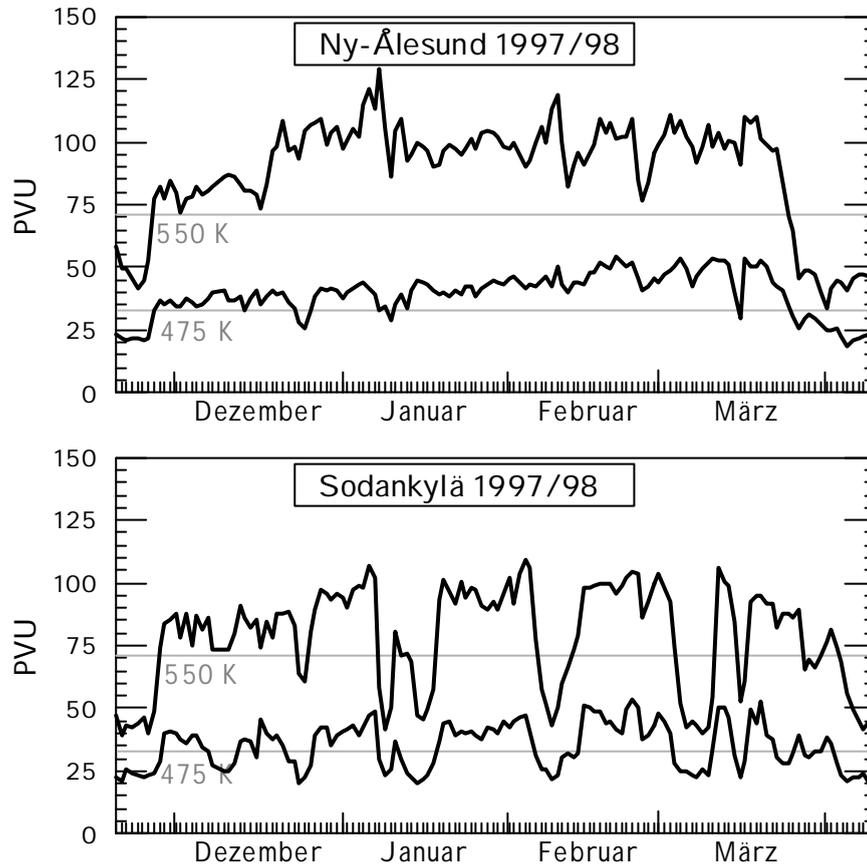


Abb.5.4: Potentielle Vorticity auf der 475K bzw. 550K -Fläche in Ny-Ålesund [oben] und Sodankylä [unten] vom 20.Nov.1997 bis zum 10.April 1998. Die grauen Linien markieren den Rand des polaren Wirbels. Die PV-Werte stammen aus dem ECMWF-T106-Modell.

Anhand der in Abb.5.3 gezeigten Radiosondentemperaturen der Stationen Sodankylä und Ny-Ålesund ist die geschilderte Temperaturentwicklung des Winters nachzuvollziehen. Abb.5.4 lässt wiederum erkennen, dass Ny-Ålesund eher im Zentrum des Wirbels liegt, während sich Sodankylä teils innerhalb und teils außerhalb des Polarwirbels befindet. Der Übergang von Wirbelluft und Luft mit geringer potentieller Vorticity ist dabei jeweils sehr abrupt, da der Wirbel in diesem Winter seine Form und seine Lage häufig veränderte. Anhand der Tatsache, dass auch die PV-Werte über Ny-Ålesund niedriger sind als beispielsweise im vorangegangenen Winter (s.Abb.5.2), ist die schwache Ausprägung des Polarwirbels in diesem Winter zu erkennen.

5.3 Winter 1998/1999

Bereits Mitte Dezember 1998 war die PSC-Saison beendet, als sich eine starke Stratosphärenenerwärmung aus der oberen Stratosphäre nach unten und polwärts ausbreitete. Die zweite Dezemberhälfte war dadurch gekennzeichnet, dass warme Luft die Polarregion bedeckte und die kalte Luftmasse weit in die mittleren Breiten verschoben war. In der oberen Stratosphäre bildete sich über dem Nordpol eine Antizyklone aus, während in der unteren Stratosphäre ein sogenanntes Wellenzahl-2-Muster entstand: eine Antizyklone über der Behring-See, eine weitere über dem Nordatlantik, der Rest des Polarwirbels über Zentralsibirien und ein zweiter, schwacher Wirbel über dem amerikanischen Kontinent. Ende Dezember hatte sich das Sibirische Wirbelzentrum abgeschwächt, während sich der Polarwirbel über Kanada / Grönland wieder entwickelte.

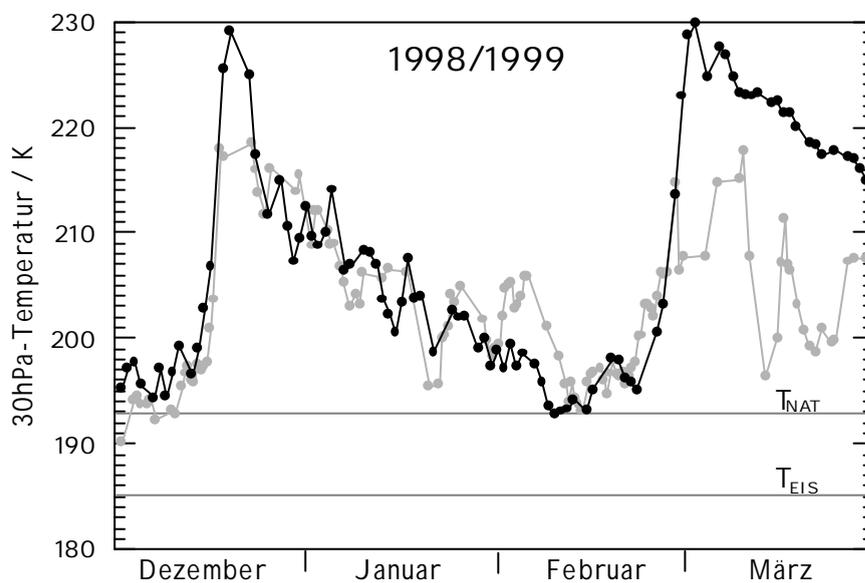


Abb.5.5: Temperaturen in einer Höhe von 30 hPa, ermittelt aus den täglichen Radiosondenaufstiegen in Sodankylä [grau] und Ny-Ålesund [schwarz] vom 1.Dez. 1998 bis zum 31.März 1999, dazu die NAT-Existenztemperatur T_{NAT} und der Eisgefrierpunkt T_{Eis} [dunkelgrau].

Die darauf folgende Abkühlung der polaren Stratosphäre wurde jedoch von einem zweiten *Major Midwinter Warming* unterbrochen. Mitte Februar 1999 drängte eine weitere Erwärmung aus der oberen Stratosphäre abwärts in Richtung des Pols, so dass gegen Ende Februar warme Luft über dem Pol lag, während der Rest der Kaltluft nach Nordeuropa verschoben war. Der Wirbel wurde elongiert und bewegte sich nach Zentralsibirien, während eine Antizyklone über Kanada nach Norden zog, Anfang März den Nordpol erreichte und zu einer Zirkulationsumkehr in den hohen Breiten führte. Obwohl die zweite große Stratosphärenenerwärmung recht spät auftrat, erholte sich der

Polarwirbel nochmals. Die endgültige Umstellung zur Sommerzirkulation, das *Final Warming*, zog sich durch den April und war erst Anfang Mai abgeschlossen.

Die zwei großen Stratosphärenenerwärmungen sind auch in den 30 hPa -Temperaturen der Radiosondenmessungen in Sodankylä und Ny-Ålesund eindeutig zu erkennen. Es fällt auf, dass die Erwärmung jeweils in Ny-Ålesund größer ist als in Sodankylä, was mit der geographischen Lage der beiden Stationen zu tun hat. Ny-Ålesund liegt auf dem 79. Breitengrad und damit sehr nah am Pol, während Sodankylä auf dem 67. Breitengrad deutlich weiter entfernt ist. Bei den Stratosphärenenerwärmungen schob sich nun jeweils die Warmluft über den Pol, also auch über Ny-Ålesund, während die Reste der kalten Luftmasse in Richtung Europa verdrängt wurden und damit die Temperatur über Sodankylä beeinflussten.

Den Zeitreihen der potentiellen Vorticity in Abb.5.6 ist zu entnehmen, dass der Polarwirbel im Winter 1998/1999 nur sehr schwach ausgebildet war.

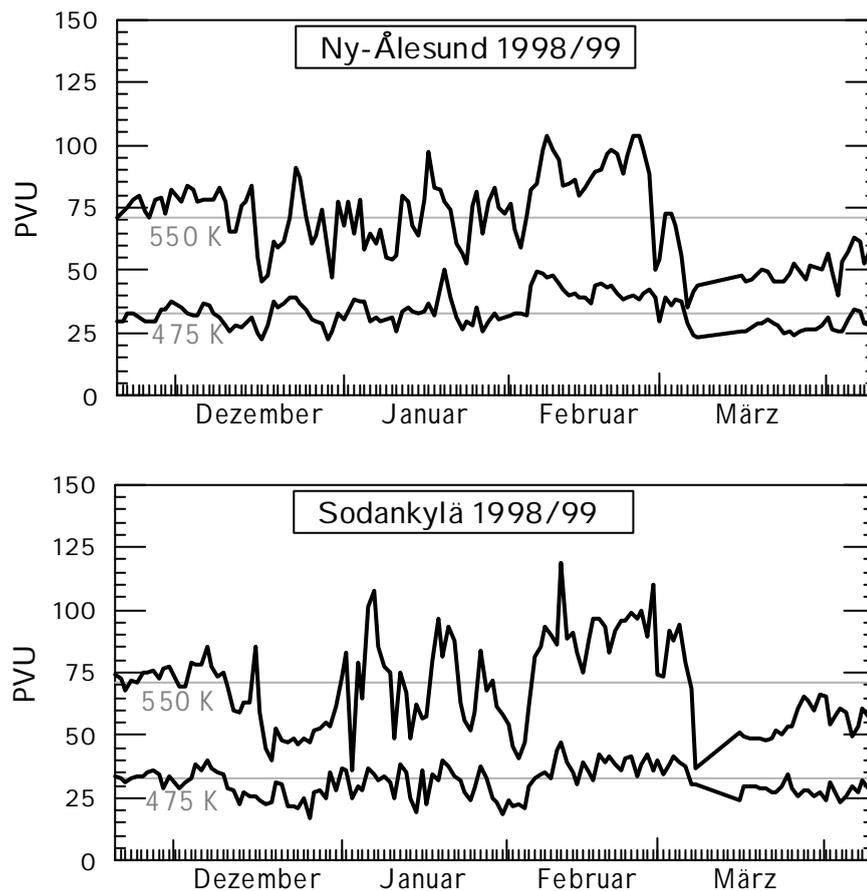


Abb.5.6: Potentielle Vorticity auf der 475K bzw. 550K -Fläche in Ny-Ålesund [oben] und Sodankylä [unten] vom 20.Nov.1998 bis zum 10.April 1999. Die grauen Linien markieren den Rand des polaren Wirbels. Die PV-Werte stammen aus dem ECMWF-T106-Modell.

Anfang Dezember war der Wirbel noch in der Entstehungsphase. Die Temperaturen waren schon niedrig, aber die Wirbelstärke war zu diesem Zeitpunkt noch kaum ausgeprägt. Nach der ersten Erwärmung sind die PV-Werte erst im Februar wieder etwas höher, so dass man von einem schwachen Wirbel sprechen kann. Mit der zweiten Erwärmung tritt schließlich wieder dynamische Unbeständigkeit ein.

5.4 Winter 1999/2000

Der Winter 1999/2000 gehörte zu den kältesten Wintern seit Beginn der Stratosphären-Analysen am Meteorologischen Institut der Freien Universität Berlin. Der Polarwirbel bildete sich früh sehr stabil aus und erreichte bereits Mitte November Temperaturen unterhalb der PSC-Existenztemperatur. Obwohl einige dynamische Störungen in Verbindung mit relativ starker Ausbreitung planetarischer Wellen in die polaren Regionen vordrangen, wurde dadurch nur die Zirkulation und Temperaturverteilung der oberen Stratosphäre beeinflusst. Die untere Stratosphäre blieb weitgehend ungestört, der polare Wirbel war während des gesamten Winters sehr stabil, die Temperaturen entsprechend niedrig. Im März breitete sich eine Stratosphären Erwärmung nach unten aus und führte in der unteren Stratosphäre Mitte April zum *Final Warming*.

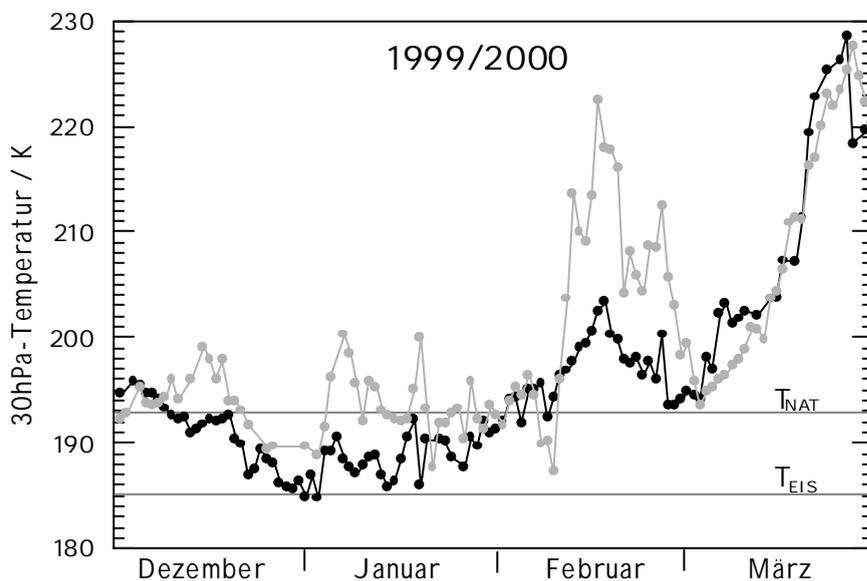


Abb.5.7: Temperaturen in einer Höhe von 30 hPa, ermittelt aus den täglichen Radiosondenaufstiegen in Sodankylä [grau] und Ny-Ålesund [schwarz] vom 1.Dez. 1999 bis zum 31.März 2000, dazu die NAT-Existenztemperatur T_{NAT} und der Eisgefrierpunkt T_{Eis} [dunkelgrau].

Die Temperaturen über Sodankylä und Ny-Ålesund (Abb.5.7) liegen von Mitte Dezember 1999 bis in den Februar 2000 unterhalb von T_{NAT} , teilweise liegen sie sogar nah am Eisgefrierpunkt T_{Eis} . Die nordhemisphärische Minimumtemperatur T_{min} lag sogar während des gesamten Zeitraums von Mitte November bis Mitte März unter der PSC-Existenztemperatur.

Nicht nur der Zeitraum, sondern auch die Ausdehnung der Fläche A_{τ} mit $T < T_{NAT}$ war im Winter 1999/2000 besonders groß. In Abb.5.8 ist die zeitliche Entwicklung der Fläche A_{τ} zu sehen, für die in den Wintern 1996/1997 bis 1999/2000 in einer Höhe von 50hPa die NAT-Existenztemperatur unterschritten wurde. Anhand dieser Graphik wird nochmals die große Temperaturvariabilität der arktischen Winter deutlich. Während in den Wintern 1996/1997 und 1999/2000 über einen langen Zeitraum auf einer großen Fläche die Möglichkeit zur PSC-Existenz gegeben war, sind Zeit und Fläche mit $T < T_{NAT}$ in den Wintern 1997/1998 und 1998/1999 nur gering.

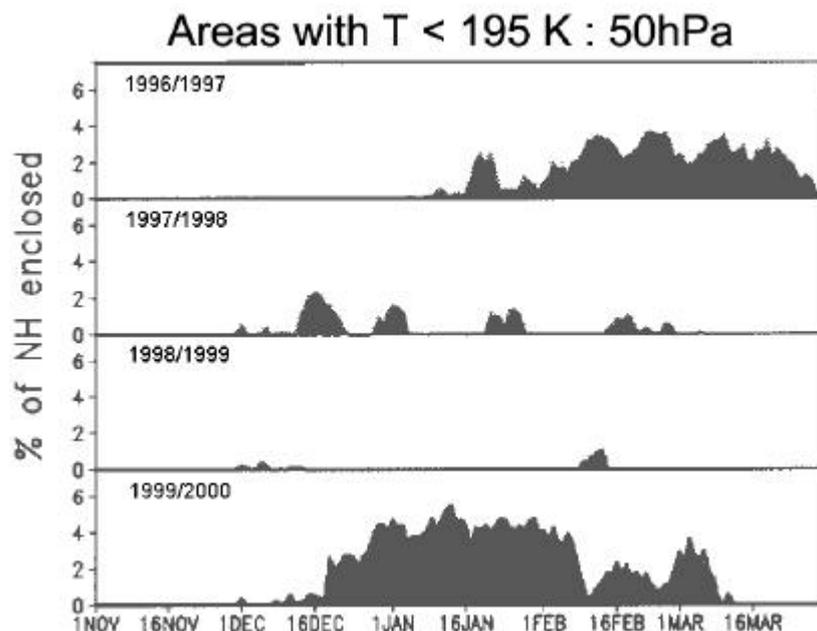


Abb.5.8: Zeitliche Entwicklung der Fläche A_{τ} mit $T < 195 K$ in einer Höhe von 50 hPa für die Winter 1996/1997 bis 1999/2000. Das Maß der Fläche ist jeweils ein prozentualer Anteil der gesamten Fläche der Nordhemisphäre (nach Naujokat et al., 2000).

Der arktische Winter 1999/2000 war durch die Stabilität des Wirbels und die korrelierten tiefen Temperaturen besonders geeignet für die Untersuchung von polaren Stratosphärenwolken. Die PSC-Messungen dieses Winters werden in Kapitel 6 dokumentiert. Das großräumige Auftreten von PSCs im Winter 1999/2000 hatte entsprechend großen Ozonverlust im arktischen Frühling 2000 zur Folge.

5.4.1 Arktische Ozonabnahme im Frühling 2000

Im Rahmen des europäischen Projekts THESEO-2000 wurden Messungen von PSCs und stratosphärischen Spurengasen in der Arktis nicht nur mit dem Lidar, sondern auch mit Ballonen und Flugzeugen durchgeführt. Es wurde u.a. auch die Entwicklung des stratosphärischen Ozons eingehend untersucht. Ein zusammenfassendes Ergebnis der Untersuchung ist in Abb.5.9 dargestellt.

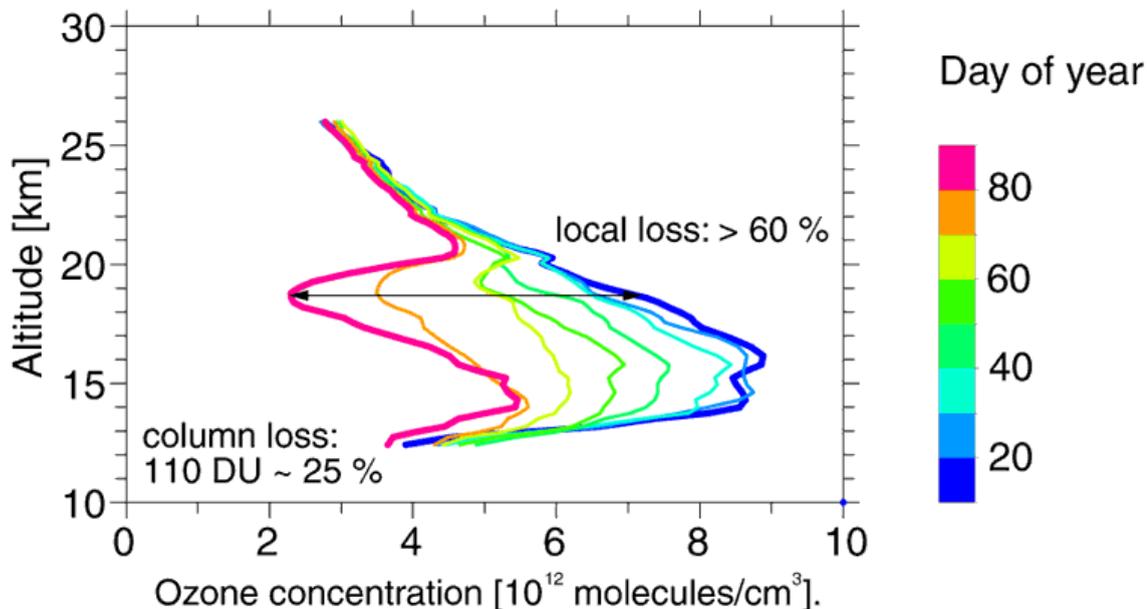


Abb.5.9: Entwicklung des über den gesamten Wirbel gemittelten Ozonprofils von Januar bis März 2000. Mittels geschätzter diabatischer Abkühlraten wird das diabatische Absinken berücksichtigt, Mischung über den Wirbelrand hinweg wird nicht angenommen. (Bildquelle: <http://www.nilu.no/projects/theseo2000/images/awi/concprofile.gif>, Nov.2000)

Es handelt sich um die Entwicklung des vertikalen Ozonprofils, gemittelt über den gesamten nordhemisphärischen Polarwirbel, während der Monate Januar bis März 2000. Ohne chemische Ozonzerstörung würden die blauen Ozonprofile auch die Situation im März repräsentieren. Tatsächlich zeigt sich jedoch Ende März ein dramatischer Ozonverlust, der in einigen Höhenbereichen sogar mehr als 60 % beträgt. Auch die Match-Methode (vgl. Kap.3.5.1), die ausschließlich chemischen Ozonabbau betrachtet, kommt zu diesen Ergebnissen (Rex *et al.*, 2001). Der große Ozonverlust ist auf die mehrwöchigen sehr tiefen stratosphärischen Temperaturen während des Winters 1999/2000 zurückzuführen. Die damit verbundene langfristige Existenz polarer Stratosphärenwolken hatte die Aktivierung ozonzerstörender Substanzen an der Oberfläche der PSCs zur Folge.