

Kapitel 6

Spezifische Transportprozesse im T42-Modell

In diesem Kapitel werden die spezifischen Transportprozesse in der winterlichen Stratosphäre mit der höher aufgelösten Modellversion T42 untersucht. Im vorangegangenen Kapitel wurden die Unterschiede, die sich aus den horizontalen Auflösungen T21 und T42 ergeben, analysiert und diskutiert. Hier sollen nun die Vorteile der T42-Modellauflösung in die Transportuntersuchungen einfließen. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf Streamern, da hierzu bisher nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden. Im Detail werden Streamerepisoden, die mit dem T42-Modell simuliert wurden, mit den in Beobachtungen gefundenen Merkmalen verglichen (siehe Kapitel 2). Die beobachteten charakteristischen Merkmale von Streamern, die auf einer einwöchigen Kampagne von CRISTA- und ATMOS-Daten beruhen, werden mit Hilfe des Berliner Zirkulationsmodells für einen arktischen Winter ergänzt und die verantwortlichen Prozesse analysiert.

Folgende Fragestellungen sind in der Literatur noch ungeklärt und stossen im Sinne dieser Arbeit auf Interesse: Inwiefern können GCMs Episoden von Streamern, die z.B. während der ATLAS 3 Mission beobachtet wurden, simulieren? Werden, wie in den Konturadvektionssimulationen, auch mit grob aufgelösten Winden sehr feine Strukturen wie Filamente in GCMs aufgelöst? Was verursacht die Entstehung eines Streamers, wann löst er sich auf, und wann bildet sich ein Cat Eye?

In diesem Sinne bietet es sich an, die Transportprozesse im Modell an Hand der Einteilung Tropische-Subtropische Streamer, Polarwirbel Streamer sowie Cat Eyes zu untersuchen. Ein idealisierter passiver Tracer wird dazu, wie in Abb. 3.4 dargestellt, mit einem zonal homogen verteilten Feld am 1. Oktober eines jeden Modelljahres initialisiert (siehe Kapitel 3). Die idealisierte Tracerverteilung wird so ausgewählt, dass eine möglichst schnelle Anpassung an die Form des Polarwirbels gewährleistet ist. Der Tracer reagiert chemisch nicht mit anderen Spurengasen und hat keine Quellen und Senken. Für die Streamerepisoden-Simulation wurde der Winter 11/12, der in seiner Synoptik ein typisch kalter, ungestörter Winter ist, ausgesucht.

6.1 Tropische-Subtropische Streamer

In Abb. 6.1 ist die zeitliche Entwicklung des passiven Tracers in 32 km Höhe für die Modelltage 63–78 nach der Initialisierung, das entspricht dem 3.–18. Dezember des 11. Modelljahres, dargestellt. Niedrige Werte (<115 au), in den lila Farbtönen zu erkennen, kennzeichnen den aus tropischen Breiten kommenden Tracer, wohingegen hohe Werte (>150 au), in gelben bis roten Farben zu erkennen, den Tracer aus dem Inneren des Polarwirbels markieren.

6.1.1 Atlantik-Streamer

Zuerst soll der Transport im Atlantik-Eurasien Sektor beschrieben werden. Über dem West-Atlantik werden Luftmassen tropischen-subtropischen Ursprungs von den großskaligen Südwest-Winden herausgezogen (Tag 67) und nach Nordosten über den Atlantik bis nach Europa advehiert (Tag 68–70). Diese breite Zunge tropischer Luft lässt sich als Atlantik-Streamer (siehe Abschnitt 2.5.1) identifizieren (Offerman et al., 1999). Ab Tag 70 wird der Streamer länger und dünner, bis eine filamentartige Struktur zu erkennen ist, vergleichbar zu dem Atlantik-Streamer der CRISTA Messung (Abb.2.13). Schließlich rollt sich das Streamer-Filament System über Eurasien zu einem Cat Eye ein (Tag 72). In den darauf folgenden Tagen löst sich das Ende des Streamers über Asien auf, bzw. ein Teil wird in eine neue Transportstruktur einbezogen (siehe Ostasien-Streamer ab Tag 75–77). Am Tag 78 verschmilzt der Atlantik-Streamer mit einem äquatorwärts gelegenen Streamer, der sich wie eine Meereswelle überwirft und ebenfalls ein Cat Eye bildet (Tag 74–78). Dieses Cat Eye tritt in Verbindung mit einer Antizyklone auf, wie später gezeigt wird. Währenddessen ist der Ansatz des Streamers immer noch über dem Atlantik und Europa auszumachen (Tag 75–77). Anschließend wird er in eine neue Streamerstruktur über Osteuropa hineingezogen.

Der zeitliche Verlauf der vertikalen Erstreckung des Atlantik-Streamers wird in Abb. 6.2 dargestellt. Das linke Bild ist repräsentativ für die in Abb. 6.1 (Tag 69–71) gezeigte Entwicklung des Streameransatzes, das mittlere Bild für das Zentrum des Streamers und das rechte Bild für das Ende des Streamers, jeweils während des Auflösungszeitraums des Streamers (Tag 75–77). Zu Beginn der Entwicklung hat der Streamer eine vertikale Erstreckung von 27–49 km Höhe mit einem Minimum von 80 au in der oberen Stratosphäre. Hier muss es zu einem interhemisphärischen Luftmassenaustausch gekommen sein, denn Spurengaskonzentrationen von 80 au entsprechen ursprünglich einer Breite von 10° S (siehe Abb. 3.4). In der Anfangsentwicklung sinkt der Streameransatz (Abb. 6.2 links) nach unten ab und vermindert dabei seine vertikale Erstreckung auf 20–29 km Höhe mit minimal 115 au (Tag 71). Während des Auflösungsprozesses verlagert sich das Streamerzentrum um 5 km (Abb. 6.2 Mitte) und das Streamerende um 7 km nach oben (Abb. 6.2 rechts). Insgesamt betrachtet liegen die Maxima des Streamerendes um 5–7 km höher als die des Streamerzentrums.

Dieses ausgesuchte Beispiel beschreibt eine rege Transportperiode mit raschen dynamischen Veränderungen, die im Abschnitt 6.4 näher untersucht wird. Der Atlantik-

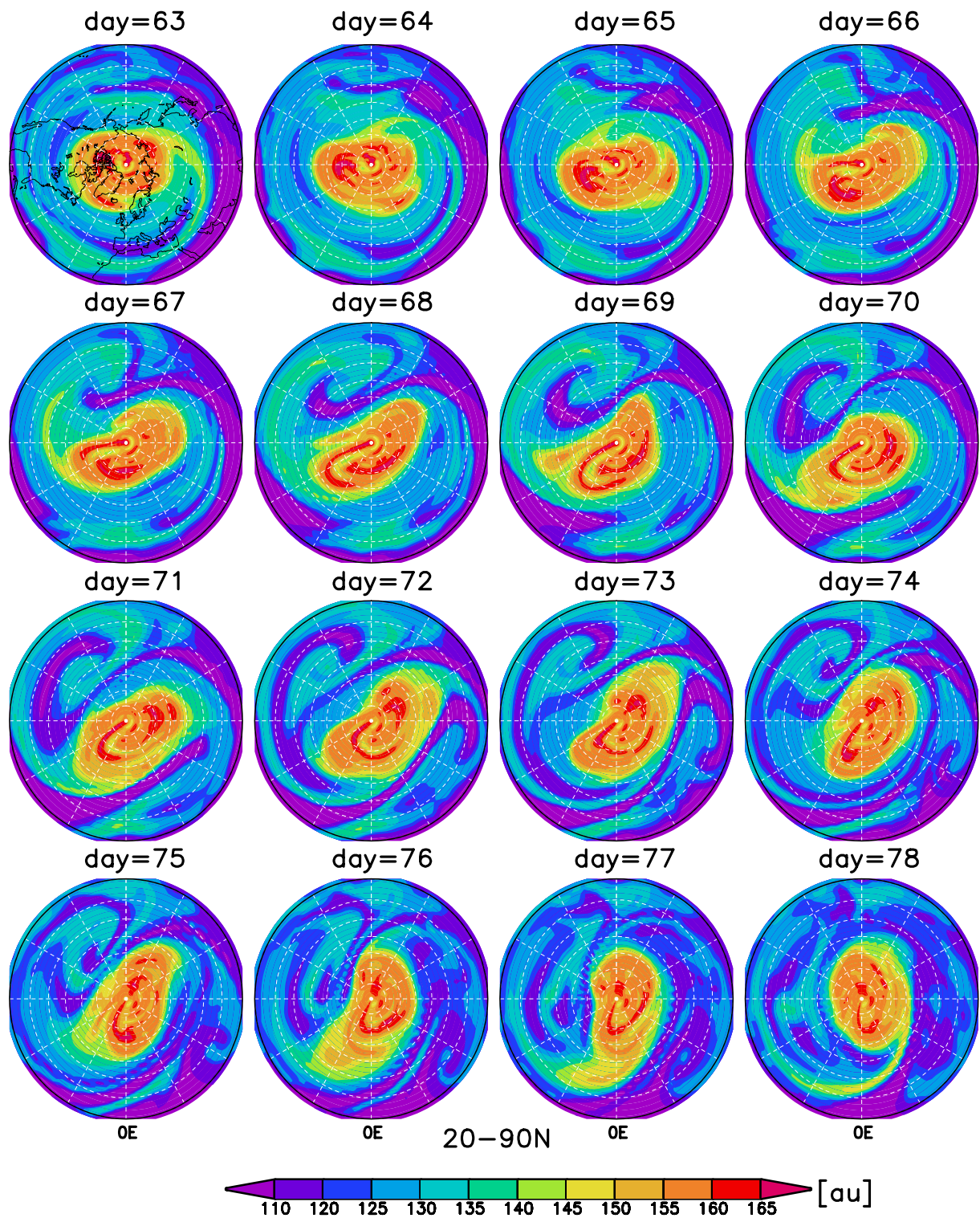


Abbildung 6.1. Polarstereographische Darstellung des passiven Tracers (au) im T42-Modell von 20–90° N in 32 km Höhe. Der Tracer wurde am 1. Oktober des 11. Modelljahres wie in Abb. 3.4 initialisiert. Hier sind die Tage 63–78 (3.–18. Dezember) dargestellt. Das unterlegte Gitter hat einen Abstand von 10° Breite und 30° Länge.

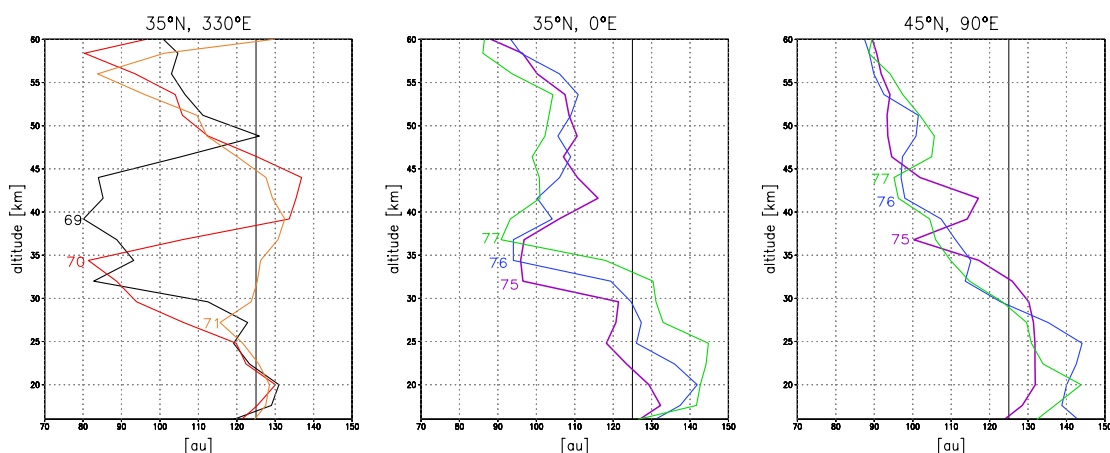


Abbildung 6.2. Vertikales Profil des passiven Tracers (au) im Modell. Links: für die Tage 69–71, 35° N, 330° E; für die Tage 75–77 in der Mitte: 35° N, 0° E; rechts: 45° N, 90° E. Die durchgezogene Linie kennzeichnet die ursprüngliche Konzentration zum Initialisierungszeitpunkt.

Streamer bleibt rund 10 Tage erhalten, hat eine Breite entlang eines Längengrades von 2.000 km zu Beginn der Entwicklung und am Ende von weniger als 500 km. Die Länge des Streamer-Filament Systems umfasst maximal die halbe Hemisphäre (bis 20.000 km) und die tropischen Luftmassen reichen bis 55° N. Wie im Kapitel 2 mit den CRISTA- und ATMOS-Daten gezeigt wurde, erstrecken sich die schon in der Entwicklung befindlichen Streamer-Filament Strukturen bis zu 10 km in der Vertikalen. Hier im Beispiel des Modells erstreckt sich der Atlantik-Streamer während seiner Entstehung auf über 20 km in der Vertikalen und verringert sich in der zeitlichen Entwicklung auf unter 10 km. Die vertikale Ausdehnung des Atlantik-Streamers im Modell wie in den Beobachtungen hat somit eine größere vertikale Struktur als die Laminae-Filament Strukturen, die mit einer vertikalen Erstreckung von 200 m bis ca 2,5 km Dicke beobachtet werden (Reid und Vaughan, 1991).

6.1.2 Asien-Streamer

Im Folgenden soll in Abb. 6.3 (und Abb. 6.1) der Asien-Pazifik Sektor auf ähnliche Transportphänomene hin untersucht werden, wie sie in den CRISTA-Daten beobachtet wurden. Kurz nach der Initialisierung im Oktober entwickelt sich über Ostasien eine Zunge tropischer Luftmassen, die um den Polarwirbel nach Nordosten bis zum Pazifik advehiert wird (Tag 3–7). Diese tropische Zunge wird als Ostasien-Streamer identifiziert (siehe Abschnitt 2.5.1, Offerman et al., 1999). In den darauf folgenden Tagen bildet der Streamer sich zurück (Tag 11–15) und löst sich am Tag 19 nahezu auf (nicht gezeigt). Der Ansatz des Streamers, der zu Beginn der Entwicklung über China liegt, befindet sich am Ende über Indien, wandert also entgegen der Advektion des Streamers westwärts. In dem hier gezeigten Beispiel löst sich der Ostasien-Streamer in den umgebenden Luftmassen auf. Wie in diesem Beispiel deutlich wird, endet nicht jeder Streamer mit der Entwicklung eines Cat Eyes.

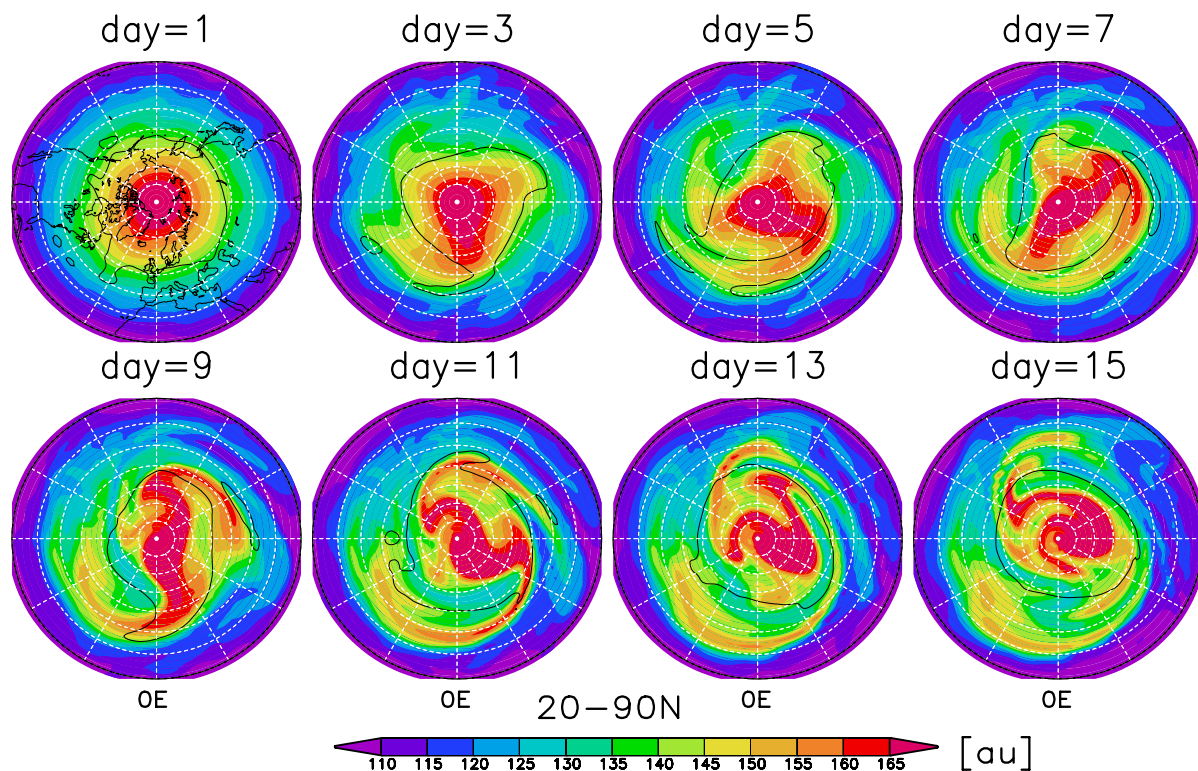


Abbildung 6.3. Wie in Abb. 6.1, jedoch sind hier die Tage 1–15 im zwei-tägigen Abstand dargestellt. Die schwarze Linie markiert hier die 33 PVU Kontur ($1 \text{ PVU} = 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$) auf der 850 K Isentrope.

Dagegen löst sich der Ostasien-Streamer, der in dem Zeitraum Tag 63–78 (Abb. 6.1) gleichzeitig mit dem Atlantik-Streamer auftritt (hier deutet sich eine ostwärts wandernde Welle 2 in den mittleren Breiten an), nicht einfach in den umgebenden Luftmassen auf. Dieser Streamer bildet sich am Tag 50 (hier nicht gezeigt), reicht von Ostasien bis zum Ostpazifik und rollt sich dort um das Aläutenhoch in ein Cat Eye ein (Tag 68–75). Auf Grund der vorliegenden Windscherung über den USA wickelt sich das Ende nicht vollständig um das Aläutenhoch, sondern ein Teil des Streamers wird in einem breiten Streifen Richtung Nordosten gezogen (ab Tag 72). Im Verlauf der Tage wird dieses Ende immer länger und dünner, so dass der Streamer schließlich als Filament angesehen werden kann. Am Tag 75 hat das Streamer-Filament System einmal komplett den Polarwirbel umrundet. Danach löst sich das Zentrum des Ostasien-Streamers über der USA-Pazifik Region auf, während das Filamentende über Europa-Rußland liegend mit dem dort vorhandenen Atlantik-Streamer interferiert. Interessanterweise liegen an den Tagen 74–76 drei Streamer tropischer bzw. subtropischer Luftmassen gleichzeitig auf 60° E vor. Am polnächsten ist dabei das Filament mit der Restluft subtropischen Ursprungs, dann folgt der oben beschriebene Atlantik-Streamer, begleitet von einer kurzen Streamerwelle an der dem Äquator zugewandten Seite, die sich in ein Cat Eye rollt. Drei Streamer, die gleichzeitig auf einen Längengrad vorliegen, werden hiermit als „Dreifach-Streamer“ bezeichnet.

Sehr viel häufiger treten im Modell sogenannte „Doppel-Streamer“ auf. Die Entwick-

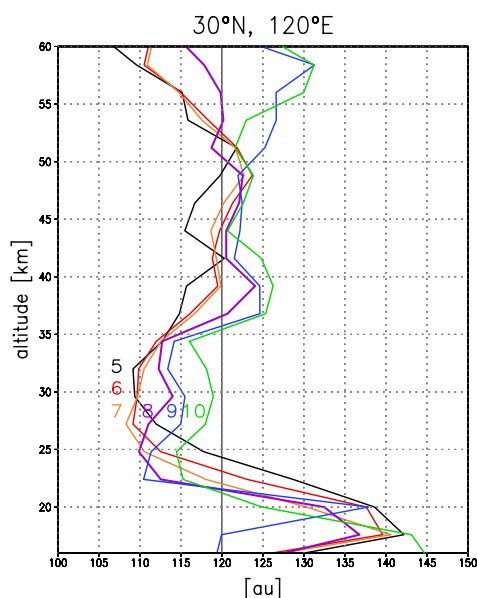


Abbildung 6.4. Wie in Abb. 6.2 für die Tage 5–10 in 30° N, 120° E.

lung zu einem Doppel-Streamer, der auf einem Längengrad vorliegt, ist in Abb. 6.3 an den Tagen 5–9 über Asien und Osteuropa zu erkennen. Der Asien-Streamer ist eindeutig größer und breiter, wohingegen die schmale Luftmasse, die über Europa herausgezogen wird, als Filament einzustufen ist. Von Tag 11–15 liegen diese Doppel-Strukturen auf 90° E vor. Ein frappierend ähnliches Ereignis tritt in Beobachtungsdaten am 5. und 7. November 1994 auch in 90° E auf (siehe Abb. 2.15, Manney et al., 2001). Bei diesen Mehrfach-Strukturen, die auf einem Längengrad vorliegen, scheinen kleinskaligere Wellen in den Subtropen eine Rolle zu spielen. Hingegen können die großräumigen Strukturen, wie die eben beschriebenen Atlantik- und Ostasien-Streamer (Abb. 6.1), dem Auftreten von ultralangen planetarischen Wellen, die die zonal-symmetrische Verschiebung des Polarwirbels zum Pol beschreiben, zugeordnet werden (siehe Abschnitt 6.4).

Die vertikale Erstreckung des Asien-Streamers, der nicht in einem Cat Eye zerbricht, wird in Abb. 6.4 dargestellt. Das Vertikalprofil ist so an einem Gitterpunkt ausgewählt worden, dass es sich, während der hier ausgesuchten Tage, im Zentrum des Streamers befindet. Zu Beginn der Entwicklung (Tag 5) umfasst der Streamer eine vertikale Erstreckung von 20–41 km Höhe, die sich im Verlauf der Entwicklung auf 20–36 km reduziert. Während der hier dargestellten 10 Tage ist eine kohärente Struktur in der vertikalen Tracerverteilung auszumachen. Im Vergleich zum Atlantik-Streamer in Abb. 6.2 handelt es sich um eine zeitlich stetige Entwicklung des Streamers. Tag 8–10 weisen dabei ein Doppelmaximum in der Vertikalen in 23 und 32 km Höhe auf.

Es lässt sich festhalten, dass im Modell auch Ostasien-Streamer simuliert werden, die 1,5 bis 3 Wochen bestehen können. Während des Entwicklungsstadiums ist die Breite des Asien-Streamers in den hier ausgesuchten Beispielen schmäler als bei dem Atlantik-Streamer. Die Breite beträgt typischerweise 1.000 km, und die Länge mehr als 20.000 km. Der Streamer reicht maximal von den Tropen bis ca. 65° nördliche Breite. Das vertikale

Ausmaß erstreckt sich zu Beginn der Entwicklung auf mehr als 20 km Dicke und zum Ende auf 15 km. Das Umrunden des gesamten Polarwirbels in diesem Modellwinter war ein außergewöhnlicher Fall. Auch in den Beobachtungsdaten findet sich ein Beispiel, in dem eine filamentartige Extrusion des Polarwirbels den gesamten Polarwirbel umrundet (siehe Abb. 2.15, Mitte).

6.2 Polarwirbel Streamer

Bisher wurden Transportprozesse von den Tropen-Subtropen in mittlere Breiten betrachtet, nun wird die Durchmischung von Luftmassen aus den polaren in die mittleren Breiten und umgekehrt untersucht. Zunächst wird die Abbildung 6.3 in Hinsicht auf den USA-Atlantik Sektor beschrieben.

6.2.1 Extrusionen

Am Tag 3 beginnt sich ein breiter Schweif des Polarwirbels über der Ostküste der USA zu entwickeln. Wenn der Schweif den Polarwirbelrand quert, wird er als Extrusion des Polarwirbels bzw. in dieser Arbeit auch als Polarwirbel Streamer bezeichnet (siehe Kapitel 2). Nördlich des Schweifs wird eine Zunge mit Luftmassen mittlerer Breiten in Richtung Polarwirbel advehiert, dadurch wird der Schweif vom Polarwirbel abgeschält (Tag 5). Während dieses Zeitraums rotiert der Polarwirbel und somit auch der Schweifansatz um seine eigene Achse ostwärts. Das Ende des Polarwirbel Streamers bleibt quasi auf seiner geographischen Länge und Breite „stehen“ und vermischt sich am Tag 9 mit dem zweiten vorbeiziehenden Polarwirbel Streamer. Dagegen rotiert der Ansatz des Streamers mit dem Polarwirbel immer weiter ostwärts und bildet ab Tag 11–15 erneut einen langen Ausläufer über dem Pazifik-Asien Raum. Der zweite Schweif, der am Tag 5 über dem Ost-Pazifik zeitgleich mit dem zuerst beschriebenen Phänomen entsteht, bleibt sehr viel breiter und größer erhalten (Tag 9–15). In diesem Schweif werden Luftmassen aus dem inneren Bereich des Polarwirbels (145–165 au) bis in die Subtropen transportiert (Tag 13–15). Ab Tag 15 löst sich der Schweif von Polarwirbel ab und beginnt sich mit den umgebenden Luftmassen zu vermischen. Dieser ausgeprägte Polarwirbel Streamer hat am Tag 9 eine Ansatzbreite von maximal 1.500 km über dem Greenwich Meridian, der zum Ende der Entwicklung sehr fein und dünn wird (ca. 500 km breit; Tag 13 über Sibirien). Das Ende des Polarwirbel Streamers, das in 50° N über dem Atlantik liegt, wird dann mit den Luftmassen zurück in Richtung Polarwirbel gezogen.

Bei der Inspektion des gesamten Winters wurde festgestellt, dass das Ende eines Polarwirbel Streamers sich meist in ein Cat Eye rollt. Das Ende des Streamers kann aber auch in Richtung Ursprungsort zurückgezogen werden, bevor es sich aufzulösen beginnt.

6.2.2 Intrusionen

Eine Intrusion des Polarwirbels findet statt, wenn Luftmassen von außerhalb des Polarwirbels den Polarwirbelrand durchschreiten (siehe Tage 7–13, Abb. 6.3). Es stellt sich die Frage, ob Extrusionen des Polarwirbels, die sich in Form von Polarwirbel Streamern beschreiben lassen, immer mit Intrusionen in den Polarwirbel gepaart sind. Betrachtet man die Abb. 6.3, die die zeitliche Abfolge des Tracers zusammen mit dem hier mit 33 PVU markierten Rand des Polarwirbels illustriert, fällt auf, dass hier während einer Extrusion des Polarwirbels immer auch eine Intrusion in den Randbereich des Polarwirbels auftritt. Untersuchungen von filamentartigen Extrusionen und Intrusionen des Polarwirbels zeigen, dass häufiger Extrusionen des Polarwirbels beobachtet werden (Waugh et al., 1994; Plumb et al., 1994), die nicht gleichzeitig mit einer Intrusion auftreten müssen. In diesen Studien wurden sehr viel feinere Auflösungen mit Hilfe der CAS Methode erzielt und können wahrscheinlich nicht in direkten Zusammenhang mit dieser Modellstudie gesetzt werden. Hingegen zeigte Jones (1984) mit Hilfe von Satellitenmessungen für einen arktischen Winter an Hand der PV und des CH_4 -Mischungsverhältnisses, dass Extrusionen und Intrusionen des Polarwirbels simultan auftreten. Eine detaillierte Untersuchung dieser Fragestellung wird in Abschnitt 6.4 vorgenommen.

6.2.3 Vergleich Tracer und PV

Um die Verlässlichkeit der hochaufgelösten Transportstrukturen im Modell zu überprüfen, wird in diesem Unterkapitel ein Vergleich zwischen Tracertransport und PV-Transport durchgeführt.

Die Entwicklung zu einem Polarwirbel Streamer wird noch einmal zu einem späteren Zeitpunkt untersucht. In dem Zeitraum Tag 63–78 (Abb. 6.1) sind zwei Sequenzen von Polarwirbel Streamern im Tracer zu erkennen, die in dem Semi-Lagrange'schen Transport von Spurengasen etwas feiner ausfallen als in dem spektralen Modelltransport der PV. In der ersten Sequenz (Tag 65–71) wird ein Schweif mit Polarwirbelluft über dem Beringmeer herausgezogen. Der Ansatz des Streamers rotiert mit dem Polarwirbel weiter ostwärts, so dass es zur Ausbildung einer langen Zunge kommt, die am Tag 68 von der Ostküste der USA bis zum Pazifik reicht und sich dort in ein Cat Eye rollt. Dieser Ansatz des Polarwirbel Streamers hat zu Beginn seiner Entwicklung eine Breite von 1.000 km, die sich zum Ende auf etwa 500 km verringert. Die maximale Länge umfasst ca. 12.000 km.

Passend zum Tracer ist in Abb. 6.5 die PV mit der geopotentiellen Höhe unterlegt dargestellt. Betrachtet man die PV (Tag 63–78), ergibt sich ein ähnliches Bild der großräumigen Dynamik wie beim Tracertransport. Der Tracer zeigt aber ein differenzierteres Bild der Entwicklung. Es bleiben feinere Strukturen erhalten, die sich z.B. in Form von filamentartigen Extrusionen – im Gegensatz zu den breiten Zungen in der PV – aus dem Polarwirbel herausschälen (Tag 65–69). Bei der Betrachtung der PV am Tag 3 (Abb. 6.3) erkennt man das erstmals von McIntyre und Palmer (1984) beobachtete Auflösen der PV-Zunge in Form von Tropfen. Das „Herausziehen“ des Polarwirbel Streamers über dem Pazifik hängt mit der Entwicklung des Aläutenhochs zusammen (Tag 65). In den

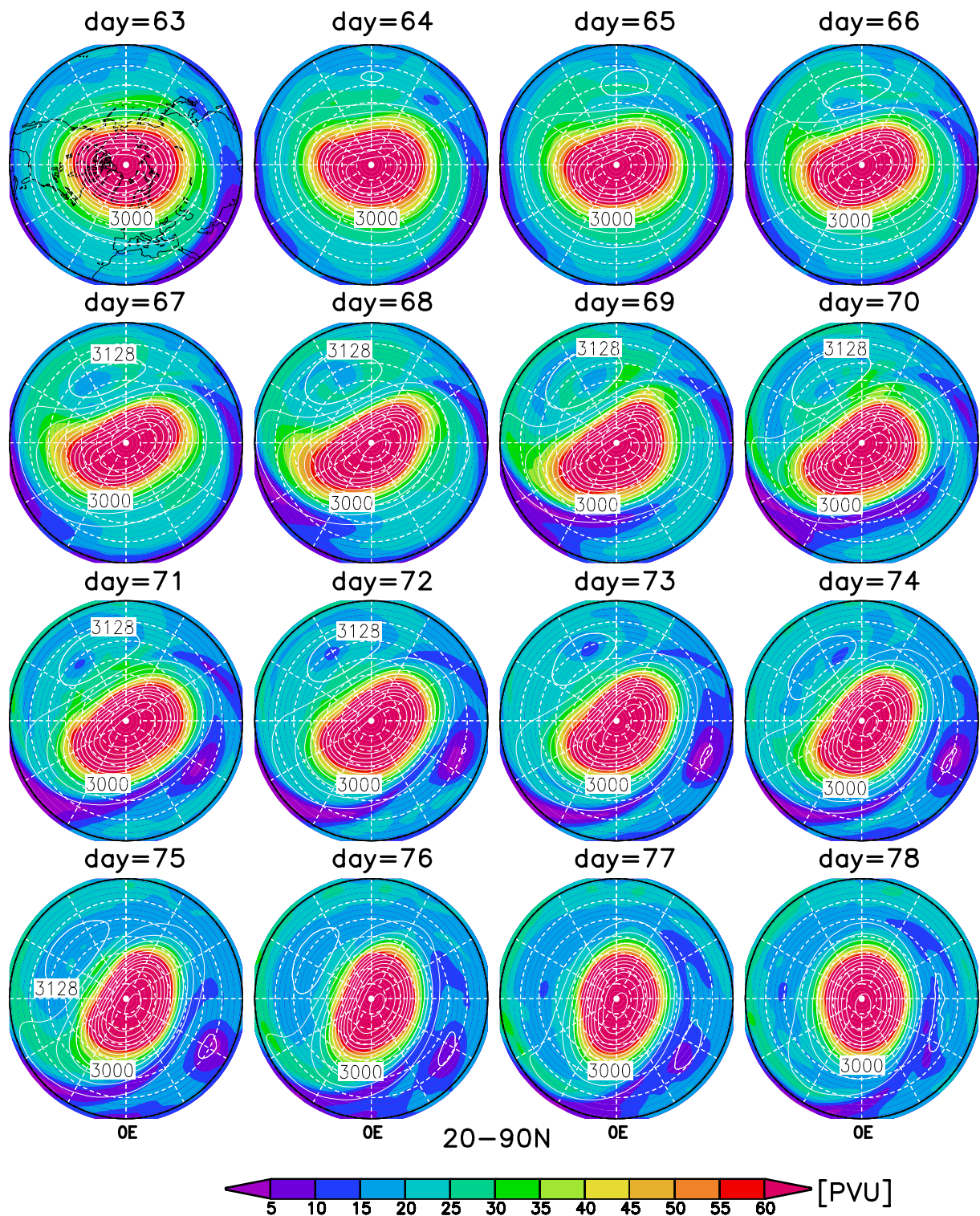


Abbildung 6.5. Die PV (PVU) ist für die Tage 63–78 auf der 850 K Isentrope zusammen mit der geopotentiellen Höhe in 10 hPa (Isolinienintervall 32 gpdam) dargestellt.

darauf folgenden Tagen verstärkt sich das Aläutenhoch, bleibt aber stationär, so dass ein stetiger Grundstrom bis etwa Tag 75 gewährleistet ist. Die erste Sequenz des Polarwirbel Streamers bleibt in der PV für den Zeitraum Tag 65–70 bestehen, wohingegen die zweite Sequenz (ab Tag 74) während einer transienten Periode eines ostwärts rotierenden Polarwirbels auftritt, die dann ähnlich wie im Oktober des Modelljahres 11 (Abb. 6.3) zu einer zweifachen Bildung eines Polarwirbel Streamers führt. Vergleicht man die Tracerkonturen mit der PV in Abb. 6.5, so stellt man eine gute Übereinstimmung der grob aufgelösten Muster sowie der zeitlichen Entwicklung der PV mit dem Tracer fest. Die PV kann aber nicht die hohe Auflösung des advehierten Tracers im Transportmodul vollziehen (Methven und Hoskins, 1999).

Wie sich schon in Abb. 6.3 angedeutet hat, kam es im Oktober des Modelljahres 11 beständig zu Extrusionen, gepaart mit Intrusionen des Polarwirbels. Es stellt sich die Frage, inwiefern es sich hier um einen Einfluss der Initialisierung handeln kann. Im späteren Verlauf der Simulation Tag 63–78 (Abb. 6.1) deuten sich nicht immer Intrusionen während einer Extrusion des Polarwirbels an.

Extrusionen und Intrusionen

In der folgenden Abb. 6.6 ist sowohl ein Beispiel für eine Extrusion (Tag 71) als auch für eine Intrusion des Polarwirbels (Tag 83) zu erkennen. Der Polarwirbelrand ist hier mit 30–35 PVU markiert (siehe Kapitel 4).

Die Extrusion (Tag 71) durchquert den Polarwirbelrand über dem Atlantik und dringt im Verlauf der Entwicklung bis 30° N vor. Wie man erkennt, ist der Polarwirbelrand sehr weit nach Süden vorgedrungen und erreicht über dem West-Atlantik 40° N, so dass sich ein dünner Schweif (von 140 au) vom Polarwirbelrand abschälen kann. Südwärts davon ist die oben beschriebene breite Zone des Atlantik-Streamers auszumachen, was auf einen starken Gradienten im Windfeld schließen lässt (siehe Abschnitt 6.4).

Am Tag 83 ist der zeitliche Verlauf der zweiten Streamersequenz, die sich ab Tag 77 in Abb. 6.1 angedeutet hat, zu verfolgen. Hier ist neben dem langen Ausläufer des Polarwirbel Filaments, der von Europa bis zum Pazifik reicht, eine Intrusion von Luftmassen subtropischen Ursprungs in den Polarwirbel hinein zu erkennen (südlich von Island). Deutlich durchquert diese den Polarwirbelrand und vermischt sich danach in dem äußeren Ring des Polarwirbels. Wie hier veranschaulicht wird, findet Luftmassenaustausch mittlerer Breiten mit dem Randbereich des Polarwirbels und umgekehrt statt.

Das vertikale Ausmaß der Polarwirbel Extrusion direkt nach der Initialisierung des Tracers (Tag 9–14) ist in Abb. 6.7a dargestellt. Am Tag 9, an dem die größte Breite des Polarwirbel Streamers erreicht wird, hat er auch die größte Ausdehnung in der vertikalen Achse aufzuweisen. Es tritt ein Maximum von 162 au in 37 km Höhe auf. In den darauf folgenden Tagen sinkt das Maximum nach unten ab, und das vertikale Ausmaß verringert sich von anfangs 20 km auf ca. 9 km Dicke. Dabei ändert sich der scharfe Übergang in 25 km Höhe von niedrigen zu hohen Tracerwerten kaum. Es findet anscheinend ein stetiger, kohärenter Prozess in der Vertikalen statt, der sich bei Prüfung der vertikalen

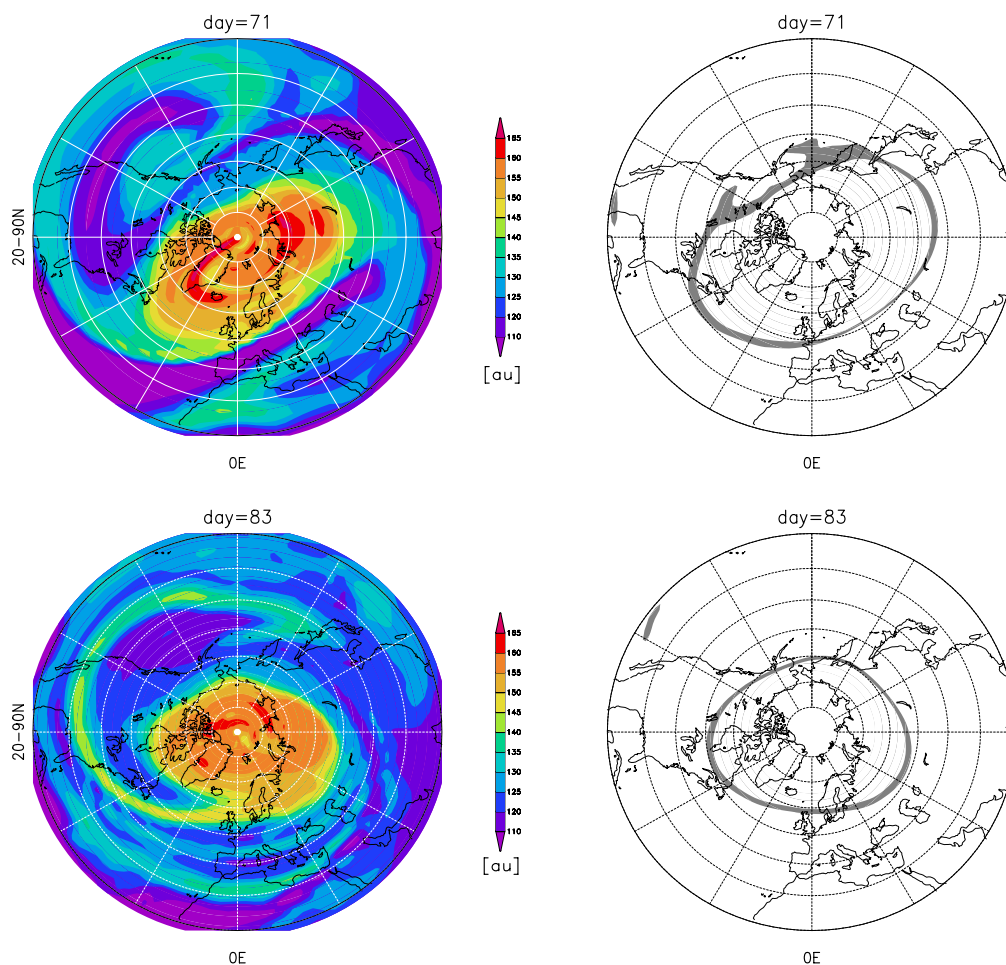


Abbildung 6.6. Vergleich des Tracers (au) in 32 km Höhe (links) mit dem Polarwirbelrand markiert mit 30–35 PVU in 850 K (rechts) für den Tag 71 (oben) und 83 (unten).

Schichtung von Temperatur und geopotentieller Höhe auch als barotroper Vorgang herausstellt (hier nicht gezeigt).

Das vertikale Ausmaß der Polarwirbel Intrusion zu einem späteren Zeitpunkt der Initialisierung (Tag 80–83) ist in Abb. 6.7b dargestellt. Das Tracerprofil während des Zenits des Entwicklungsstadiums (Tag 83) zeigt eine schmalere vertikale Struktur mit einer maximalen Dicke von 8 km. Auf Grund der raschen Übergänge deutet sich ein transienter Prozess an, der keine kohärente Verteilung in der Vertikalen erkennen lässt.

In guter Übereinstimmung mit Beobachtungen weist die Extrusion des Polarwirbels bzw. der Polarwirbel Streamer im Modell eine kohärente Struktur in der Vertikalen mit einer Ausdehnung über die nahezu gesamte Stratosphäre zu Beginn einer solchen Entwicklung auf (Schoeberl und Newman, 1995). Intrusionen weisen dagegen keine kohärente Struktur auf und haben eine schmalere Erstreckung in der Vertikalen, wie von Schoeberl und Newman (1995) beobachtet wurde und im Modell bestätigt werden konnte.

Die hier simulierten Polarwirbel Streamer haben eine geringere Länge als die zuvor

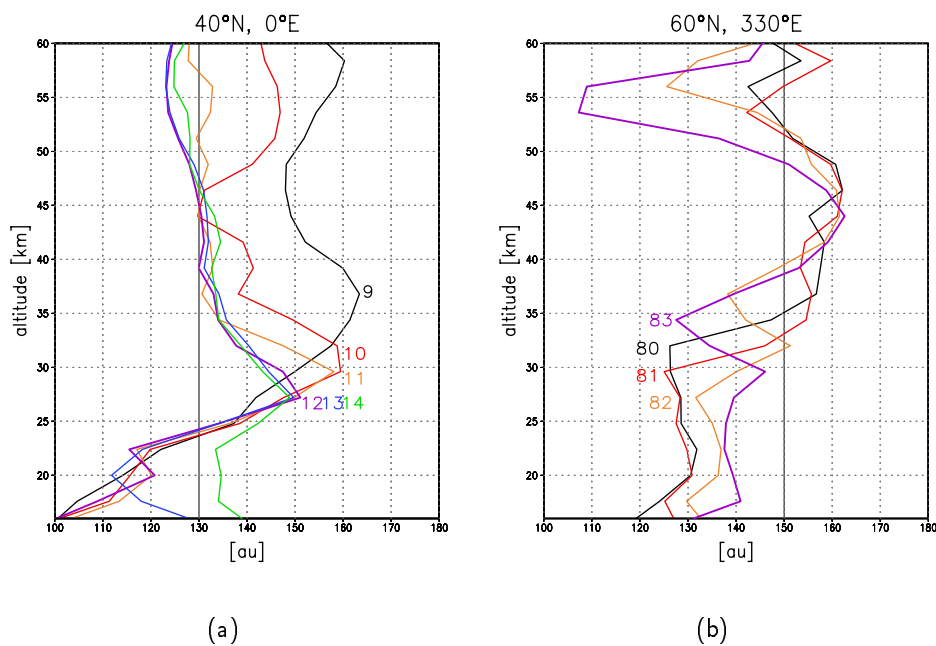


Abbildung 6.7. Vertikale Erstreckung einer: (a) Polarwirbel-Extrusion an den Tagen 9–14 in 40° N, 0° E; (b) einer Intrusion an den Tagen 80–83 in 60° N, 330° E.

beschriebenen Tropischen Streamer. Es wird maximal die halbe Hemisphäre umspannt. Die Ansatzbreite zu Beginn der Simulation fällt mit mehr als 1.500 km deutlich größer aus als die 1.000 km zu einem späteren Simulationszeitpunkt. Ein Polarwirbel Streamer mit Luftmassen des inneren Polarwirbelbereichs erreicht in einem Beispiel, in dem der Polarwirbelrand sehr weit südwärts gelegen ist (40° N), sogar die Subtropen. Zu einem späteren Zeitpunkt der Simulation kommt es zu einem ähnlichen Ereignis einer filamentartigen Extrusion des Polarwirbels, die dabei aber nur einen Luftmasseneintrag des Polarwirbelrandes in die Subtropen liefert. Luftmassenaustausch, der vom Inneren des Polarwirbels in die mittleren Breiten stattfindet, wurde bisher nicht beobachtet (WMO, 1999). Hier muss hinzugefügt werden, dass Satelliteninstrumente während der Polarnacht nicht messen können, so dass kaum Messungen vom Inneren des Polarwirbels zur Verfügung stehen.

Die Beobachtungen können mit dem Berliner Modell nach einem ausreichenden Anpassungszeitraum für die mittlere Stratosphäre nachvollzogen werden.

6.3 Cat Eyes – Zerbrecen der Streamer

Die Beschreibung von Cat Eyes ist zum Teil schon in den zuvor untersuchten Transportphänomenen erfolgt. An Hand von Abb. 6.1 soll die Entwicklung zu einem Cat Eye, das meist mit dem Zerbrecen des Streamers einhergeht, beschrieben werden.

Mit der Ausbildung des Aläutenhochs verzweigt sich das Ende des Asien-Streamers in

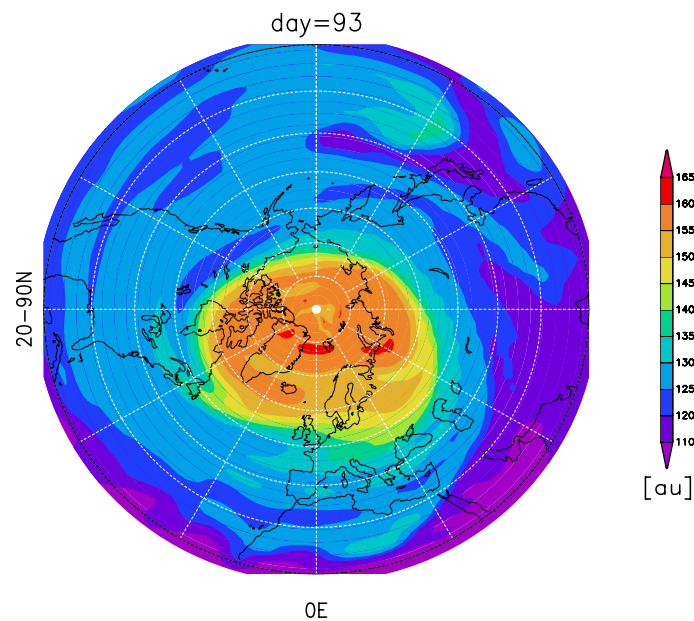


Abbildung 6.8. Passiver Tracer für den Tag 93 wie in Abb. 6.1.

einen polwärtigen als auch äquatorwärtigen Ast, um sich in das Cat Eye über dem Pazifik zu wickeln (Tag 65–69). Der von Südosten kommende Streamer, der in das Aläutenhoch hineingezogen wird, löst sich dabei wieder auf (Tag 69–70), während der polwärtige Streamer sich weiter in das Aläutenhoch wickelt (Tag 70–75). Das hierbei entstehende Muster wird als Cat Eye bezeichnet (Kapitel 2). In diesem ausgesuchten Beispiel ist zu erkennen, dass auch das Ende des Polarwirbel Streamers von Südwesten kommend in das Aläutenhoch hineingezogen wird. Ab Tag 69 rollen sich die beiden Streamerenden langsam in das Aläutenhoch ein. Danach beginnt das Zerbrechen der Streamer, das durch das Auflösen des Cat Eyes gekennzeichnet ist und zur vollständigen Durchmischung von Luftmassen nach etwa zwei Wochen führt (siehe Abb. 6.8). In guter Übereinstimmung mit WMO (1999) wird also eine gesamte Lebensdauer von etwas mehr als drei Wochen erreicht. Die vollständige Durchmischung von Spurengasgradienten wird dem Prozess des Wellenbrechens zugeschrieben und kennzeichnet irreversible Transportprozesse. Das bedeutet, dass die Luftmassen nicht mehr in ihre ursprüngliche Umgebung zurückkehren. Tatsächlich ist in Abb. 6.8 am Tag 93 eine deutlich durchmischte *Surf Zone* mit einer ausgeprägten Polarwirbelbarriere zu erkennen. Ein kleiner Rest des Cat Eyes ist über dem West Pazifik auszumachen.

Im Zeitraum Tag 63–78 nach der Initialisierung treten Cat Eyes in Verbindung mit Antizyklonen auf: das Ende des Asien-Streamers, des Atlantik-Streamers und der Streamerwelle wickeln sich um eine Antizyklone zu einem Cat Eye ein.

Das vertikale Ausmaß von Cat Eyes in der vollen Entwicklungsphase ist für den Zeitraum Tag 70–75 in Abb. 6.9 dargestellt. Am Tag 70 hat es die größte Ausdehnung in der Vertikalen von 20–37 km Höhe mit einem Minimum von 118 au in 32 km Höhe. In den folgenden fünf Tagen sinkt das Minimum um 7 km ab, einhergehend mit einer gleichzeitigen Reduzierung der vertikalen Ausdehnung auf 7 km Dicke. Eine kohärente Struktur der vertikalen Profile zeigt sich bis zur oberen Stratosphäre, darüber ist ein chaotischer Übergang zu erkennen.

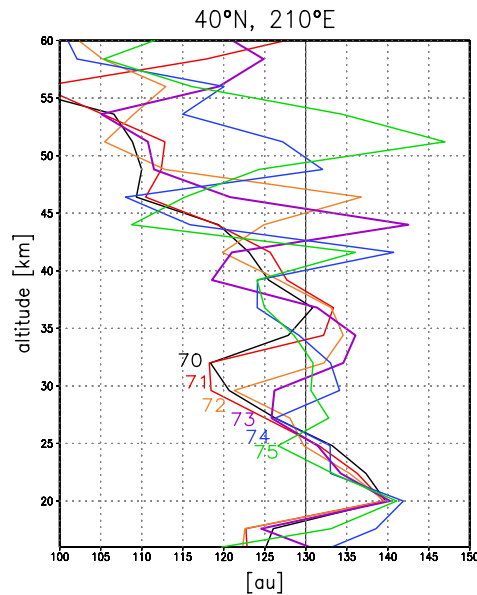


Abbildung 6.9. Vertikale Erstreckung des Cat Eyes an den Tagen 70–75.

Die hier untersuchten Cat Eyes haben ein räumliches Ausmaß von maximal $1/3$ der Hemisphäre und reichen maximal von 20° bis 65° N. Ein Cat Eye entsteht innerhalb einer Woche, kann bis zu einer Woche lang bestehen und löst sich in etwa zwei Wochen auf. Dabei findet irreversible Durchmischung sowohl von polaren Luftmassen als auch von Luftmassen tropischen Ursprungs statt. Es besteht eine gute Übereinstimmung zu dem in den CRISTA- und ATMOS-Messungen beobachteten Cat Eye (siehe Kapitel 2).

6.4 Prozessstudien

In diesem Abschnitt sollen die auslösenden Prozesse der zuvor beschriebenen Phänomene analysiert und diskutiert werden. Bisher hat sich die Untersuchung dieses Kapitels auf die reine Beschreibung der Phänomene im Modell und den Vergleich zu Beobachtungen beschränkt. Jetzt sollen auch die verantwortlichen Prozesse, wie z.B. die Horizontalkomponenten des Windes (u und v), welche die Advektion der Spurengase herbeiführen, sowie der Zusammenhang mit dem Auftreten planetarischer Wellen, die z.B. die Bildung des Aläutenhochs oder die Verschiebung des Polarwirbels verursachen, untersucht werden.

Tropische-Subtropische Streamer

In Abb. 6.10 sind die verantwortlichen Winde, die zur Bildung des Atlantik-Streamers führen, zusammen mit dem passiven Tracer, der schon in Abb. 6.1 gezeigt wurde, für

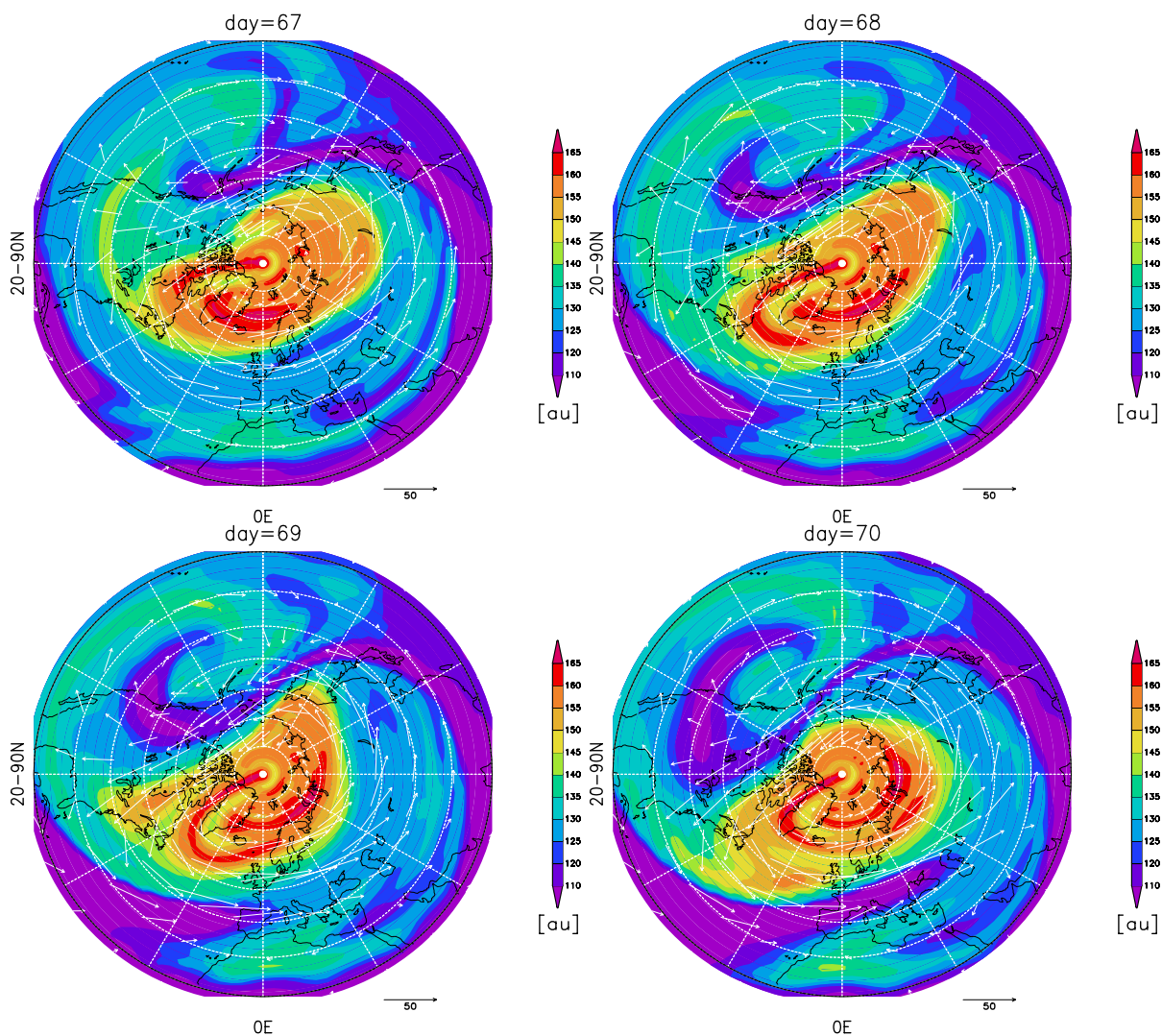


Abbildung 6.10. Passiver Tracer (au) wie Abb. 6.1 mit Windvektoren unterlegt, 1 Pfeileinheitslänge entspricht 50 m/s, für die Tage 67–70 dargestellt.

den Zeitraum Tag 67–70 dargestellt. Zu Beginn der Entwicklung ist ein Westwind mittlerer Stärke über dem Atlantik zu erkennen, der in 30° N zwischen 50 und 30° W eine Südkomponente erhält, die sich in einer Ausbeulung der Tracerkontur in Richtung Norden bemerkbar macht. In den darauf folgenden Tagen verstärkt sich der Horizontalwind, vor allem der nordwärts gerichtete Meridionalwind v . Daraus resultiert eine Zunge tropischer Luftmassen, die aus den Tropen abgelöst und Richtung Nordosten advehiert wird. Ausschlaggebend für die Bildung des Atlantik-Streamers scheinen hier eindeutig die Verstärkung des zonalen Windes, aber vor allem eine signifikante Zunahme der Südkomponente des Meridionalwindes zu sein. Ab Tag 69, wenn der Tropische Streamer die mittleren Breiten kreuzt, erreicht er das Band starker Westwindjets. Der Streamer wird länger und dünner bis hin zu einer filamentartigen Struktur, die auf Grund der stetigen gleichmäßigen Strömung bis Tag 74 aufrecht erhalten bleibt. Danach beginnt eine

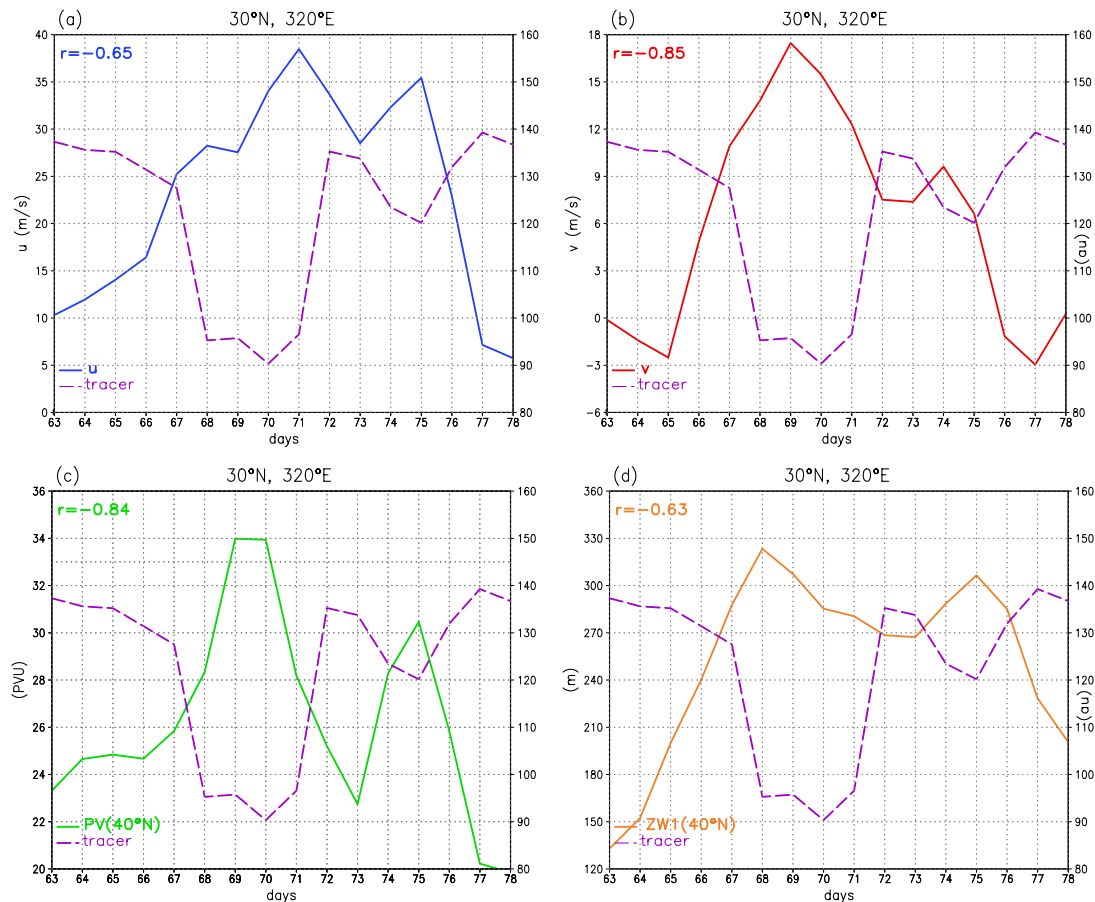


Abbildung 6.11. Zeitreihen (Tag 63–78) für den passiven Tracer (lila Kurve) und: oben links (a): den zonalen Wind (m/s), rechts (b): den meridionalen Wind (m/s); unten links (c) der PV (PVU) in 40° N, 320° E, rechts (d): der zonalen Wellenzahl 1 der geopotentiellen Höhe (m) in 40° N. Wenn nicht anders erwähnt, ist die Zeitreihe für den Gitterpunkt 30° N, 320° E dargestellt.

Periode mit transienter Dynamik (hier definiert als $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$) – der Polarwirbel beginnt rasch ostwärts zu rotieren – was zur Unterbrechung der stetigen Strömung führt und die Auflösung des Streamer-Filament Systems einleitet.

In Abb. 6.11 sind die Zeitreihen für den passiven Tracer in Korrelation mit relevanten Größen für einen Gitterpunkt (30° N, 40° W) dargestellt. Der Atlantik-Streamer tropischer Luftmassen kreuzt den Gitterpunkt ab Tag 67 und erreicht mit einem absoluten Minimum von 90 au am Tag 70 sein Zenit. Diesem Wert entsprechen Luftmassen, die ursprünglich vom Äquator kommen (Tag 68–71). Ab Tag 72 zieht er weiter Richtung Nordosten. Ein zweites Minimum von 120 au tritt am Tag 75 in Erscheinung, was nach Inspektion der Tracersequenz (Abb. 6.1) den Durchgang des Streamer-Filament Systems des Ostasien-Streamers kennzeichnet, der am Tag 76 mit dem Atlantik-Streamer verschmilzt. In dieser ausgesuchten Periode finden also zwei voneinander unabhängige Streamerdurchgänge über den hier ausgesuchten Gitterpunkt statt.

Zu der Tracerverteilung ist in Abb. 6.11a der zonale Wind aufgetragen und die Korrelation zwischen den beiden Zeitreihen berechnet worden. Die Entwicklung des Streamers geht mit einem antikorrelierten zonalen Wind einher, d.h. niedrige Tracerwerte fallen mit hohen zonalen Windgeschwindigkeiten zusammen. Die Übereinstimmung beträgt für den Korrelationskoeffizienten $r = -0,65$. Der Westwind verstärkt sich ab Tag 66 und erreicht sein Maximum am Tag 71 mit 38 m/s. Danach nimmt der Südwestwind ab, um erneut mit dem zweiten Streamerdurchgang am Tag 75 ein zweites Maximum von 35 m/s zu erreichen. Zum Ende der Entwicklung wird der Westwind in einem scharfen Übergang ab Tag 75 deutlich schwächer. Dagegen gibt es zwischen dem Meridionalwind v und dem passiven Tracer eine hohe negative Korrelation von $r = -0,85$ (Abb. 6.11b). Auch hier sind geringe Tracerwerte, gleichbedeutend mit aus Süden advehierten Luftmassen, mit zunehmendem Südwind korreliert. Zu Beginn werden an diesem Gitterpunkt Nordwinde gemessen, die dann ab Tag 65 zu Südwinden wechseln und ein Maximum am Tag 69 erreichen. Das Umschwingen von Nord- auf Südwind zusammen mit dem zunehmenden Betrag des zonalen Windes hat zur Bildung des Atlantik-Streamers geführt. In diesem Zusammenhang hat Marquardt (1998) in einer Fallstudie des März 1993 die Scherinstabilität als möglichen Mechanismus der Streamerbildung angeführt. Der Durchgang des zweiten Streamers am Tag 75 geht mit einer erneuten Verstärkung des Südwindes einher. Bei Betrachtung der Verschiebung des Polarwirbelrandes, hier in 40° N, 320° E mit 33 PVU markiert, herrscht eine ebenso gute Antikorrelation von $r = -0,84$ (Abb. 6.11c). Der Polarwirbelrand überstreicht den Gitterpunkt an den Tagen 69–70, in diesem Zeitraum entsteht der Atlantik-Streamer. Auch während des zweiten Streamer Durchgangs kommt es zu einem Maximum der PV an diesem Gitterpunkt. Die Verschiebung des Polarwirbels kann auch mit Hilfe der zonalen Wellenzahl 1 der geopotentiellen Höhe in 40° N ausgedrückt werden (Abb. 6.11d). In dieser Größe kommt es zu einer Antikorrelation mit dem Tracer, die mit $r = -0,63$ nicht ganz so deutlich ausfällt. Das Maximum der Wellenzahl 1 mit 320 m wird am Tag 68 in 40° N erreicht.

Auf Grund der hier dargestellten Quantitäten und deren zeitlichen Verlauf bzw. Korrelation mit dem Tracer kann die Schlußfolgerung gezogen werden, dass sich zeitgleich mit der Verlagerung des Polarwirbels Richtung Äquator, angeregt durch eine stärkere Wellenzahl 1, der meridionale Wind von Nord auf Süd dreht und sich gleichzeitig mit dem zonalen Wind verstärkt. Dieser Prozess geht mit einer starken horizontalen Windscherung einher. Dadurch entsteht der Atlantik-Streamer, der von den Winden Richtung Nordosten advehiert wird. Dieser Prozess wird bis etwa Tag 74 aufrecht erhalten, dann beginnt sich der Atlantik-Streamer aufzulösen (siehe Abb. 6.1). Die oben beschriebene Korrelation an einem ausgesuchten Gitterpunkt trifft aber auch für ein zweites unabhängiges Streamer Ereignis zu, das zu dem Ende des Ostasien-Streamers gehört. Am Tag 76–77 erreichen die Größen wieder ihren ursprünglichen Wert.

Tropische-Subtropische Streamer, die auch filamentartige Strukturen annehmen können, werden im Berliner T42-Modell durch die Advektion großskaliger Winde simuliert.

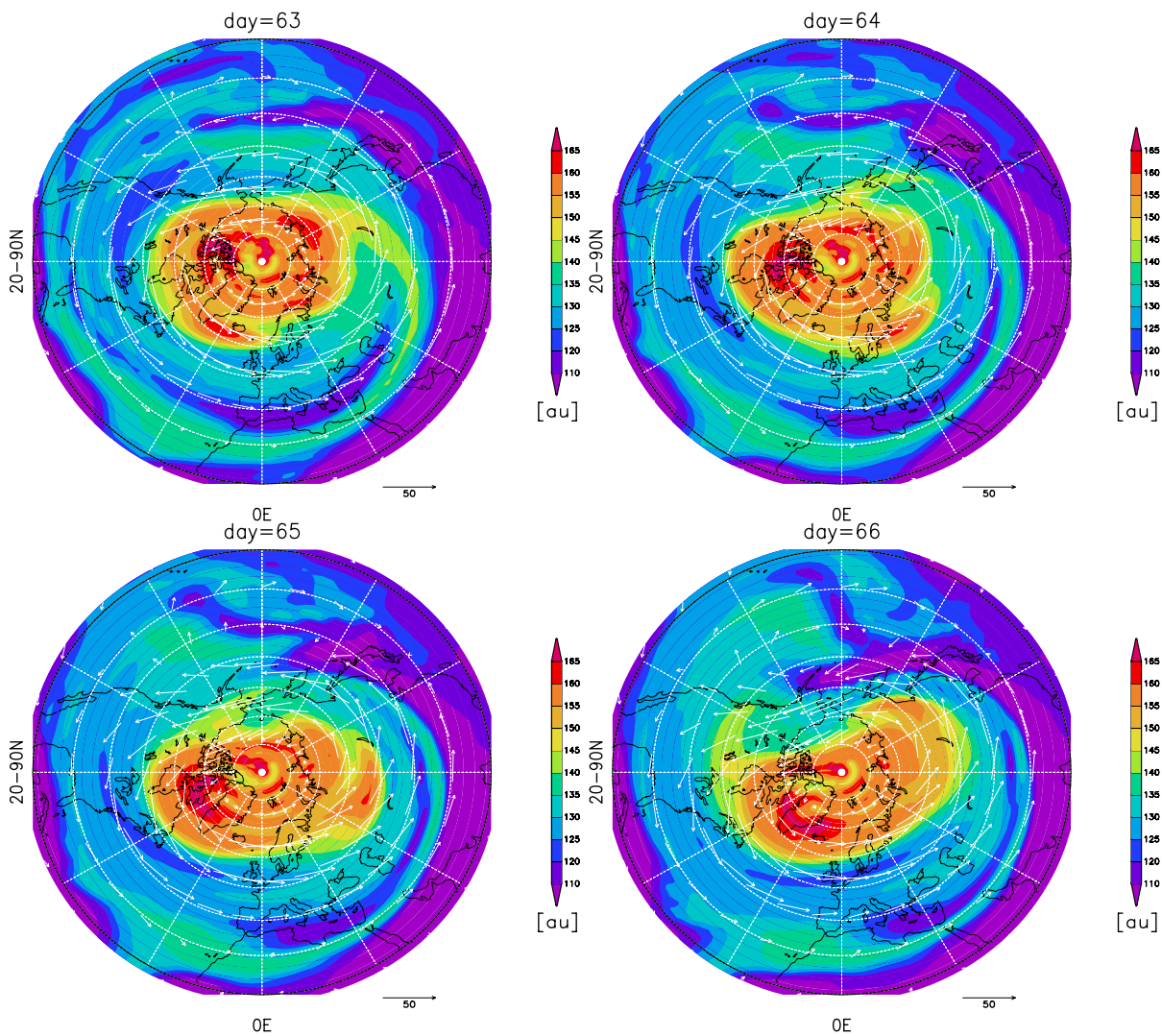


Abbildung 6.12. Wie in Abb. 6.10 für die Tage 63–66.

Polarwirbel Streamer

Um die Frage zu klären, wie eine Extrusion des Polarwirbels entsteht und ob sie immer simultan mit einer Intrusion des Polarwirbels auftritt, soll Abb. 6.12 helfen. Hier sind die Tage 63–66 dargestellt, die den zeitlichen Verlauf der Extrusion-Intrusion Struktur beleuchten. Wie man anhand der Windvektoren über dem Beringmeer erkennen kann, wird der Polarwirbelschweif bei der Entstehung nicht von den Winden herausgezogen. Die Entwicklung zu einer Extrusion, die nicht immer mit einer Intrusion zusammen fallen muss, kommt anscheinend dadurch zustande, dass der Tracer im äußersten Bereich des Polarwirbels den Rand durchdringt und nicht weiter mit dem Rest des Polarwirbels rotiert, sondern von der außerhalb des Polarwirbels langsameren Grundströmung erfasst wird und mit dieser weiterzieht. Die Polarwirbelbarriere ist nicht nur durch den stärksten Gradienten in der Wirbelstärke gekennzeichnet, sondern z.B. auch durch ein absolutes Windmaximum. Es entsteht ein Effekt im Spurengasbild, das quasi wie ein

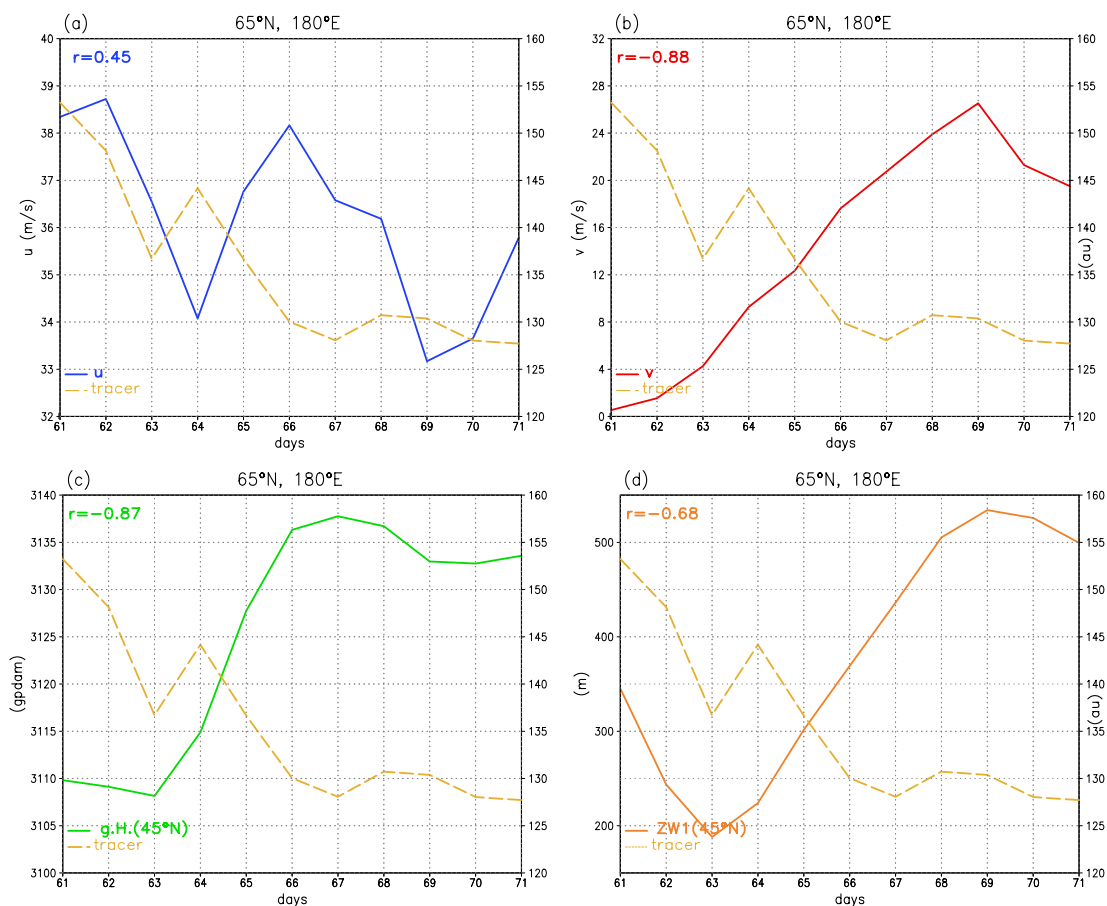


Abbildung 6.13. Zeitreihen (Tag 61–71) für den passiven Tracer (gelbe Kurve) und oben links (a): den zonalen Wind (m/s), oben rechts (b): den meridionalen Wind (m/s) in 65° N, 180° E, unten links (c): der geopotentiellen Höhe (gpdam) in 45° N, unten rechts (d): der zonalen Wellenzahl 1 der geopotentiellen Höhe (m) in 45° N. Wenn nicht anders erwähnt, ist die Zeitreihe für den Gitterpunkt 65° N, 180° E dargestellt.

„Herausziehen“ des Tracers von den großskaligen Winden aussieht. Das „Durchdringen des Randes“ wird hier durch das Eindringen von Luftmassen mittlerer Breiten in den Polarwirbel hinein verursacht, die die umgebenden polaren Luftmassen dann nach außen drücken, oder durch das Brechen kleinskaliger Wellen am Polarwirbelrand, die Filamente von Luftmassen aus diesem herauschälen (siehe Kapitel 2). Am Tag 64–65 werden Luftmassen mittlerer Breiten über Ostasien von den Winden zum Polarwirbel advehiert. Auf Grund einer sich von W auf W-SW drehenden Windkomponente werden diese Luftmassen in den Polarwirbelrandbereich hineingezogen. Die Verstärkung und Drehung des Windes hängt direkt mit der Bildung des Aläutenhochs zusammen und ist somit für den hier stattfindenden Prozess verantwortlich. In genügend weiter Entfernung von der Polarwirbelbarriere kann die so entstandene Extrusion des Polarwirbels von den Winden Richtung Süden gezogen werden (siehe Tag 66 über Kanada). Die Korrelation zwischen den sich verstärkenden Horizontalwinden (insbesondere den Südwinden) und dem passiven Tracer, ist in Abb. 6.13 für den Gitterpunkt (65° N, 180° E) dargestellt. Das

Extrusions Ereignis ist stark mit der Südkomponente des Meridionalwindes $r = -0,88$ antikorreliert. Hingegen weist der zonale Wind eine positive Korrelation von $r = 0,45$ auf, die aber von Tag 63–65, während des Durchgangs des Polarwirbel Streamers, auch deutlich antikorreliert ist mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = -1$. Eine sehr deutliche Korrelation von $r = -0,87$ zwischen der Entstehung der Polarwirbel Extrusion und der Verstärkung bzw. nordwärts Verlagerung des Aläutenhochs, dargestellt durch die geopotentielle Höhe in 45° N , 180° E , ist in Abb. 6.13c zu erkennen. Die Verlagerung des Aläutenhochs kann auch mit der zonalen Wellenzahl 1 (45° N) in Abb. 6.13d ausgedrückt werden. Hier fällt die Korrelation mit $r = -0,68$ nicht ganz so hoch aus.

Cat Eyes

Abschließend sollen in Abb. 6.14 die Horizontalwinde während einer Cat Eye Entwicklung dargestellt werden. Hier sind die Tage 71–74 ausgesucht worden, die den Zeitraum des Einrollens des Ostasien-Streamers in ein Cat Eye treffen. Über dem Ostpazifik ist

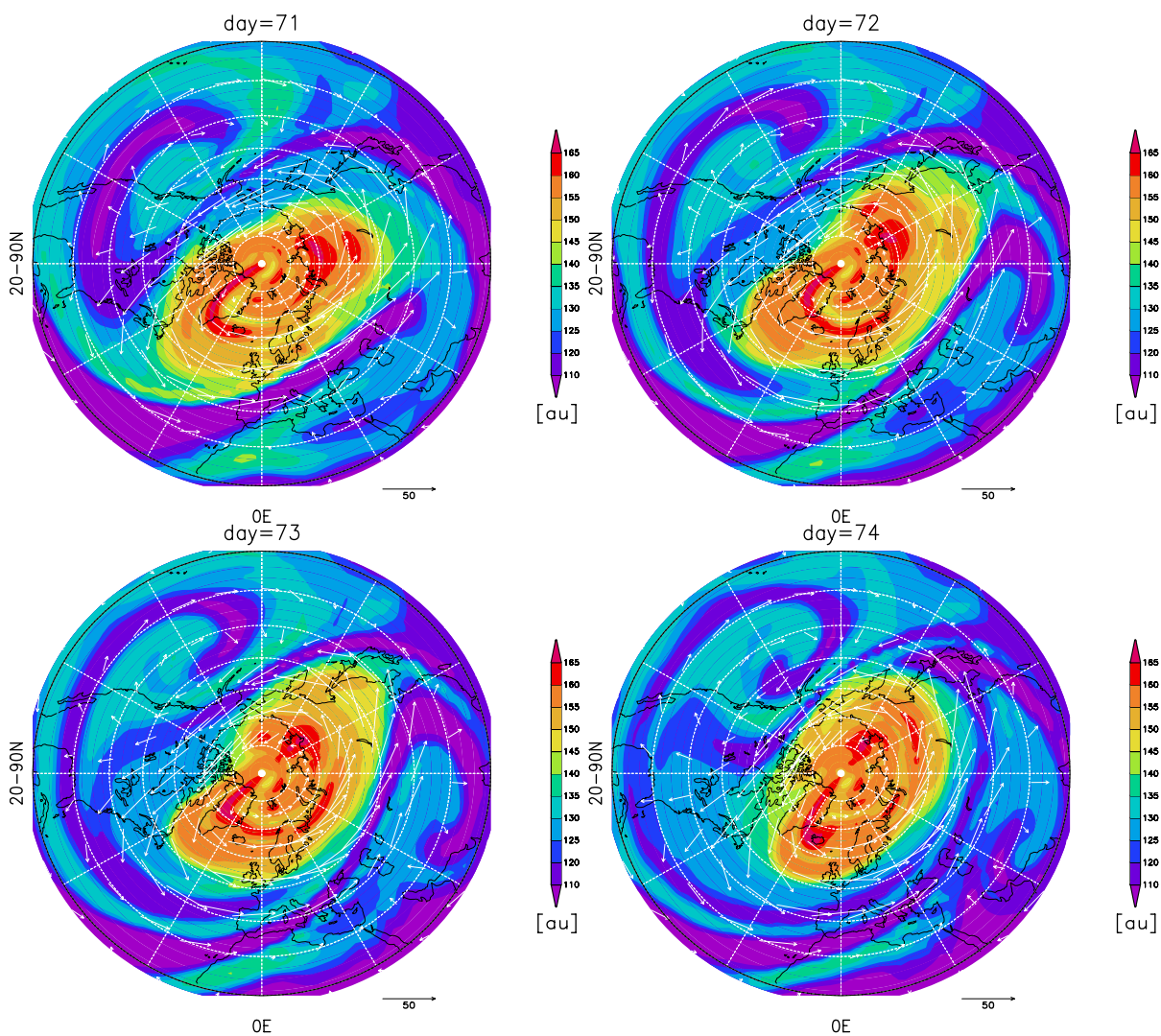


Abbildung 6.14. Wie Abb. 6.10 für die Tage 71–74.

deutlich das Rotieren der Luftmassen im Uhrzeigersinn um das Aläutenhoch zu erkennen. Das Einrollen in das Cat Eye bleibt aufrechterhalten, so lange der Grundstrom eine stetige Strömung besitzt (bis Tag 74). Ab Tag 74 beginnt der Polarwirbel ostwärts zu rotieren, die Zufuhr tropischer Luftmassen in das Aläutenhoch wird unterbunden. Dies führt gleichzeitig mit dem Verschwinden des Hochdruckgebietes zur Auflösung des Cat Eyes.

Im Zentrum des Streameransatzes über dem West Pazifik ist während der gesamten Zeit eine Konvergenzzone des Windes zu beobachten. In dieser Konvergenzzone entsteht der direkt nordwärts gerichtete Wind, der den Zufluss tropischer Luftmassen in das Streamer-Filament System hinein aufrechterhält. Dieser Asien-Streamer weist ein Bestehen von über drei Wochen auf. In der gesamten Zeit werden tropische Luftmassen von weniger als 110 au aufgelöst.

6.5 Zusammenfassung

Im Berliner Zirkulationsmodell werden eine Vielzahl von Transportphänomenen simuliert, die in Spurengasmessungen beobachtet werden. Es treten Tropische Streamer, Extrusionen und Intrusionen des Polarwirbels, die Entstehung und Auflösung von Cat Eyes sowie Mehrfach-Streamer in Erscheinung. In guter Übereinstimmung mit Beobachtungen können die charakteristischen Merkmale von Streamern in einem ausgesuchten Winter des Berliner Modells bestätigt werden.

Auch mit den grob aufgelösten Winden werden im Transportmodul feinere Strukturen aufgelöst, wie sich in Konturadvektionssimulationen im Vergleich zu Beobachtungen als realistisch herausgestellt hat (Methven und Hoskins, 1999). Dies zeigt sich auch im Vergleich zwischen einem passiven idealisierten Tracer und der potentiellen Vorticity, die generell eine gute Übereinstimmung aufweisen. Im Beispiel des Ostasien-Streamers stimmt die Feinstruktur der PV nicht gut mit der des Tracers überein. Hier ermöglicht das Semi-Lagrange'sche Transportschema einen sehr viel detaillierteren Spurengastransport, der gut mit einem ähnlichen Beispiel aus RT-Modellanalysen von Manney et al. (2001) übereinstimmt (siehe Abb. 2.15). Dieses Defizit ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die PV nur im Rahmen weniger Tage als konservativ betrachtet werden kann und sich somit für längere Advektionszeiträume vom Transport eines passiven idealisierten Tracers, der keine Quellen und Senken besitzt, unterscheiden muss. Außerdem wird die PV mit einem Modellzeitschritt von $t = 10 \text{ min}$ integriert und hat somit nicht das „Erinnerungsvermögen“ des passiven Tracers, der im Transportmodul mit $t = 4 \text{ h}$ advehiert wird.

Des weiteren fiel im Beispiel der Modellsimulationen auf, dass ein charakteristischer Unterschied in den Größenordnungen zwischen dem Atlantik-Streamer und dem Asien-Streamer besteht. Dieses Merkmal ist auch in Abb. 2.15 mit Hilfe von ATMOS-Messungen festgehalten worden (Manney et al., 2001), die im Vergleich zu den CRISTA-Messungen (Offerman et al., 1999) einen schmaleren Asien-Streamer als einen Atlantik-Streamer auflösen. Die Autoren erwähnen diesen Unterschied jedoch nicht.

Die Prozessstudie hat gezeigt, dass es einen qualitativen Zusammenhang zwischen dem

Auftreten von Antizyklonen, der Verschiebung des Polarwirbels zu niedrigeren Breiten und dem Auftreten von Streamern gibt. Die Untersuchung für den Atlantik-Streamer und den Polarwirbel Streamer zeigte eine hohe Korrelation zwischen stärkeren Südwinden, der Verschiebung des Polarwirbels zu niedrigeren Breiten und dem Auftreten eines Tropischen Streamers, bzw. einer Verstärkung und Drehung des Westwindes auf W-SW, der Entstehung und dem polwärts Ziehen des Aläutenhochs und dem Auftreten einer Intrusion-Extrusions Struktur. Damit besteht die Möglichkeit, einen entsprechenden Gradienten in der Windströmung zu erzeugen und eine notwendige Bedingung für das Entstehen von Streamern zu schaffen (Marquardt, 1998). Cat Eyes wurden im Zusammenhang mit dem Auftreten von Hochdruckzellen simuliert.

Die hier besprochenen Streamer bzw. Cat Eyes bleiben bestehen, so lange ein gleichmäßiger stetiger Grundstrom vorherrscht. Während einer sich zeitlich verändernden Dynamik des Polarwirbels lösen sich die schon vorhandenen Transportstrukturen wieder auf.