

Kapitel 5

Match-Kampagnen zur Messung chemischen Ozonabbaus

Im Abschnitt 3.5 wurde geschildert, welche Probleme der Nachweis chemischen Ozonabbaus aus Messungen bereitet, die im Eulerschen Sinne, d.h. an einem festen Ort durchgeführt werden, an welchem die Luftmassen vorbeiströmen. Von Rex [1993] und von der Gathen et al. [1995] wurde daher ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, Eulersche Messungen in einem quasi Lagrangeschen Sinne auszuwerten, wenn eine genügende Dichte von Eulerschen Messungen vorliegt. Das Lagrangesche System bewegt sich mit infinitesimalen Luftmassen mit, so daß Advektionsterme in ihm nicht auftreten. Die quasi Lagrangesche Formulierung [Rex, 1993] knüpft die Bewegung des Systems demgegenüber an die Bewegung von größeren Luftpaketen, wobei der Geschwindigkeitsvektor des Luftpakets definiert wird als das Volumenintegralmittel der Geschwindigkeitsvektoren im Paket. Eine theoretische

Betrachtung über die Form der Kontinuitätsgleichung in quasi Lagrangescher Formulierung und die bei dieser Formulierung auftretenden Diffusionsterme wird in [Rex 1993] gegeben. In der vorliegenden Arbeit wird eine Weiterentwicklung dieser Methode, chemische Ozonverluste zu detektieren, beschrieben. Bei der Weiterentwicklung werden nun Messungen im quasi Lagrangeschen Sinne durch aktive Planung durchgeführt. Dabei werden Paare von Ozonmessun-

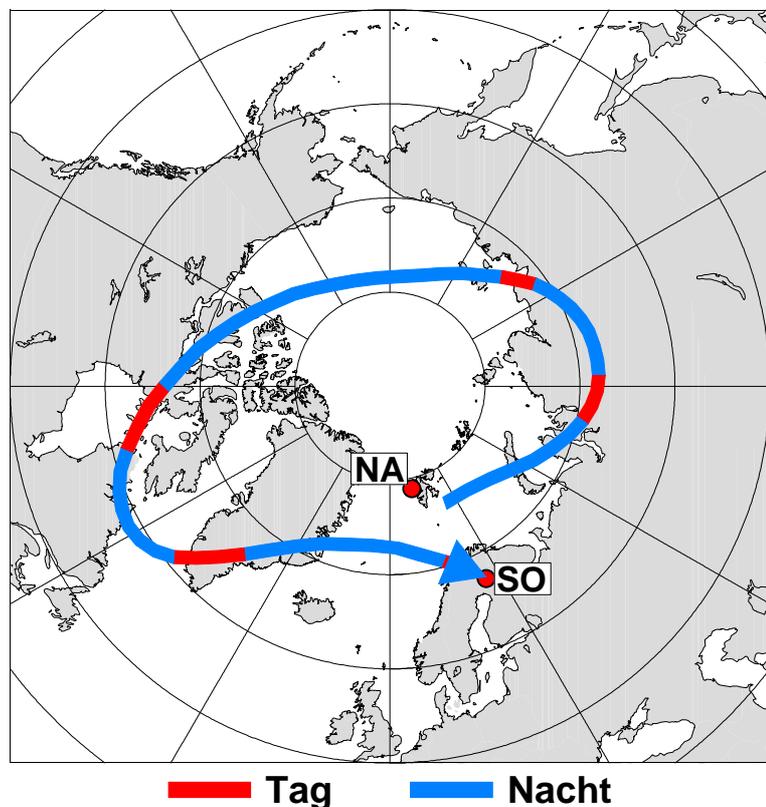


Abbildung 5.1: Beispiel eines Luftpakets, welches zunächst am 24.1.1992 von einer Ozonsonde bei Ny-Ålesund beprobt wurde und fünf Tage später nach einer Umrundung des Polarwirbels ein zweites Mal bei Sodankylä von einer Sonde durchflogen wurde. Die rot/blau Linie gibt die Trajektorie des Luftpakets an. Bereiche, in denen das Luftpaket von der Sonne beschienen wurde sind rot dargestellt.

gen in einem zeitlichen Abstand von einigen Tagen in jeweils derselben Luftmasse plaziert. Da die Luftmasse sich zwischen den beiden Messungen mit der stratosphärischen Strömung mitbewegt, müssen die beiden Messungen im allgemeinen an verschiedenen Orten durchgeführt werden. Abbildung 5.1 zeigt ein Beispiel eines im Abstand von fünf Tagen zweimal beprobten Luftpakets. So ein Paar von Messungen im gleichen Luftpaket wird hier als Match (vom englischen Begriff 'zu einander passen') bezeichnet.

Der folgende Abschnitt 5.1 beinhaltet Betrachtungen über die für die quasi Lagrangesche Methode einsetzbaren Meßgeräte sowie eine Beschreibung der tatsächlich verwendeten Ozonsondenmessungen. In den Abschnitten 5.2 und 5.3 wird ein Überblick über die dieser Arbeit zugrundeliegenden Kampagnen gegeben, welche den Namen Match-Kampagnen erhalten haben. Wie die Match-Kampagnen im einzelnen durchgeführt wurden, wird in dem längeren Abschnitt 5.4 beschrieben. Nach den Kampagnen erfolgte jeweils eine umfassendere Neuberechnung der Match Ereignisse. Das Vorgehen dabei wird in Abschnitt 5.5 erläutert.

5.1 Geeignete Meßgeräte für Match

Die lagrangesche Methode läßt sich prinzipiell mit einer Vielzahl verschiedener Meßgeräte in die Praxis umsetzen. Dabei müssen jedoch zwei Grundvoraussetzungen beachtet werden. Erstens muß berücksichtigt werden, daß bei einem Verfahren, bei dem Differenzen zwischen zwei Meßwerten bestimmt werden sollen, die gegenüber der Meßgröße verhältnismäßig klein sind, eine hohe Anforderung an die Vergleichbarkeit der beiden messenden Geräte gestellt werden muß. Dies gilt natürlich insbesondere für eventuelle systematische Abweichungen der Geräte untereinander. Am besten geeignet sind also Geräte, die an vielen verschiedenen Orten auf der Erde absolut baugleich verwendet werden oder Satellitenmessungen, bei denen beide Messungen eines Matchpaares vom gleichen Instrument durchgeführt werden. Weiterhin muß wegen des großen vertikalen Windgradienten im Bereich des Polar Night Jets die verwendete Meßmethode eine ausreichende Höhenauflösung aufweisen. Jedes Verfahren, Ozonprofile zu messen, mittelt die tatsächliche Ozonkonzentration über einen gewissen räumlichen Bereich. Während die horizontale Auflösung bei vielen bodengestützten Verfahren sehr gut ist, weisen viele dieser Geräte nur eine begrenzte vertikale Auflösung auf, so daß im wesentlichen über eine gewisse vertikale Säule gemittelt wird. Dies ist zum Beispiel bei Lidarmessungen, Mikrowellenmessungen aber auch für Ozonsondenmessungen der Fall. Satellitenmessungen im Limb Modus mitteln zusätzlich auch über einen größeren horizontalen Bereich.

Ist die zunächst vertikale Säule zu groß, wird sie durch den vertikalen Windgradienten normalerweise schnell horizontal auseinandergezogen, so daß es keine Möglichkeit mehr gibt, sie nochmals mit einer Messung zu erfassen. Dies Problem zeigte sich sehr deutlich in einer Voruntersuchung, die für eine Flugzeugkampagne mit dem Airborne-Submillimeter-SIS-Radiometers (ASUR) durchgeführt wurde. Das Flugzeug war mit einem 600-700 GHz Empfänger ausgerüstet, der in der Lage ist, Ozon, ClO und BrO mit einer vertikalen Auflösung von einigen Kilometern zu messen. Es wurde untersucht, ob es möglich ist, zwei Flüge im Abstand einiger Tage durchzuführen und dabei jeweils die gleichen Luftsäulen zu beproben. Abbildung 5.2 zeigt das Ergebnis einer Trajektorienrechnung für einen möglichen Flugpfad am 7. Februar 1996. Bereits nach vierundzwanzig Stunden sind die während des ersten Flugs beprobten Luftsäulen über viele tausend Kilometer horizontal auseinandergezogen worden. Dieses für den äußeren Polarwirbel typische Beispiel zeigt die Schwierigkeiten, die mit der Anwendung des Matchprinzips auf Messungen von Instrumenten mit geringer Höhenauflösung verbunden sind.

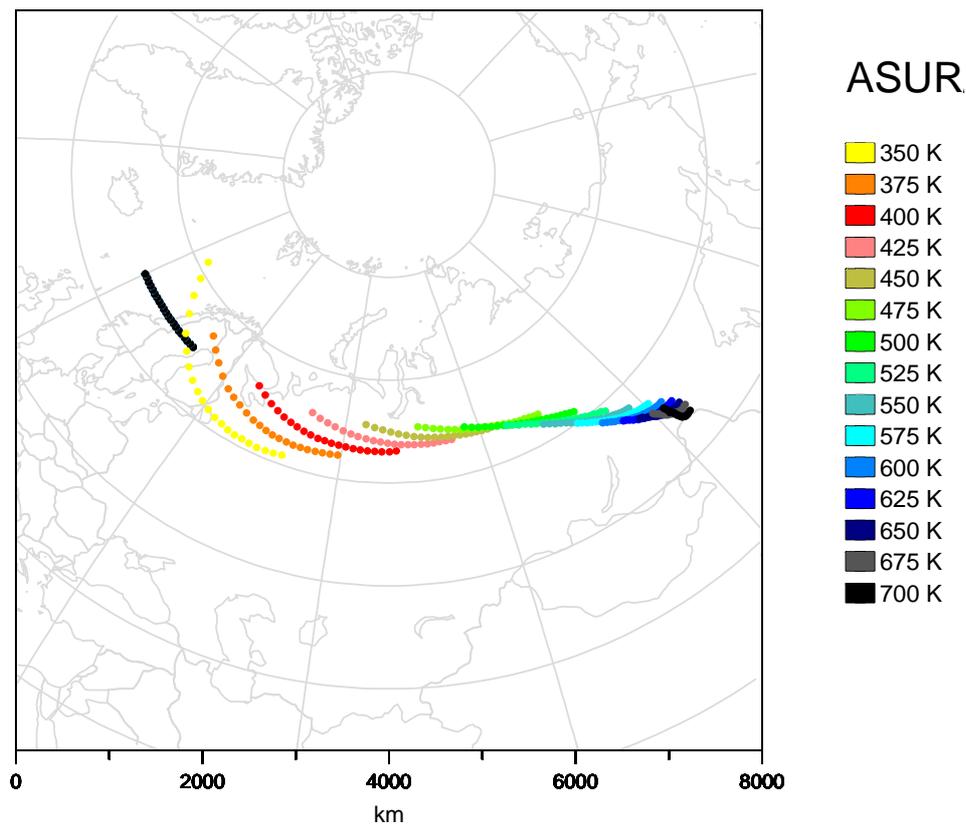


Abbildung 5.2: Zeitliches Auseinanderdriften der vertikalen Luftsäulen über einem hypothetischen Flugpfad eines Meßflugzeugs, das am 27. Februar 1995 mit 630 km/h ab 12:00 UT entlang des 65. Breitengrades zwischen 0° und 20° östlicher Länge fliegt. Der Flugpfad ist in der linken Bildhälfte schwarz eingezeichnet. Entlang von 21 vertikalen Säulen über diesem Flugpfad wurden jeweils im Höhenbereich 350 bis 700 K in 15 verschiedenen Niveaus Trajektorienrechnungen gestartet. Die Orte dieser Trajektorien am 28. Februar um 12:00 UT (also ca. 24 Stunden später) sind farbig eingezeichnet, wobei jede Farbe einem Niveau entspricht (siehe Legende am rechten Bildrand). Die für jedes Niveau am weitesten westlich gelegenen Punkte sind dabei die Luftpakete, die zuvor vertikal über dem westlichsten Punkt des Flugpfads gelegen haben. Der horizontale Abstand dieser Punkte beträgt bereits nach 24 Stunden mehr als 5000 km.

Diese Schwierigkeiten sind allerdings nicht unbedingt unlösbar. Ein Ansatz im obigen Beispiel der ASUR Messungen wäre zum Beispiel, sich statt auf Ozon auf Substanzen zu konzentrieren, die ein scharfes vertikales Maximum aufweisen, dessen Lage durch andere Informationen in etwa bekannt ist, und deren durch chemische Prozesse bedingte Variation wesentlich schneller abläuft, als dies beim Ozon der Fall ist. Im vorliegenden Beispiel bietet sich hierfür ClO an. Das in einer größeren Säule von dem Radiometer gemessene ClO ist sehr wahrscheinlich größtenteils auf den kleineren Bereich konzentriert, der zuvor von PSCs prozessiert worden ist. Wenn durch zusätzliche Informationen (wie etwa die Temperaturentwicklung entlang von Rückwärts-trajektorien) die Höhe dieses Bereichs ermittelt werden kann, braucht nur die Bewegung dieses kleineren vertikalen Bereichs mit Trajektorien verfolgt zu werden. Da die chemisch bedingte Änderung der ClO-Konzentration bei Sonnenuntergang oder Sonnenaufgang durch die schnelle Bildung (bzw. Photolyse) von Cl_2O_2 sehr schnell ist, reicht es, wenn zwischen beiden Messungen nur wenige Stunden liegen, während derer die Sonne unter oder auf gegangen ist. Unter diesen Voraussetzungen erscheint der erfolgreiche Einsatz von Match zur Messung chemisch bedingter Änderungen durchaus auch mit Radiometermessungen möglich.

Lidarmessungen weisen je nach Gerät und Integrationszeit im Bereich des Ozonmaximums üblicherweise eine Höhengauflösung um eintausend Meter auf. Dieser Wert ist deutlich kleiner als die Höhengauflösung von Radiometermessungen und ein Lidar-Match erscheint durchaus möglich zu sein. Da sich jedoch alle an den verschiedenen Stationen betriebenen Lidar-Geräte in ihrem Aufbau beträchtlich voneinander unterscheiden, könnten eventuelle systematische Abweichung der Messungen voneinander zu zusätzlichen Problemen führen. Die Möglichkeiten des Einsatzes von Lidar Geräten für Match werden derzeit von J. Steger am AWI untersucht.

Sollen Satellitendaten mittels Match analysiert werden, hat man es in der Regel neben einer begrenzten Höhengauflösung auch mit einer Mittelung über einen größeren horizontalen Bereich zu tun. Der Bereich, der von jedem Meßpunkt erfaßt wird, hängt von der Geometrie der Satellitenmessung ab. Profilmessungen von Satelliten werden in der Regel in der Limb Geometrie durchgeführt, die entlang des Beobachtungspfads zwischen Sonne und Satelliten etwa über 300 km horizontal mittelt. In solchen Fällen müssen Trajektorien auf der Oberfläche des von jedem Meßpunkt erfaßten Volumens gestartet werden. Nur Fälle, in denen dieses Volumen während des Transports nicht zu sehr auseinandergezogen wird, können mit der Match-Methode ausgewertet werden. Versuche, solch eine Auswertung mit POAM Daten durchzuführen, erwiesen sich wegen dieser Einschränkung als sehr schwierig und ergaben bis jetzt noch keine Ergebnisse [Deniel, 1996].

Die vorliegende Arbeit beruht auf Messungen mit elektrochemischen Ozonsonden. Diese sind für Messungen des chemischen Ozonabbaus mittels des Matchprinzips besonders gut geeignet, da sie eine sehr gute vertikale Auflösung aufweisen und nahezu baugleich in einem weitgehend standardisierten Verfahren an vielen auf der Nordhemisphäre verteilten Stationen gestartet werden können. Sie können flexibel, von Sonnenlicht und Wetter unabhängig, nach kurzer Präparation (siehe folgenden Abschnitt) jederzeit eingesetzt werden. Nur extreme Stürme können den Start einer Ozonsonde in Ausnahmefällen verhindern.

5.1.1 Funktion der Ozonsonden

Grundlage der vorliegenden Arbeit sind Ozonprofile, die von ballongetragenen Sensoren während des Aufstiegs gemessen werden. Das eingesetzte System besteht dabei aus einer Bodenstation, einer Radiosonde, dem Ozonsensor, einem Interface und dem Trägerballon. Die Materialkosten für einen Ozonsondenaufstieg belaufen sich zusammen auf etwa 1500 DM.

Als Trägerballone kommen dehnbare Latexballone oder bei sehr kalten stratosphärischen Temperaturen auch große, nicht dehnbare Plastikballone zum Einsatz. Die Ballone werden je nach Station mit Wasserstoff oder Helium befüllt, wobei die Füllmenge so gewählt wird, daß sich eine Aufstiegs geschwindigkeit von etwa 5 m/s ergibt. Das Gas im Ballon dehnt sich während des Aufstiegs aus und das Ende einer Sondierung wird in der Regel vom Platzen des Ballons bestimmt. Bei Plastikballonen ist die Sondierung beendet, wenn das Gas die von vorneherein sehr große Ballonhülle ausfüllt und sich nicht weiter ausdehnen kann. Der Ballon driftet dann in der Fläche gleicher Dichte weiter, in der die Luftdichte der nun konstanten Dichte im Ballon entspricht. Bei sehr kalten Temperaturen und besonders bei Aufstiegen im Dunkeln sind die Latexhüllen deutlich spröder als unter normalen Bedingungen und platzen häufig schon im Temperaturminimum, welches im hocharktischen Winter bei kaum ausgeprägter Tropopause in der unteren Stratosphäre liegt. Um bei sehr kalten Temperaturen auch mit den billigeren und wesentlich leichter handhabbaren Latexballonen befriedigende Gipfelhöhen zu erreichen, werden an einigen hocharktischen Stationen die Ballonhüllen vor dem Aufstieg lange vorgewärmt und in einem Benzin/Ölgemisch getränkt. Nach dem Platzen des Ballons fällt der Ozonsensor zur

Erde zurück. Um Gefährdungen in besiedelten Regionen auszuschließen ist er dort häufig mit einem Fallschirm versehen. Wird der Sensor zufällig aufgefunden, kann er meist wiederverwendet werden. Daher ist er in besiedelten Regionen mit der Adresse der startenden Institution und der Bitte um Rücksendung versehen. Manche mitteleuropäische Stationen erhalten so fast 50% ihrer Sensoren zurück und vielfach verwendete Sensoren sind dort keine Seltenheit. In arktischen Bereichen ist das zufällige Auffinden des Sensors sehr selten, obwohl es auch in Spitzbergen schon vorgekommen ist.

Die Bodenstation und die Radiosonde bilden eine aufeinander abgestimmte Einheit. Bei den an Match beteiligten Ozonsondenstationen kam dabei das System von Vaisala (Bodenstation DigiCORA oder MARWIN, Radiosonde RS 80-15E, RS80-15NE) zum Einsatz. Die Radiosonde mißt die meteorologischen Parameter Druck (P), Temperatur (T) und Feuchte (U) und mit Ausnahme der Sonde RS 80-15E auch ihre Position, aus der der Horizontalwind abgeleitet wird. Zur Positionsbestimmung wird die auf einem weltweiten Netz von Langwellensendern beruhende OMEGA Navigation verwendet, bei der die Position aus der relativen Phasenlage der einzelnen Langwellensignale untereinander bestimmt wird. Die geopotentielle Höhe der Sonde wird bei der Auswertung über die barometrische Höhenformel aus den PTU-Daten berechnet und bei Bedarf über das Gravitationsgesetz in die geometrische Höhe über dem Geoiden umgerechnet, wobei die Übereinstimmung zwischen beiden Höhen allerdings bis 50 km besser als 1% ist [Andrews et al., 1987]. Die eingesetzten Radiosonden sind im wesentlichen baugleich mit Geräten, die täglich weltweit hundertfach zur Wetterbeobachtung eingesetzt werden. Außer der Messung der meteorologischen Grundparameter übernimmt die Radiosonde auch die Radiübertragung der Meßgrößen zur Bodenstation. Die für Ozonsondenmessungen eingesetzten Radiosonden haben daher gegenüber den Standardgeräten einen weiteren Datenkanal, an den über ein Interface der Ozonsensor angeschlossen wird.

Während der Match-Kampagnen wurden vorwiegend ECC (Electrochemical Concentration Cell) Ozonsensoren verwendet, wobei nur die Stationen Uccle, Payerne und Hohenpeißenberg mit der Verwendung von Brewer-Mast Sonden eine Ausnahme bildeten, um nicht die an diesen Stationen existierende langjährige Reihen zu unterbrechen. Als ECC Sensoren wurden die Typen ECC5a von Science Pump, die u. a. von Vaisala vertrieben werden, und 1ZECC von ENSCI Corporation verwendet. Die verschiedenen Typen sind untereinander im wesentlichen baugleich. Smit et al. [1996] zeigten, daß die verwendeten ECC Sondentypen untereinander keine signifikanten systematischen Unterschiede aufweisen. De Backer et al. [1995] zeigten, daß die aus den Brewer-Mast Sondendaten gewonnen Ozonprofile bei Verwendung des benutzten Auswertverfahrens, welches höhenabhängige Korrekturfaktoren beinhaltet, zwischen 120 und 35 hPa keine signifikanten systematischen Unterschiede zu den Ozonprofilen von ECC Sonden aufweisen.

Abbildung 5.3 zeigt den schematischen Aufbau der ECC Ozonsensoren. Der Sensor besteht aus einer elektrochemischen Zelle und einer Pumpe, die einen definierten Luftstrom durch die eine Halbzelle erzeugt. Die Kathodenflüssigkeit besteht aus 1%-iger Kaliumjodidlösung. Sie ist mit dem System $\text{NaH}_2\text{PO}_4 / \text{Na}_2\text{HPO}_4$ auf pH 7 gepuffert. Die Anodenlösung ist mit Kaliumjodid gesättigt.

Wird ein Oxidationsmittel wie Ozon in die Kathode eingeleitet, wird dort Jodid zu Jod oxidiert:



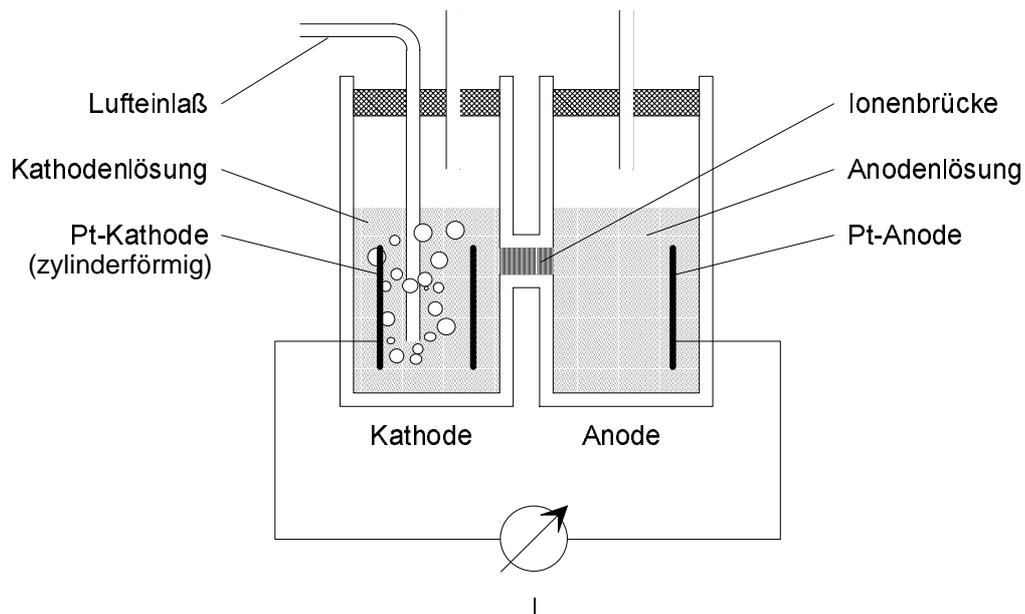


Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau des ECC Ozonsensors. Die Elektroden sind aus Platin.

Diese Reaktion läuft quantitativ ab. Durch die Pufferung bleibt der pH Wert der Kathodenlösung trotz des entstehenden OH^- relativ konstant. Die Menge des in dieser Reaktion entstandenen Jods wird elektrochemisch bestimmt. Die beiden Zellenreaktionen des Systems lauten:

In der Kathode:



In der Anode:



Somit fließen pro Ozonmolekül zwei Elektronen. Sie werden von einem empfindlichen Strommeßgerät gemessen. Da die Pumpe einen in erster Näherung konstanten Volumenstrom durch die Kathode erzeugt, ist der gemessene Strom proportional der Ozonkonzentration.

Bei der Pumpe handelt es sich um eine Kolbenpumpe, die von einem Synchronmotor mit konstanter Hubfrequenz betrieben wird. Daher ist das pro Zeiteinheit durch den Kolben durchgesetzte Volumen konstant. Im Pumpenkolben herrschen jedoch von der Außentemperatur abweichende Temperatur und Druckverhältnisse. Um den durch die Pumpe erzeugten Volumenstrom auf Außenbedingungen umzurechnen, wird die Temperatur im Sensor als Näherung für die Temperatur im Pumpenkolben gemessen. Die Druckdifferenz zwischen Außendruck und Druck im Pumpenkolben ist selbst eine Funktion des Außendrucks. Die dadurch verursachte Änderung der Pumpeneffektivität während des Aufstiegs wird in der Auswertung durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt [Komhyr, 1986].

Aus der Ansprechzeit des Ozonsensors auf Änderungen der Ozonkonzentration, die in der Größenordnung von 30 s liegt [Komhyr und Harris, 1971] und der Aufstiegeschwindigkeit von ca. 5 m/s ergibt sich eine vertikale Auflösung des gemessenen Ozonprofils von etwa 150 m. Der Sensor führt alle 0.1 s eine Messung aus. Über diese Daten wurde an den Stationen bei der Da-

tenreduktion gemittelt, wobei in der Regel alle 10 s ein Wert ausgegeben wurde. Einige wenige Stationen meldeten eine deutlich reduzierte Auflösung indem nur die Ozonmischungsverhältnisse an markanten Änderungen des Ozongradientens ausgegeben wurden. Weiterhin kommt es durch Ausfälle der Datenübertragung von der Sonde zur Bodenstation häufig zu größeren Lücken im gemeldeten Ozonprofil. Während der Auswertung wurde linear über $\log(p)$ zwischen den Meßpunkten des Profils interpoliert, wobei eine Interpolation über größere Lücken im Profil ausgeschlossen wurde (siehe Abschnitt 5.5.3).

Bei der Ozonmessung treten Querempfindlichkeiten zu SO_2 (reduziert entstehendes Jod in der Kathode) und zu NO_2 (oxidiert in der Kathode Jodid zu Jod) auf. Dabei führt SO_2 zu einer Unterschätzung des Ozonmischungsverhältnisses um ca. 0.93 ppbv pro ppbv SO_2 und NO_2 zu einer Überschätzung um ca. 0.0057 ppbv pro ppbv NO_2 [Grabbe, 1995]. Da die NO_2 -Mischungsverhältnisse in der polaren Stratosphäre im 1 ppbv Bereich liegen [Oelhaf et al., 1995] ist der von ihnen verursachte Fehler relativ zu einigen ppmv Ozon zu vernachlässigen. Der Einfluß von SO_2 auf Ozonmessungen ist bei Brewer-Mast Sonden größer als bei den ECC Typen [WMO, 1995, Abschnitt 1.3.1]. In der Stratosphäre kann er aber auch bei Brewer-Mast Sonden vernachlässigt werden [De Muer und De Backer, 1994].

Die Genauigkeit des ECC Ozonsensors ist vielfach untersucht worden (z.B.: Komhyr und Harris [1971], Aïmedieu et al. [1987], Beekmann et al. [1994], Kerr et al. [1994], Smit et al. [1996]). Aus den Ergebnissen dieser Arbeiten läßt sich für die untere Stratosphäre eine Genauigkeit der Ozonkonzentrationsmessung von etwa 5% ableiten [Vaisala, 1991].

Die Präparation der ECC Sonden für den Start wurde nach Vaisala [1991] durchgeführt. Sie verläuft in drei Schritten:

1. 3 Tage bis eine Woche vor dem Start wird die elektrochemische Zelle mit den Sensorlösungen befüllt.
2. Bis zu 24 Stunden vor dem Start werden u.a. die Lösungen ausgewechselt und die Pumpen- und Sensorcharakteristiken bestimmt. Diese Arbeiten dauern etwa 2 Stunden.
3. Direkt vor dem Start wird die Funktion der Sonde überprüft, konditioniert, die Nutzlast aus Ozonsensor, Interface und Radiosonde flugfertig gemacht und schließlich der Ballon befüllt. Für diese Arbeiten sollten 1.5 Stunden eingeplant werden.

Der zeitliche Ablauf der Sondenpräparation muß bei der Planung einer Matchkampagne berücksichtigt werden. Während der Kampagne müssen die Stationen je nach mittlerer Startfrequenz ständig ein bis drei nach Punkt 1 vorbereitete Sonden vorhalten. Um zu einem vorgegebenen Zeitpunkt eine Sonde starten zu können, muß eine rechtzeitige Benachrichtigung der Station mit ungefährender Angabe des Startzeitpunkts erfolgen, um die Vorbereitung nach Punkt 2 durchführen zu können. Diese Benachrichtigung sollte mindestens 24 Stunden vor dem Start geschehen, damit die Sondenvorbereitung in den Zeitplan der Station eingearbeitet werden kann. Die genaue Festlegung des Startzeitpunktes muß spätestens 1.5 Stunden vor dem Start erfolgen, damit genügend Zeit für die unmittelbare Startvorbereitung nach Punkt 3 zur Verfügung steht.

5.2 Match-Auswertung der Ozonsondendaten des Winters 1991/92

Das Matchprinzip wurde erstmals für eine Analyse der Ozonsondendaten eingesetzt, die während des European Arctic Stratospheric Ozone Experiments (EASOE) im Winter 1991/92 gemessen worden waren. Während der Kampagne wurden etwa 1200 Ozonsonden von 26 Stationen im arktischen Bereich und in nördlichen mittleren Breiten gestartet. Die Stationen sind in Anhang A zusammengefaßt. Ihre Lage kann aus Abbildung 5.4 entnommen werden.

Während EASOE fand kein Versuch einer Koordinierung der Ozonsondenstarts statt. Jede der beteiligten Stationen startete ihre Sonden nach einem unabhängigen Schema. Durch die große Anzahl der Ozonsonden konnten in einer Auswertung nach der Kampagne dennoch genügend zufällige Matche gefunden werden, um in einer statistischen Analyse daraus Ozonabbau bestimmen zu können. Das genaue Vorgehen bei der Auswertung dieser Kampagne ist in [Rex 1993] beschrieben.

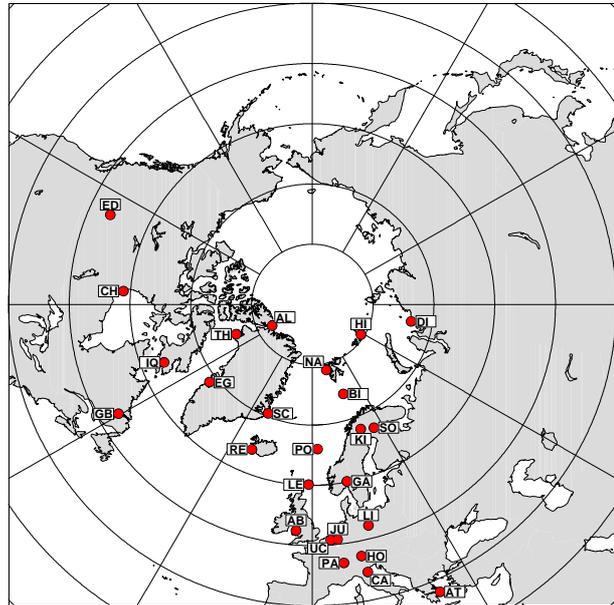


Abbildung 5.4: Ozonsondenstationen der EASOE Kampagne.

5.3 Koordinierte Match-Kampagnen in den Wintern 1994/95 und 1995/96

Im Winter 1994/95 fand das Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment (SESAME) statt, in dessen Rahmen auch etwa 1000 Ozonsonden zur Verfügung standen. Für SESAME wurde eine Echtzeitkoordinierung entwickelt, die Vorwärtstrajektorien mit einem Vorhersageanteil verwendet, um die Flugbahnen der von einer Ozonsonde beprobten Luftpakete zu bestimmen und vorherzusagen. Diese Ozonsonde wird 'erste Sonde' genannt. In Fällen in denen ein bereits beprobtes Luftpaket sich einer der beteiligten Stationen annäherte, wurde eine Startaufforderung an diese Station gesandt. Diese koordinierte Sonde wird hier 'zweite Sonde' genannt.

Mit den meteorologischen Daten des EASOE Winters wurde eine Vorstudie angefertigt, um die Wahrscheinlichkeit solcher Annäherungen abzuschätzen. Da die Erkenntnisse aus der Vorstudie eine große Anzahl möglicher Match Ereignisse erwarten ließen und wegen der ermutigenden Ergebnisse der EASOE Match-Auswertung [Rex, 1993; von der Gathen et al., 1995] konnten alle an SESAME beteiligten Ozonsondierungsstationen sowie weitere fünf kanadische Stationen (zusammen 35 Stationen) zur Teilnahme an der ersten Match-Kampagne gewonnen werden.

Nach erfolgreichem Einsatz der Match-Koordinierung während SESAME und Präsentation der vorläufigen Ergebnisse im Frühjahr 1995 [Rex et al., 1995a] war eine große Anzahl von Ozonsondenstationen bereit, ihre aus nationalen Quellen finanzierten Ozonsonden für eine weitere

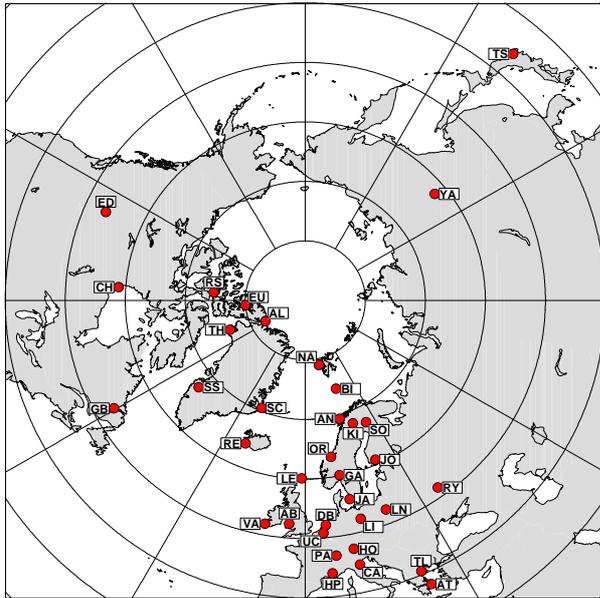


Abbildung 5.5: Ozonsondenstationen, die an Match94/95 teilgenommen haben.

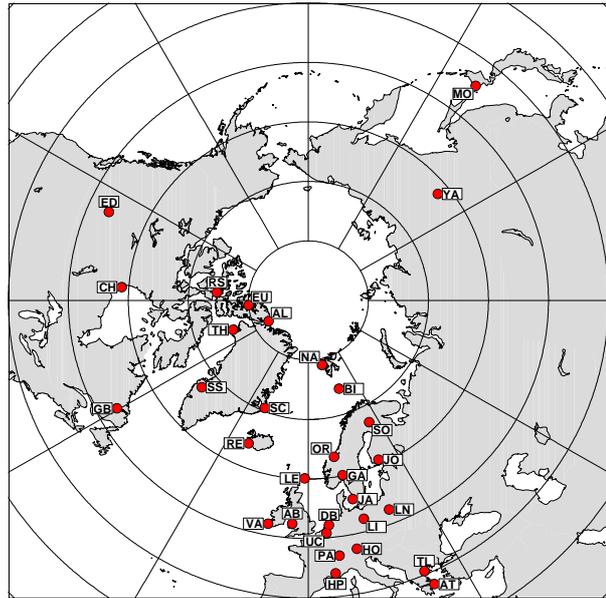


Abbildung 5.6: Ozonsondenstationen, die an Match95/96 teilgenommen haben.

Match-Kampagne im Winter 1995/96 zur Verfügung zu stellen. Zusammen mit Restbeständen aus dem Vorwinter standen so insgesamt für den Winter 1995/96 etwa 600 Ozonsonden für Match zur Verfügung.

Die Fortführung des Match Projekts im Rahmen der Europäischen Ozonforschung ist derzeit bis zum Winter 1998/99 durch Finanzierung der Europäischen Gemeinschaft gesichert. Das Projekt OSDOC (Ozone Sondes as a Tool for Detection of Stratospheric Change) läuft zur Zeit und beinhaltet als Kernexperiment eine Match-Kampagne 1996/97 welche eventuell durch eine kleinere im Winter 1997/98 ergänzt wird. Kürzlich wurde die Finanzierung des Projektes THE-SEO-O₃-loss im Rahmen von THESOE (Third European Stratospheric Experiment on Ozone) zugesagt. Dieses Projekt sieht eine umfangreiche Match Studie im Winter 1998/99 vor.

Die Koordination der Ozonsondenstarts der Match-Kampagnen bedingt, daß die beteiligten Stationen ihre Starts nicht wie bislang zu bestimmten Standarduhrzeiten durchführen können, sondern in der Lage sein müssen, flexibel auf Startanforderungen zu reagieren. Viele Stationen waren während der Kampagnen rund um die Uhr an allen Wochentagen (einschließlich Wochenenden und Feiertagen) in Startbereitschaft. Andererseits gab es auch an einigen Stationen Einschränkungen der Zeiten, in denen Starts vorgenommen werden konnten. Zu den Gründen für diese Einschränkungen zählte in erster Linie die Verfügbarkeit von Personal, aber auch Einschränkungen durch die erforderliche Freigabe des Luftraums über der Station durch die jeweilige Flugaufsichtsbehörde. Im einzelnen sind die teilnehmenden Stationen und die jeweiligen Startbereitschaftszeiten in Anhang A zusammengefaßt.

Die Lage der Stationen für beide Kampagnen kann aus Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 entnommen werden.

Im Winter 1994/95 wurde als Teil der Hauptkampagne eine gesonderte Koordination von einigen Matches durchgeführt, die zur Untersuchung von Prozessen innerhalb von Lamina-Strukturen eingesetzt wurden. Für diesen Zweck wurden Trajektorien jeweils genau im Minimum

oder Maximum einer Lamina-Struktur initialisiert und im weiteren Verlauf mehrere weitere Sonden erneut in diese Luftmasse plaziert. Obwohl sich aus diesen Matches wegen systematischen Effekten von Diffusion oder Trajektorienfehlern keine quantitativen Aussagen machen lassen, konnten zusammen mit einer chemischer Modellierung entlang der Trajektorien neue Erkenntnisse über die Entwicklung und Bedeutung dieser Lamina-Strukturen gewonnen werden. Da eine Beschreibung dieser Teilkampagne und ihrer Ergebnisse sehr weit vom eigentlichen Inhalt der vorliegenden Arbeit weg führen würde, wird hier darauf verzichtet. Dieser Teil der Kampagne erfolgte auf Anregung und in Zusammenarbeit mit Steve Reid. Eine Beschreibung und die Ergebnisse findet sich bei Reid et al. [1997].

5.4 Koordinierung während der Match-Kampagnen

Bei der Durchführung einer Match-Kampagne wurden folgende Ressourcen verschiedener Institutionen genutzt:

- Die Ozonsondenaufstiege aller beteiligter Institutionen.
- Meteorologische Analyse- und Vorhersagedaten des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) in Reading sowie Datenprozessierung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Offenbach.
- Trajektorienrechnungen des Meteorologischen Instituts der Freien Universität Berlin (FU).
- Eine zentrale Datenbank am Norwegian Institute for Air Research (NILU) in Kjeller/Oslo.

Zur Auswertung wurden weiterhin verwendet:

- Diabatische Erärmungsraten der Universität Cambridge.

Die Darstellung des komplexen Ablaufs einer Match-Kampagne erfolgt hier in drei Abschnitten. Abschnitt 5.4.1 gibt einen allgemeinen Überblick über die zur Koordinierung einer Kampagne nötigen Arbeitsschritte und Kommunikationsabläufe. Im Abschnitt 5.4.2 wird detaillierter erläutert, welche automatisierten Prozeduren zur Steuerung der Kampagne eingesetzt wurden und wie diese ineinandergriffen. Abschließend wird im Abschnitt 5.4.3 das Zustandekommen eines Matches an einem Beispiel in chronologischer Reihenfolge zusammengefaßt.

5.4.1 Kampagnenablauf

Jede Ozonsondenstation meldete einen erfolgreichen Start baldmöglichst nach Abschluß der Sondierung der Match-Koordinierung. Dies geschah in vielen Fällen, indem die vollständigen Datensätze der Sonde zu der zentralen Datenbank am NILU übertragen wurden. Aufgrund nicht ausreichender Kapazität der Kommunikationsleitungen sandten einige abgelegene Stationen nur die Daten, die für die Koordinierung der Kampagne am wichtigsten sind (Startzeitpunkt, Aufstiegsgeschwindigkeit, erreichtes Niveau), per e-mail oder fax direkt zur Match-Koordinierung an das AWI.

Der Aufstiegsfad der Sonden wurde in den meisten Fällen aus den Winddaten integriert, die von der Ozonsonde gemessen wurden (näheres siehe Abschnitt 5.5.1.1). In den Fällen, in denen die vollständigen Daten der Sonde während der Kampagne nicht übermittelt werden konnten, und für Sonden, die ohne Windmeßeinrichtung gestartet wurden (etwa 30% der Aufstiege) wurden zunächst vertikale Aufstiege angenommen.

Entlang des Aufstiegsfad jeder Ozonsonde wurde in festen Höhenniveaus die Berechnung von Gruppen diabatischer Vorwärtstrajektorien gestartet. Diese Trajektorien wurden dann jeweils über einen Zeitraum von neun Tagen täglich mit den jüngsten EZMW Daten verlängert. Auf diese Weise wurde ein Pool von bekannten, bereits einmal beprobten Luftpaketen gebildet, deren Bewegungen von dem Match-Koordinierungsapparat überwacht wurde. An jedem Tag kamen jeweils die Trajektorien der während der letzten 24 Stunden gestarteten Ozonsonden zusätzlich dazu, während die Trajektorien der Sonden, die vor mehr als neun Tagen gestartet worden waren, wieder aus der Überwachung herausgenommen wurden. An typischen Tagen während der Match-Kampagne 1994/95 lag die Anzahl der Luftpakete, die aktuell überwacht wurden, üblicherweise bei einigen hundert. Mit den Trajektorien wurden nicht nur die aktuellen Positionen der Luftpakete beobachtet, sondern auch ihre Bahnen während der jeweils nächsten zwei Tage vorhergesagt.

Näherte sich eines der überwachten Luftpakete während des Vorhersagezeitraums einer der beteiligten Stationen, wurde diese Station mindestens 24 Stunden vor dem vorausberechneten optimalen Startzeitpunkt informiert und gebeten, eine Ozonsonde vorzubereiten. Die zu diesem Zeitpunkt an die Station gesandte Nachricht wird hier als 'Alert' bezeichnet.

Die Berechnung des optimalen Startzeitpunkts berücksichtigte dabei auch den für diese Station gültigen Startbereitschaftszeitraum und die abgeschätzte Zeit, die die Sonde während des Aufstiegs benötigen würde, um das Niveau des Luftpakets zu erreichen. Als erwartete Aufstiegs geschwindigkeit wurde dabei die Standardaufstiegsgeschwindigkeit von 5 m/s verwendet. Kurz vor dem vorausberechneten optimalen Startzeitpunkt wurde der Start noch einmal bestätigt und eine neue optimale Startzeit übermittelt, die dann auf den jüngsten Vorhersagen beruhte. Die zu diesem Zeitpunkt an die Station geschickte Nachricht wird hier 'Confirmation' genannt. In etwa 10% der Fälle mußten die Startvorbereitungen zu diesem Zeitpunkt abgebrochen werden, da die neuen Vorhersagen einen Start nicht mehr sinnvoll erscheinen ließen. Neben der optimalen Startzeit wurde noch ein Startfenster angegeben, welches der Station mitteilte, in welchem Zeitraum ein Start noch sinnvoll wäre, falls ein Start zu dem optimalen Startzeitpunkt ausnahmsweise nicht möglich sein sollte. Das Startfenster gibt den Zeitraum an, während dessen ein Start zu einer Messung in einer bestimmten Umgebung um das Luftpaket herum führen würde. Demzufolge hängt die Länge des Startfensters von der Entfernung der nächsten Annäherung des Luftpakets an die Station und von der Geschwindigkeit des Luftpakets ab. An typischen Tagen während der Hauptzeiten der Kampagnen wurden um 10 bis 15 Alerts und Confirmations ausgegeben.

5.4.2 Prozeduren zur Steuerung der Kampagne

Die Anzahl der überwachten Luftpakete und die pro Tag stattfindenden Annäherungen dieser Pakete an beteiligte Stationen macht es notwendig, daß das Auffinden dieser möglichen Matchereignisse vollständig automatisiert wird. Um die Kampagne handhabbar zu machen, müssen diese Ereignisse zusammen mit allen Parametern, die zu ihrer Beurteilung nötig sind, täglich automatisch in übersichtlichen Listen ausgegeben werden. Nur die darauf folgende Auswahl

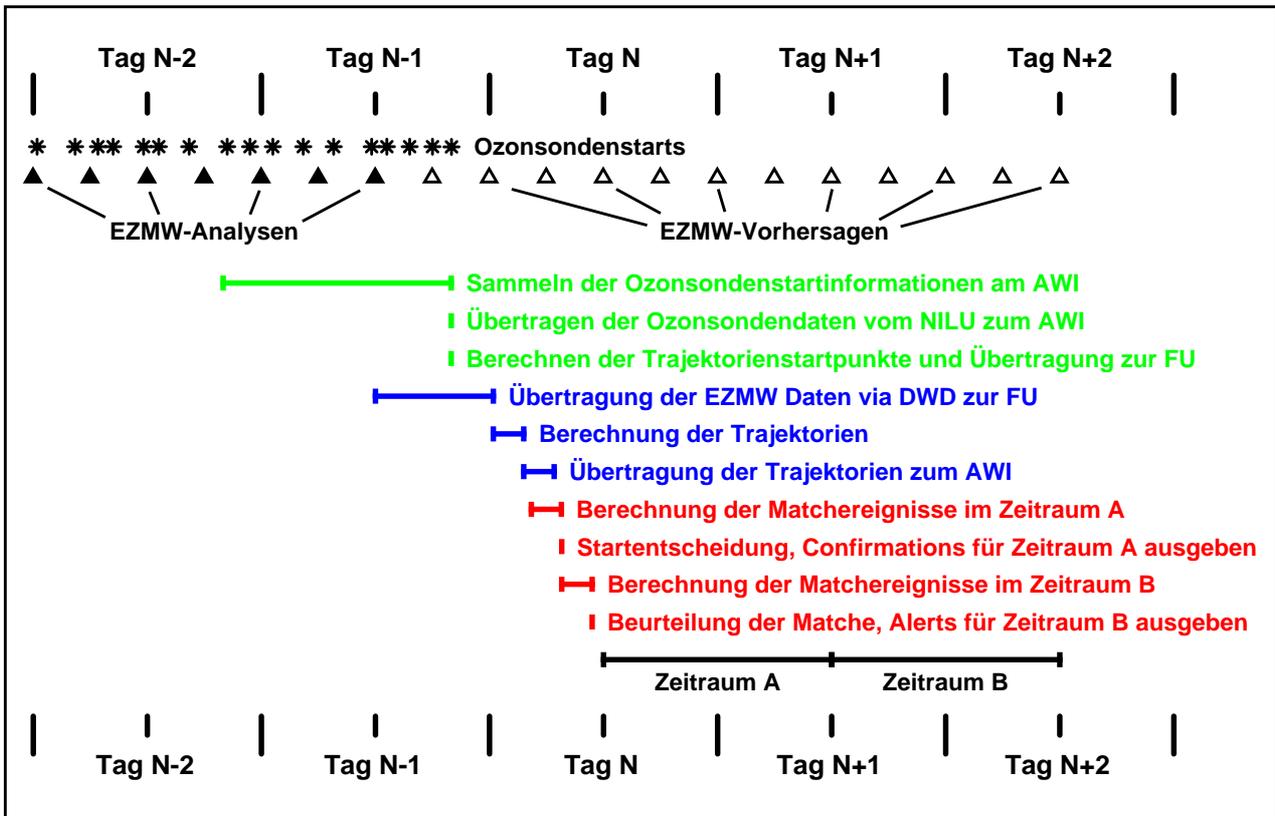


Abbildung 5.7: Zeitdiagramm des Kampagnenablaufs. Die horizontale Richtung stellt eine Zeitachse dar, wobei außer dem Kampagnentag N noch die beiden vorherigen und darauffolgenden Tage dargestellt sind. Die Sterne am oberen Bildrand geben die Ozonsondenstarts an, die am Tag N-1 um 23:00 UT bekannt waren. Die ausgefüllten Dreiecke geben die Zeitpunkte der EZMW Analysen an, auf denen die Trajektorienrechnungen des Tags N beruhen. Die hohlen Dreiecke geben analog die Zeitpunkte der EZMW Vorhersagen an. Die Zeiträume der einzelnen Koordinierungsschritte sind farbig eingezeichnet. Näheres siehe Text.

der tatsächlich zu startenden Sonden kann per Hand durchgeführt werden. Auch die anschließende Kommunikation mit den Stationen muß zur Vermeidung von Fehlern bei der Übermittlung der Startdaten und zur Zeitersparnis weitgehend automatisiert sein.

Abbildung 5.7 zeigt den zeitlichen Ablauf der Koordinierungsprozeduren, die zur Erstellung der Confirmations und Alerts am Kampagnentag N führen. Die dargestellten Schritte wurden täglich wiederholt und überlappen sich zum Teil mit den Prozeduren für die angrenzenden Tage, so daß im dargestellten Zeitraum auch weitere Prozeduren für Tag N-1 und N+1 usw. abliefen, die hier der Übersichtlichkeit halber weggelassen wurden. Aus dem Ablauf ergibt sich, daß jeder Tag, an dem die Prozeduren nicht gelaufen wären, zu zwei Tagen ohne Koordinierung führen würde, weshalb der Ablauf an Wochenenden und Feiertagen nicht unterbrochen wurde.

In der Abbildung 5.7 bezeichnet der Zeitraum B (12:00 UT am Tag N+1 bis 12:00 UT am Tag N+2) den Zeitraum für den am Tag N Alerts ausgegeben werden sollen. Zeitraum A ist der Zeitraum B des Vortags und bezeichnet den Zeitraum, in dem die Sondenmessungen liegen, für die

am Vortag Alerts ausgegeben wurden und für die am Tag N die Confirmations erstellt werden müssen. Dabei bezeichnen diese Zeiträume genaugenommen die Zeiträume der Sondenmessungen. Die dazugehörigen Sondenstarts müssen jeweils ca. eine Stunde früher erfolgen.

Die Arbeiten, die zur Bereitstellung der Trajektorienstartpunkte nötig sind, sind in Abbildung 5.7 grün dargestellt. Außer der täglichen Auswertung von Startmeldungen, die per Fax oder e-mail eintrafen, wurden diese Aufgaben von Routinen übernommen, die jeweils am späten Abend abliefen. Die Abläufe dieser Programme wurden von einer Steuerungsroutine untereinander koordiniert, deren Ausführung täglich um 23:00 Uhr MEZ automatisch startete. Das Berechnen der Trajektorienstartpunkte umfaßt dabei das Abholen der hinzugekommenen Ozonsondendaten vom NILU via Internet, die Integration der Aufstiegsprofile sowie die Verwaltung, welche Luftpakete noch in der Überwachung verbleiben. Als Abschluß dieser Prozeduren, wurden die Trajektorienstartpunkte via Internet zur FU gesandt.

Die blau dargestellten Arbeitsschritte dienen zur Berechnung der Trajektorien und wurden von der FU geleistet. Die Trajektorienrechnung startete jeweils sobald die EZMW Daten komplett bei der FU vorlagen, was nach automatischer Übertragung der Daten via DWD normalerweise gegen 3:00 Uhr UT der Fall war. Dann wurden die spektralen Daten zunächst auf Gitterpunkte umgesetzt und auf Θ Flächen interpoliert. Daraufhin begann die eigentliche Berechnung der Trajektorien. Nach Abschluß der Trajektorienrechnung begann automatisch eine Komprimierung der Trajektoriendaten und ihre Versendung zum AWI jeweils, sobald eine Trajektorie fertig komprimiert war. Die Übertragung der Trajektoriendaten begann meist gegen 6:00-7:00 UT und war im Regelfall gegen 7:30-8:30 UT beendet. Die Übertragung dieser täglich ca. 30 MByte über das Internet war besonders während der Kampagne 1994/95 eine der größten Unsicherheitsfaktoren, bei der es verhältnismäßig häufig zu Verzögerungen oder Abbrüchen kam. Es wurden für diese Fälle mehrere alternative Routen der Datenübertragung eingerichtet, über die die Übertragung bei auftretenden Problemen umgeleitet werden konnte. Dazu gehörten Umleitungen der Daten innerhalb des Internets und schließlich die Einrichtung einer ISDN Verbindung.

Für die eigentliche Koordinierung der Starts sind die rot dargestellten Schritte erforderlich. Die zeitlich dringendste Aufgabe ist dabei die Bestätigung der am Vortag herausgegebenen Alerts mit einer Neuberechneten optimalen Startzeit. Die Berechnungen dieses Teils wurden von einer Steuerungsroutine koordiniert, die täglich um 5:00 Uhr MEZ startete und zunächst eine Prozedur aufrief, die auf das Eintreffen von Trajektoriendatensätzen wartete. Sobald eine Trajektorie vollständig übertragen war, wurde sie automatisch dekomprimiert. Parallel dazu lief eine Routine ab, die auf fertig dekomprimierte Trajektorien wartete und diese jeweils sofort durchsuchte um Annäherungen an eine der beteiligten Stationen während des Zeitraums A festzustellen. Währenddessen lief die Übertragung und Dekomprimierung der restlichen Trajektorien weiter. Dieses ineinandergeschachtelte Vorgehen stellte sicher, daß mit der Berechnung der möglichen Match Ereignisse so früh wie möglich begonnen wurde. Um eine hinreichende Genauigkeit bei der Berechnung der Annäherungen zu erzielen, wurde dabei zunächst zwischen den stündlichen Positionsangaben im Trajektoriendatensatz auf eine Ausgabefrequenz von 1/10 Minuten in sphärischer Geometrie interpoliert. Für jede Station wurde während der Berechnung der minimalen Annäherung nur der Zeitraum berücksichtigt, in dem die jeweilige Station aufgrund ihrer Startbereitschaftszeiträume auch in der Lage war, eine Sonde in das entsprechende Niveau zu plazieren. Für alle gefundenen Annäherungen näher als 350 km wurde eine Reihe von Qualitätsmerkmalen berechnet (siehe unten). Nachdem alle Trajektorien durchsucht worden waren, wurde für die Stationen, die am Vortag ein Alert erhalten hatten, alle Annäherungen ausgege-

ben, die in zeitlicher Nähe zu dem im Alert genannten Zeitpunkt lagen. Durch die Ineinander-schachtelung waren diese Berechnungen bereits einige Minuten nach dem Eintreffen des letzten Trajektoriendatensatzes abgeschlossen.

Aus den möglichen Match Ereignissen wurde nun für jede am Vortag in Bereitschaft versetzte Station der Match herausgesucht, der nach Beurteilung seiner Qualitätsmerkmale am günstigsten erschien. Im Regelfall war dies genau der Match, für den das Alert vom Vortag ausgegeben worden war. Durch Verschiebungen bei den Qualitätsparametern erschien allerdings auch hin und wieder ein anderer Match günstiger und wurde statt des ursprünglichen ausgewählt. Dieses Auswahlverfahren wurde per Hand durchgeführt. Für die Auswahl stand meistens etwa eine Stunde zur Verfügung. Die Nummern der ausgewählten Matche wurden einer weiteren Routine übergeben, die die Confirmations erstellte und je nach Station per e-mail, Fax oder beidem übermittelte. Der in Abbildung 5.7 gezeigte zeitliche Ablauf des Koordinierungsapparates ist so eingerichtet, daß die Confirmations immer mindestens drei Stunden vor Beginn des Zeitraums A ausgegeben werden konnten, was zwei Stunden vor dem ersten möglichen Ozonsondenstart bedeutet. Dies läßt der Station genügend Zeit für die letzten Startvorbereitungen.

Anschließend wurde jede Trajektorie nach möglichen Match-Ereignissen im Zeitraum B durchsucht und alle Ereignisse sortiert nach zweiter Station zusammen mit ihren Qualitätsmerkmalen ausgegeben. Die Auswahl, für welche Station nun tatsächlich ein Alert ausgegeben wurde, erfolgte wiederum per Hand. Wie bei den Confirmations wurde danach die Kommunikation mit den Stationen wieder von einer Routine übernommen. Wie in Abbildung 5.7 dargestellt, erfolgte das Absenden der Alerts mindestens 24 Stunden vor Beginn des Zeitraums B.

Die zur Koordinierung der Kampagne notwendigen Routinen liefen größtenteils nachts automatisch ab und warteten jeweils aufeinander, bzw. waren ineinander verzahnt. Durch das große Volumen der zu behandelnden Inputdaten (Ozonsondendaten und EZMW Felder) und der notwendigen weiten Übertragung der Daten über Datennetze waren Fehler während der Abarbeitung der Routinen nicht immer auszuschließen. Der zeitliche Ablauf wie in Abbildung 5.7 gezeigt, ist notwendigerweise sehr eng gestaltet. Daher führten Fehler im Ablauf einer der beteiligten Routinen, wenn sie nicht rechtzeitig erkannt und behoben wurden, zu erheblichen Problemen, besonders bei der rechtzeitigen Versendung der Confirmations. Solche Probleme können leicht zur Verschwendung von Ozonsonden führen, die dann zu nicht optimalen Zeitpunkten gestartet werden, und haben auch auf die beteiligten Personen an den Stationen einen demotivierenden Effekt. Zudem kann allein die im Falle einer Verzögerung nötige Kommunikation mit den bis zu zwanzig Stationen, die dann auf die Bestätigung ihrer Ozonsondenstarts warten, die effektive Beseitigung des Fehlers noch weiter verzögern. Während besonders wichtiger Phasen der Kampagne und nach fehleranfälligen Änderungen in den Routinen wurde deswegen mit Hilfe der FU ein umschichtiger Überwachungsdienst während des Ablaufs der Routinen eingesetzt, um eventuelle Störungen bei der Abarbeitung der Routinen bereits zu beseitigen, bevor der Ablauf erheblich verzögert ist.

5.4.2.1 Nahe Echtzeit Trajektorienrechnungen während der Kampagne

Die für die Koordinierung benötigten Trajektorien wurden von dem Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin berechnet. Die Rechnungen beruhen auf den Temperatur- und Windfeldern des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW). Verwendet wurden die Analysedaten und die Vorhersagefelder bis zu den 72 Stunden Vorhersagen einschließlich. Die Trajektorien wurden quasi isentrop berechnet, was bedeutet, daß nur die Horizontalwinde der EZMW Daten benutzt wurden und die Trajektorien zunächst in isentropen

Flächen berechnet wurden. Zusätzlich wurde während jedes Integrationsschritts eine kleine diabatische Korrektur durchgeführt, die die Änderung der potentiellen Temperatur durch Strahlungsaustausch berücksichtigt. Die solare Erwärmung wurde während der Kampagne nach Lacis und Hansen [1974], abgeschätzt. Der Nettoeffekt des infraroten Strahlungsstransports wurde mittels des ‘Newtonian cooling’ Ansatzes parametrisiert [Dickinson, 1973]. Diese Parametrisierung verwendet ausschließlich die lokale Temperatur und eignet sich deswegen besonders gut für die Verwendung während der Kampagne, wo es auf schnelle Berechnung und leichte Handhabbarkeit ankommt. Die Qualität der so gewonnenen Abschätzung der diabatischen Effekte wird in Abschnitt 5.5.1 behandelt.

Während der Kampagne wurden Trajektorien auf neun Niveaus (440, 450, 460; 465, 475, 485; 540, 550, 560 K) gerechnet. Die Niveaus sind in drei Dreiergruppen gegliedert, die bei einer späteren Auswertung jeweils gemeinsam analysiert werden können. Die Verwendung von jeweils drei Niveaus nahe beieinander stellt eine hohe Anzahl von Matches in diesem Bereich sicher und erhöht die Wahrscheinlichkeit, auch bei ungünstigem Kampagnenverlauf zumindest in diesen Schichten signifikante Ergebnisse zu erzielen. Wegen der hohen Kosten einer Kampagne und der großen Anzahl mit erheblichem Aufwand beteiligter Gruppen, ist es besonders wichtig, die Kampagne robust zu planen und damit das Zustandekommen von verwertbaren Ergebnissen zumindest in Teilbereichen sicherzustellen.

Während der Match 1994/95 Kampagne wurden von der FU insgesamt etwa 600 000 Trajektorien mit einem Datenvolumen von etwa 2 GByte nahe Echtzeit berechnet.

5.4.2.2 Auswahlkriterien für die Beurteilung von möglichen Match-Ereignissen

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Kriterien gegeben, nach denen entschieden wurde, für welches mögliche Match-Ereignis tatsächlich eine Sonde eingesetzt wurde. Die Kriterien wurden während der Kampagne laufend durch die Analyse der statistischen Fehler der ersten vorläufigen Ergebnisse optimiert, weshalb an dieser Stelle nur eine ungefähre Beschreibung gegeben werden kann, welche Größen bei der Entscheidung berücksichtigt wurden. Das Verfahren, wie aus der Analyse der statistischen Fehler die Auswahlkriterien optimiert wurden, und eine genaue Definition der letztlich zur Auswertung verwendeten Kriterien werden in Abschnitt 5.5.3 gegeben.

Bei der Koordinierung der Kampagne wurden nur Matche berücksichtigt, bei denen der minimal zu erzielende Abstand des Luftpakets von einer möglichen Sondenmessung weniger als 350 km betrug. Dieser Wert ist deutlich kleiner, als der maximale Matchradius, der in der letztlichen Datenanalyse verwendet wurde. Dadurch wurde die Wahrscheinlichkeit erhöht, daß der Match letztlich erfolgreich ist, auch wenn der Vorhersageanteil der Trajektorie noch mit dem Vorhersagefehler behaftet ist. Die Grenze von 350 km beruht auf dem bei der Analyse der EASOE-Daten gefundenen maximal erlaubtem Matchradius von etwa 500 km [Rex, 1993].

Außer diesem offensichtlichen Kriterium wurden noch weitere Qualitätsmerkmale eines möglichen Match Ereignisses berechnet und bei der Auswahl berücksichtigt. Wie in Abbildung 5.8 zu erkennen, wurde in jedem untersuchten Niveau eine Gruppe von Trajektorien mit etwas unterschiedlichen Startpunkten berechnet, die in den Eckpunkten eines Oktaeders liegen. Die zentrale Trajektorie startet an dem Punkt, an dem die Sonde das entsprechende Niveau passiert hat. Vier weitere Trajektorien wurden 100 km nördlich, westlich, südlich und östlich von der zentralen Trajektorie gestartet. In der Abbildung schlecht sichtbar sind zwei weitere Trajektorien, die jeweils 5 K unter und über der zentralen Trajektorie gestartet wurden. In Fällen, in dem die

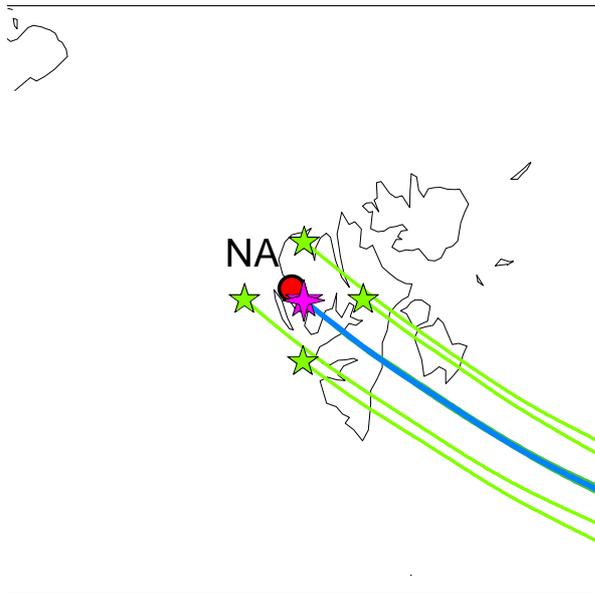


Abbildung 5.8: Start eines Trajektorienschwarms im 475 K Level ausgelöst durch die Ozonsonde, die am 23. Dezember 1994 in Ny-Ålesund (rot eingezeichnet) gestartet wurde. Die Sonde erreichte das 475 K Niveau um 21:36 UT. Der violette Stern markiert den Ort der Ozonsonde zu diesem Zeitpunkt, wie er sich aus der Integration des Windes entlang des Aufstiegspfads bis dahin ergeben hat. An diesem Ort wird die zentrale Trajektorie des Trajektorienschwarms gestartet, welche hier blau eingezeichnet ist. Vier weitere Trajektorien (grün) wurden jeweils um 100 km in die vier Himmelsrichtungen versetzt gestartet. Weitere zwei Trajektorien wurden im 470 und 480 K Niveau am gleichen Ort wie die zentrale Trajektorie ausgelöst. Diese werden hier weitgehend durch die zentrale Trajektorie verdeckt und werden nur am rechten Bildrand als grüner Rand neben der zentralen Trajektorie sichtbar.

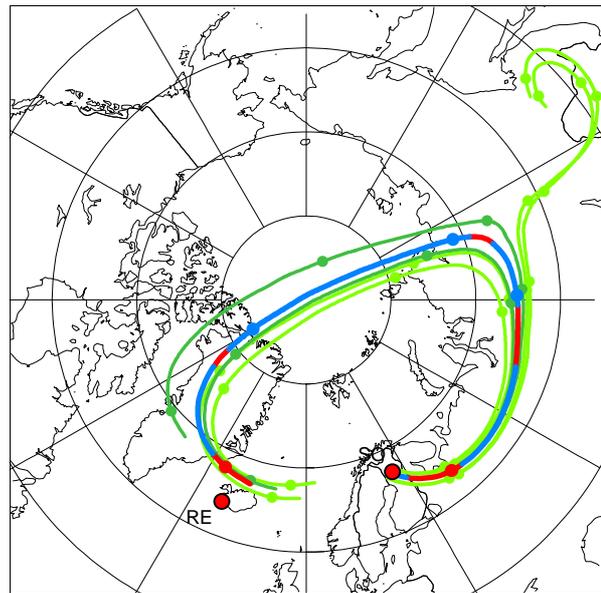


Abbildung 5.9: Beispiel eines Trajektoreinschwarms, bei dem die Trajektorien nach ca. 36 Stunden in völlig verschiedene Richtungen laufen. Die zentrale Trajektorie ist wie in Abbildung 5.1 blau/rot, die restlichen Trajektorien des Schwarms sind grün dargestellt. Die Punktmarkierungen auf den Trajektorien geben den Ort der Luftpakete jeweils um 12:00 UT an.

Trajektoriengruppe schnell auseinanderdriftet (ein extremes Beispiel zeigt Abbildung 5.9) wird die Luftmasse nicht als Einheit erhalten bleiben (oder anders ausgedrückt, es kommt zu großen Austauschprozessen über die Oberfläche des in [Rex 1993] definierten Luftpakets) und die Trajektorien sind mit einer großen Ungenauigkeit behaftet. Als Maß für das Auseinanderdriften wird der Abstand der Trajektorien der Gruppe von der zentralen Trajektorie zum fraglichen Zeitpunkt verwendet. Grenzwerte für den maximal erlaubten Abstand wurden während der Kampagne gewonnen, indem die Änderung der statistischen Fehler der ersten vorläufigen Ergebnisse bei einer Änderung der erlaubten Abstände analysiert wurden.

Die Änderung der potentiellen Vorticity entlang der zentralen Trajektorie wurde als Indikator für fehlerbehaftete Trajektorien oder für Situationen mit starken diabatischen Prozessen oder subskaligen Strukturen im Windfeld verwendet. Eine Grenze für die erlaubte PV-Änderung wurde wiederum durch Analyse der ersten Ergebnisse während der Kampagne gefunden. Die Erfahrung der EASOE-Auswertung konnte hier nicht genutzt werden, da durch eine Verbesserung der Datenassimilation beim EZMW (Übergang auf vierdimensionale Variationsanalyse) die PV Werte seit EASOE deutlich stabiler geworden sind.

Es wurde der vertikale Ozongradient im Ozonprofil der ersten Sonde verwendet, um den statistischen Fehler abzuschätzen, der aufgrund der Unsicherheit in der Bestimmung der vertikalen Position von Ozonsonde und Luftpaket zustandekommt. Der Grenzwert für den Gradienten wurde basierend auf der EASOE-Erfahrung während der Kampagne optimiert.

Außerdem wurde noch die Gesamtzeit zwischen den beiden Ozonsondenmessungen und die Zeit, die das Luftpaket zwischen den Messungen in der Sonne verbracht hat (Details zur Berechnung dieser Zeit siehe im Abschnitt 6.4) berücksichtigt. Basierend auf der EASOE Erfahrung wurden Matche mit einem zeitlichen Abstand zwischen den beiden Ozonsondenmessungen von 100 bis 200 Stunden bevorzugt. Bei dem prozentualen Anteil der Sonnenzeit an der Flugzeit wurde auf eine breite Streubreite geachtet, um genauere Ergebnisse von multivariaten Regressionen (siehe Abschnitt 7.6) zu ermöglichen.

Neben diesen geophysikalisch begründeten Kriterien wurde noch eine Reihe Umstände eher technischer Art beachtet:

Teilweise ergab sich die Möglichkeit, mit einem Start zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einer Sonde mehrere Matche in unterschiedlichen Niveaus zu erzielen. Nach Möglichkeit wurde durch die Wahl des Startzeitpunkts die Anzahl der mit dieser Sonde beabsichtigten Matche maximiert. Dabei wurden Matche, die mit der selben ersten Sonde auf den verschiedenen Niveaus einer Dreiergruppe stattfanden, nur jeweils einmal berücksichtigt.

Die Anzahl der Ozonsonden, die an der jeweiligen Station noch vorhanden waren, mußte ständig beachtet werden, um ein frühzeitiges Ausscheiden einzelner Stationen wegen Sondenmangels zu vermeiden. Um sicherzustellen, daß der Match-Koordinierung der Stand des Ozonsondenvorrats an den einzelnen Stationen immer korrekt vorlag, meldeten die Stationen nach jedem Start den jeweils noch verbliebenen Vorrat an Sonden. Eine auf der Zählung der Sondenstarts beruhende zentrale Buchführung des Sondenorrats der einzelnen Stationen würde schnell von der Realität abweichen, da Sonden bei der Präparation wegen Defekten verworfen werden können und andererseits der Vorrat einzelner Stationen durch geborgene, wiederverwendbare Sonden wieder wachsen kann.

Auch die Arbeitsbelastung der Personen an den Stationen speziell die Belastung mit nächtlichen Starts durfte nicht außer acht gelassen werden. Bei einer Überbeanspruchung der Teilnehmer an der Kampagne besteht verständlicherweise die Gefahr, daß die Startzeiten nicht exakt eingehalten werden und die Sorgfalt bei der Sondenvorbereitung leidet. Hier erwies es sich als sehr vorteilhaft, neben den ständigen automatisierten Kontakten zur Datenübertragung auch hin und wieder in persönlichen Kontakt mit den Stationen zu treten, um die Stimmung vor Ort besser einschätzen zu können.

5.4.3 Beispiel für das Zustandekommen eines Matches

In diesem Abschnitt wird das Zustandekommen eines Matches an einem Beispiel zusammenfassend von Anfang an beschrieben.

Am 24.1.1995 wurde in Aberystwyth (AB, Wales) eine Ozonsonde gestartet und deren Daten in die zentrale Datenbank gemeldet. Die von dieser Sonde beprobten Luftmassen wurden ab dem 25.1. in die Match-Überwachung genommen. Am 27.1. wurde vorhergesagt, daß das von der Aberystwyth Sonde in 485 K beprobte Luftpaket sich am 29.1. so an die Station Jokionen (JO, Finnland) annähern würde, daß der Abstand zu einer um 7:40 UT dort gestarteten Sonde mit 197 km minimal würde. Aufgrund seiner günstigen Parameter (siehe Abbildung 5.10) wur-


```

From mrex Fri Jan 27 13:35:21 1995
To: esko.kyro@fmi.fi, markku.rummukainen@fmi.fi
Subject: MATCH alert (Jokionen)

*****
**
**                      MATCH Ozone Sonde Alert                      **
**
*****

From:      Markus Rex, Peter v.d. Gathen
           match@awi-potsdam.de
Date:      Jan 27

To Station: Jokionen

Dear Esko + Markku,

we recommend to launch an ozonesonde at Jokionen on Jan 29 at 07:40 UT.
Tomorrow morning until 10:00 UT we will send you a confirmation for
this match and an updated optimal launch time together with a launch
window.
Hopefully this sonde will make a good match in the 485 K potential temperature
level with an ozonesonde launched at Aberystwyth on Jan 24. The predicted
matchradius is 196 km.
With best regards

Markus Rex
    
```

Abbildung 5.11: Alert Message, die am 27. Januar 1995 per e-mail nach Jokionen gesandt wurde.

de dieses mögliche Match-Ereignis ausgewählt und ein Alert an Jokionen geschickt (siehe Abbildung 5.11). In Jokionen wurde daraufhin eine Ozonsonde für einen Start zu dem angegebenen Zeitpunkt vorbereitet. Mit den neuen Vorhersagen des 28.1. bestätigten sich die günstigen Parameter dieses möglichen Match-Ereignisses sowie der optimale Startzeitpunkt und es wurde eine Confirmation nach Jokionen gesandt (siehe Abbildung 5.12). Daraufhin wurde in Jokionen am 29.1. um 7:45 UT eine Sonde gestartet, die um 8:46 UT in 155 km Abstand von der zentralen Trajektorie des zuvor in Aberystwyth beprobten Luftpakets eine Ozonmessung durchführte. Eine Übersicht über den erfolgreichen Match und die beiden Ozonsondenmessungen ist in Abbildung 5.13. gegeben.

5.5 Prozeduren zur Datenauswertung nach der Match-Kampagne

Schon während der Kampagne kann mit den für die Koordinierung berechneten Trajektorien eine grobe Auswertung der Daten vorgenommen werden. Die Ergebnisse dieser Vorauswertung dienen zum einen dazu, die Auswahlkriterien (Abschnitt 5.4.2.2) für mögliche Match-Ereignisse ständig zu verbessern und zum anderen, um bereits während des Winters eine aktuelle Einschätzung des Ozonverlustes geben zu können. Auch für die Bereitschaft der Stationen, sich einer nachfolgenden Kampagne anzuschließen ist eine schnelle Präsentation von Ergebnissen wichtig. Da die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse jedoch auf einer gesonderten Auswertung mit nach der Kampagne neu berechneten Trajektorien beruhen, soll auf das Vorgehen bei der vorläufigen Auswertung hier nicht weiter eingegangen werden.

Die Nachauswertung verlief in drei Schritten: Zunächst wurde ein wesentlich umfangreicherer Satz von Trajektorien berechnet, der sich in einigen wesentlichen Punkten von dem während der Kampagne benutzten unterscheidet. Die Neuberechnung der Trajektorien sowie dazu nötige weitere Arbeiten werden im folgenden Abschnitt 5.5.1 beschrieben. Danach wurden die Matchdaten mit diesem Trajektoriensatz exakter als während der Kampagne bestimmt; das Vorgehen

```
From mrex Sat Jan 28 8:51:12 1995
To: esko.kyro@fmi.fi, markku.rummukainen@fmi.fi
Subject: MATCH confirmation (Jokionen)

*****
**
**                      MATCH Confirmation Message                      **
**
*****

From:      Markus Rex, Peter v.d. Gathen
           match@awi-potsdam.de
Date:      Jan 28

To Station: Jokionen

Dear Esko + Markku,

our recommendation for an ozonesonde launch from yesterday is confirmed
now. The best launch time is Jan 29 at 07:40 UT. The launch window is
05:40-09:50 UT.
This sonde will make a good match in the 485 K potential temperature
level with an ozonesonde launched at Aberystwyth on Jan 24. The predicted
matchradius is 23 km.
Please put the data from the ozonesonde on zardoz at NILU soon after the
sounding and update the file containing the numbers of ozonesondes you have
left in Jokionen.

We will inform you about the success of this match.
Good luck !

Markus Rex
```

Abbildung 5.12: Confirmation Message, die am 28. Januar 1995 nach Jokionen gesandt wurde

wird in Abschnitt 5.5.2 erläutert. Vor der Berechnung von Ozonverlusten aus diesem Datensatz wurde er anhand einiger Auswahlkriterien gefiltert, um die statistischen Fehler der Analyse klein zu halten. Diese Kriterien und die Methode, die verwendet wurde, um jeweilige Grenzwerte der Auswahlkriterien festzulegen, werden im Abschnitt 5.5.3 beschrieben.

5.5.1 Trajektorienrechnungen zur Datenauswertung

Nach Abschluß der Kampagne wurde ein neuer Satz Trajektorien zur Auswertung der Daten erstellt. Die Unterschiede dieses Trajektoriensatzes zu den Trajektorien, die zur Koordinierung verwendet worden waren, sind:

- Alle bisher verwendeten Vorhersagedaten wurden durch Analysedaten des EZMW ersetzt.
- Die Trajektoriengruppen wurden entlang des Aufstiegspfads der Sonden in 65 Niveaus in 5 K Abstand zwischen 340 K und 660 K initialisiert.
- Auch die Abdrift der Sonden, die keine Winddaten gemessen haben, wurde berücksichtigt (siehe Abschnitt 5.5.1.1).
- Es wurde eine diabatische Korrektur der Trajektorien verwendet, die auf einer vollständigen Strahlungstransportrechnung beruht (siehe Abschnitt 5.5.1.2).

5.5.1.1 Abdrift der Sonden

Die Ozonsonden driften während ihres Aufstiegs in guter Näherung trägheitsfrei mit der atmosphärischen Strömung mit. Der Pfad während des Aufstiegs kann also aus einer Integration der Horizontalwinde gewonnen werden. Viele Sonden messen ihre horizontale Position während des Aufstiegs mit Hilfe der OMEGA Navigation (Abschnitt 5.1.1) und leiten bei der Auswer-

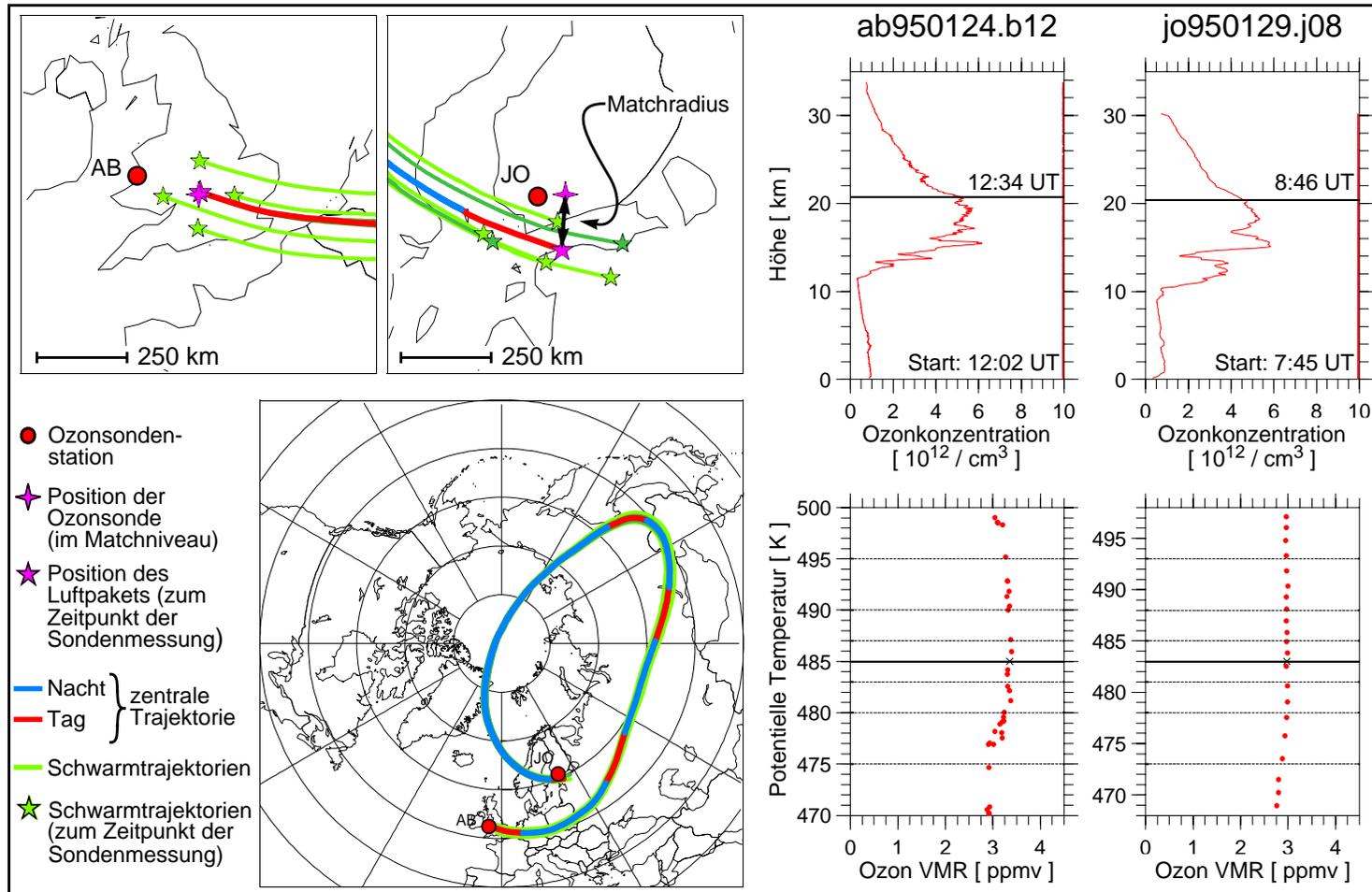


Abbildung 5.13: Überblick über den Match zwischen der Sonde ab950124.b12 und jo950129.j08. Das linke untere Bild zeigt den Verlauf des Trajektorienschwarms, der in 485K am Ort von ab950124.b12 gestartet wurde. Die beiden Vergrößerungen links oben geben die Situation des Trajektorienschwarms während beider Sondenmessungen an. Der Ausschnitt, welcher die Situation am Ort der zweiten Sonde zeigt, verdeutlicht die Definition des Matchradius. Rechts sind die Ozonprofile, wie sie von den beiden Sonden gemessen wurden, dargestellt. Die beiden oberen Grafiken zeigen einen Überblick über das ganze Profil in den anschaulichen Einheiten geometrische Höhe gegen Ozonkonzentration. In diesen beiden Grafiken sind die Zeiten der Sondenstarts und die der Sondenmessungen im Matchniveau angegeben. Die Höhe des Matchniveaus ist durch die horizontale Linie angedeutet. Die beiden unteren Bilder rechts zeigen Vergrößerungen der Ozonprofile (als einzelne Meßpunkte) in der Nähe des Matchniveaus in den Einheiten potentielle Temperatur gegen Mischungsverhältnis. Das Matchniveau (durchgezogene Linie) und die 2K, 5K und 10K Umgebungen (gestrichelte Linien) liegt wegen der diabatischen Abkühlung der Luftmasse zwischen beiden Messungen bei der zweiten Sonde etwas tiefer. Ein kleines schwarzes Kreuz deutet jeweils das zwischen den Punkten des Profils auf das Matchniveau interpolierte Ozonmischungsverhältnis an. Die Differenz zwischen diesen beiden Ozonmischungsverhältnissen ist ein Meßpunkt für den chemischen Ozonabbau. Für die Auswertung der Winter wurden jeweils viele hundert solcher Ereignisse verwendet.

tung der Sondierung routinemäßig den Wind entlang des Aufstiegspfads daraus ab. Diese Winddaten werden dann im Datensatz der Sonde zur Verfügung gestellt. Die Windmessung wurde von etwa 70% der Sonden durchgeführt. Bei diesen Sonden kann der Aufstiegspfad einfach durch Integration der von den Sonden bereitgestellten Winddaten wieder rekonstruiert werden. Dabei wurde der Ort der Sonde zu jedem Meßpunkt aus dem Ort am letzten Meßpunkt plus dem Produkt des Windvektors des letzten Meßpunktes und der Zeit zwischen beiden Meßpunkten gewonnen. Da die Zeitspanne zwischen zwei Meßpunkten im Sekundenbereich liegt, konnte auf eine Interpolation des Windvektors zwischen den Punkten verzichtet werden. Die Berechnung erfolgte in geographischen Koordinaten in sphärischer Geometrie, so daß der Aufstiegspfad der Sonde sofort in geographischen Koordinaten vorlag und auf eine sonst notwendige doppelte Kartenprojektion (zunächst die Projektion der Umgebung der Ozonsonde auf ein kartesisches System und nach der Integration des Aufstiegspfades die Rückprojektion dieses Systems in geographische Koordinaten) verzichtet werden konnte. Abbildung 5.14 zeigt für drei verschiedene Niveaus die Verteilung der Entfernungen vom Startort (gefüllte Balken), die die Sonden in den jeweiligen Niveaus erreicht hatten. Dabei treten ab 475 K Entfernungen über 200 km auf. Typische Driftentfernungen sind jedoch in diesen Höhen 30 bis 100 km.

Bei ca. 30% der Sonden standen keine von der Sonde gemessenen Winde zur Verfügung oder diese waren durch Datenausfälle der OMEGA Navigation zu spärlich, als daß der Aufstiegspfad aus ihnen hätte rekonstruiert werden können. Bei diesen Sonden wurde der Aufstiegspfad mit Hilfe der EZMW Windfelder abgeschätzt. Da diese Felder aber eine wesentlich schlechtere Höhenauflösung haben (Flächen auf 850, 700, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 70, 50, 30 hPa), sind dabei größere Fehler bei der Berechnung möglich. Das gilt vor allem im Bereich des Polar Night Jets, in dem erhebliche vertikale Windgradienten vorkommen. Aus den beiden jeweils zeitlich benachbarten EZMW Analysezeitpunkten wurde durch 4-dimensionale lineare Interpolation im EZMW Gitter der Windvektor zu jedem Meßpunkt der Ozonsonde ausgelesen. Aus diesen Windvektoren wurde dann der Aufstiegspfad der Sonde wie oben beschrieben integriert. Um die Fehler, die mit diesem Verfahren verbunden sind, abschätzen zu können, wurde der Aufstiegspfad auch für die Sonden, die selbst Windmessungen durchgeführt haben, aus den EZMW Analysen bestimmt. Die in den einzelnen Niveaus aufgetretenen Abweichungen dieses 'EZMW Aufstiegspfades' gegenüber dem genaueren Aufstiegspfad aus Sondenwinden sind zusätzlich als nicht ausgefüllte Balken in Abbildung 5.14 eingetragen. Würden für Sonden ohne eigene Winddaten einfach senkrechte Aufstiege angenommen, würde der mittlere Fehler in der Positionsbestimmung sich genauso verhalten, wie die mittlere Abdrift (ausgefüllte Balken). Der Vergleich macht offensichtlich, daß durch die Abschätzung mit EZMW Winden die Position der Sonde wesentlich besser bestimmt wird, als mit der Annahme senkrechter Aufstiege. In fast 90% der Fälle ist der Fehler in der Position sogar kleiner als 20 km, wenn EZMW Winde verwendet werden.

5.5.1.2 Korrektur Diabatischer Effekte

Für die Nachberechnung der Trajektorien wurden diabatische Erwärmungsraten ($d\Theta/dt$) verwendet, die mit dem MIDRAD Strahlungstransportmodell [Shine, 1987; Shine und Rickaby, 1989] innerhalb des SLIMCAT CTM berechnet wurden. Die SLIMCAT CTM Läufe wurden mit EZMW Winden und Temperaturen angetrieben. Für die Strahlungstransportrechnungen wurden klimatologische Ozonprofile verwendet. Die Nettoraten der diabatischen Erwärmung wurden alle sechs Stunden auf sechs stratosphärischen Niveaus (380, 400, 435, 475, 510 und 550 K) auf einem T42 Gitter aus den Modellläufen extrahiert. Mit der zeitlichen Abtastung wird der Tagesgang von $d\Theta/dt$ gerade noch erfaßt. Information über die Form des Tagesgangs ist

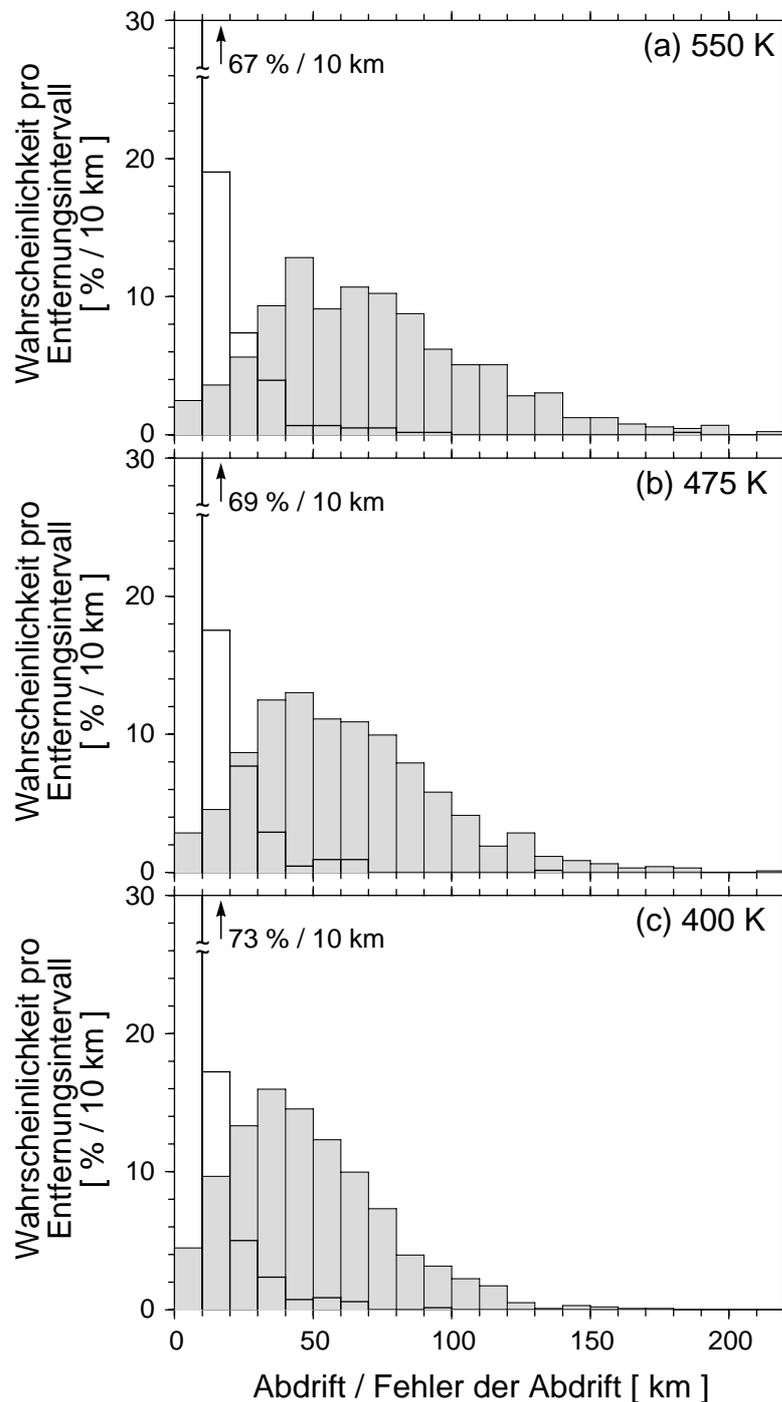


Abbildung 5.14: Ausgefüllte Balken: Mittlere Abdrift der Sonden während des Aufstiegs auf drei isentropen Niveaus. Die Höhe der Balken gibt an, welcher Anteil der Sonden in dem entsprechenden Niveau eine vom jeweiligen Intervall auf der x-Achse angegebene Entfernung vom Startort hatte. Durchsichtige Balken: Abweichung des aus EZMW Winddaten berechneten Aufstiegspfads vom Aufstiegspfad, der sich aus den von der Sonde gemessenen Winden ergibt. Die Differenz ist wie oben geschildert aufgetragen. Für die Abbildung wurden etwa 700 Sonden verwendet, deren Winddaten vollständig im Datensatz vorhanden waren.

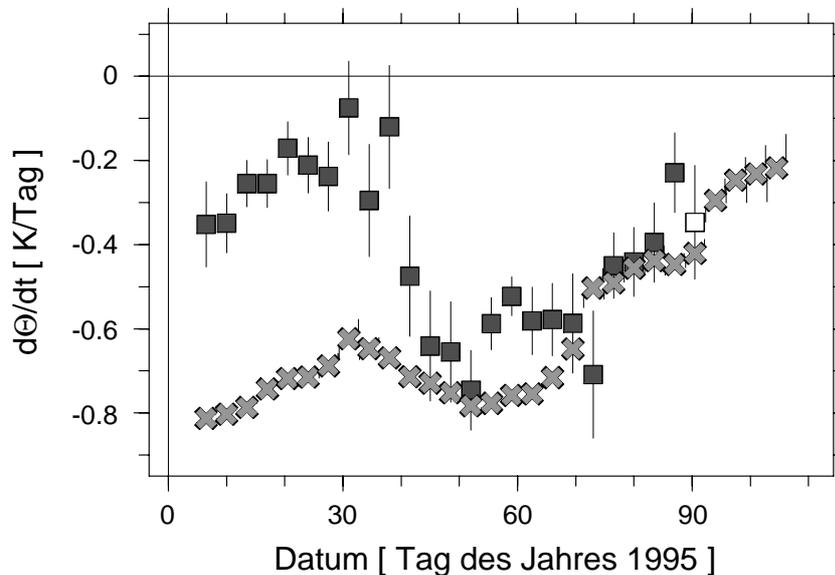


Abbildung 5.15: Entlang der Trajektorien gemittelte diabatische Erwärmungsraten. Die Quadrate geben die mittleren Raten an, die sich aus der während der Kampagne benutzten Abschätzung ergeben, die Kreuze zeigen die Ergebnisse von SLIMCAT (siehe Text).

nicht mehr enthalten. Bei der Berechnung der Trajektorien wurde nun während jedes Integrations-schrittes durch vierdimensionale Interpolation die diabatische Erwärmungsrate am jeweiligen Ort der Trajektorie ausgelesen und zur Korrektur der vertikalen Position der Trajektorie verwendet.

Da die diabatischen Effekte im polaren Winter im Mittel eine diabatische Abkühlung darstellen, ist die Bezeichnung als diabatische Erwärmungsrate etwas irreführend. Sie soll hier dennoch der ebenfalls verbreiteten Bezeichnung als diabatische Abkühlungsrate vorgezogen werden, da ansonsten konsequenterweise auch das Vorzeichen der Rate komplementär zu der Größe $d\Theta/dt$ definiert werden müßte.

Zunächst ist in Abbildung 5.15 dargestellt, wie sich die wesentlich genauere Berechnung von SLIMCAT von den groben Abschätzungen für $d\Theta/dt$ unterscheidet, die während der Kampagne benutzt wurde. Es wird deutlich, daß die Fehler der Abschätzung phasenweise recht erheblich sind. Dies war 1995 vor allem während des Januars der Fall. Die spätere Diskussion der meteorologischen Situation des Winters zeigt, daß sich während dieser Periode eine Stratosphären-erwärmung von oben nach unten durchsetzte, was mit einer kräftigen Abweichung vom mittleren Temperaturprofil einherging. Dies führt zu erheblichen Anomalien im Strahlungstransport, die von der Abschätzung nicht erfaßt werden, da diese nur die lokalen Temperaturen berücksichtigt.

Die von SLIMCAT gelieferten diabatischen Erwärmungsraten sind gemittelt in guter Übereinstimmung mit anderen Berechnungen von Strahlungstransportmodellen [Valero et al., 1993; Rosenfield et al., 1994] und mit dem beobachteten mittleren Absinken von Flächen gleicher N_2O -Konzentration [Strahan et al., 1994].

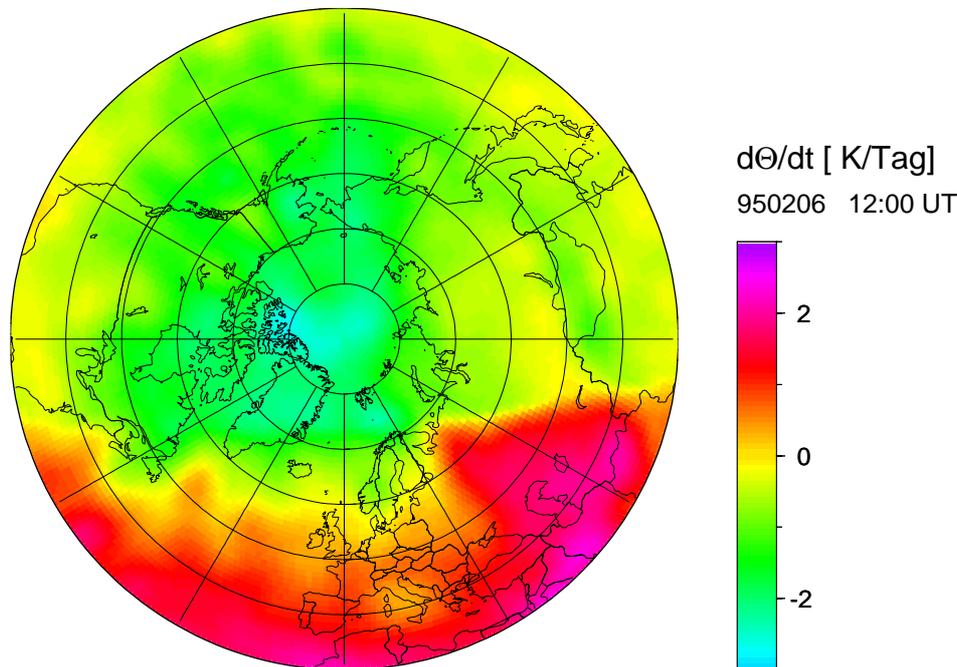


Abbildung 5.16: Karte der diabatischen Erwärmungsraten am 6. Februar 1995 auf dem 475 K Niveau, wie sie von SLIMCAT berechnet wurden. Der Kartenausschnitt reicht bis 30°N, der Greenwich Meridian zeigt nach unten. Daten von M. Chipperfield.

Abbildung 5.16 zeigt beispielhaft für den 6.2.1995 die Verteilung der diabatischen Erwärmungsraten auf der 475 K Isentrope um 12:00 UT. Deutlich ist die Erwärmung als positive Rate im Bereich des Sonnenlichts zu erkennen. Ein Höhen-/Zeitschnitt von $d\Theta/dt$ an einem Ort im Zeitraum 24. bis 29. Januar 1995 ist in Abbildung 5.17 gegeben. Oberhalb von ca. 450 K wird der ausgeprägte Tagesgang deutlich. Die Erwärmung tagsüber erreicht ein durch die Ozonabsorption verursachtes Maximum um 475 K, während die Abkühlung während der Nacht deutlich nach oben hin zunimmt.

5.5.2 Berechnung der Matche

Nach der Neuberechnung der Trajektorien wurde der gesamte Trajektorien Datensatz nach aufgetretenen Matchen durchsucht. Dazu wurde der Abstand jeder zentralen Trajektorie von allen während des Zeitraums der Trajektorie im Niveau der Trajektorie stattgefundenen Ozonsondenmessungen berechnet. Der Ort des Luftpaketes zum jeweiligen Zeitpunkt der Sondenmessung wurde dazu jeweils durch eine Interpolation in sphärischer Geometrie zwischen den beiden zeitlich nächstliegenden Punkten des Trajektorien Datensatzes bestimmt. Für die Bestimmung der Orte und Zeiten der Ozonsondenmessungen im jeweiligen Niveau der Trajektorie wurde die Abdrift und die Aufstiegszeit der Sonde berücksichtigt. Der Abstand zwischen der Position des Luftpaketes zur Zeit der Ozonsondenmessung und dem Ort der Ozonsondenmessung im Niveau der Trajektorie wurde wiederum in sphärischer Geometrie bestimmt. Dieser Abstand wird hier Matchradius genannt (siehe auch Abbildung 5.13). Tatsächlich wurde allerdings, um eine ökonomischere Berechnung zu ermöglichen, der Matchradius für alle Fälle zunächst gröber be-

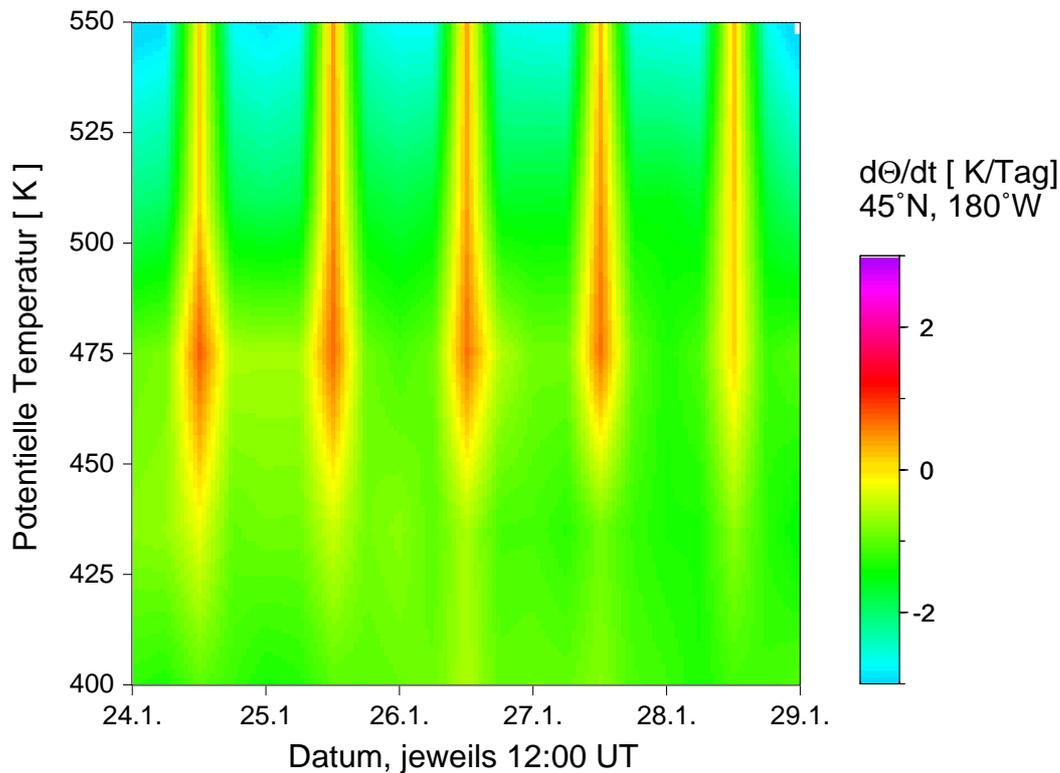


Abbildung 5.17: Höhen-/Zeitschnitt der von SLIMCAT berechneten diabatischen Erwärmungsraten im Bereich von 400 bis 550 K vom 24. bis zum 29. Januar 1995 bei 45°N, 180°W. Daten von M. Chipperfield.

stimmt (unter Verwendung von Sondenpositionen in bestimmten vordefinierten Standardniveaus und einiger weiterer Vereinfachungen). Nur für die Fälle mit einem vorläufigen Matchradius unter bestimmten Grenzen wurde dieser, wie oben beschrieben, exakt bestimmt.

Für alle Ereignisse mit einem abgeschätzten Matchradius unter 1000 km wurden folgende Merkmale berechnet und zur weiteren Auswertung verwendet:

- *Ozonmischungsverhältnisse beider Sonden* (XO_3^A , XO_3^B): Linear interpolierte Ozonmischungsverhältnisse beider Ozonsonden. Es wurde dabei zwischen den beiden dem aktuellen Niveau der Trajektorie benachbarten Meßpunkten der Ozonsonden interpoliert. Da die Trajektorie im Laufe der Zeit durch die diabatische Kühlung im Mittel etwas absinkt, ist das Niveau, dessen Ozonmischungsverhältnis bestimmt wird, bei der zweiten Sonde in der Regel etwas niedriger.
- *Flugzeit* (t): Gesamte Zeitspanne zwischen den beiden Ozonsondenmessungen
- *Sonnenzeit* (t_s): Entlang der Trajektorie aufintegrierte Zeit, die das Luftpaket zwischen den beiden Ozonsondenmessungen in der Sonne verbracht hat. Dabei wird als Kriterium zur Definition von t_s die geometrische Sichtbarkeit des Sonnenmittelpunkts vom Ort des Luftpakets aus verwendet. Die Berechnung dieser Zeit ist in [Rex, 1993] beschrieben.
- *Matchradius* (R): Definition siehe oben und Abbildung 5.13.

- *Matchwinkel* (α): Am Ort der zweiten Ozonsondenmessung: Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Luftpakets und der Verbindungslinie Luftpaket Ozonsondenmessung (siehe auch Abbildung 5.18).
- *Divergenz der Schwarmtrajektorien* (D_{\max}^{-} , D_{\max}^{\perp}): Zum Zeitpunkt der zweiten Ozonsondenmessung wurden die horizontalen Abstände der sechs Trajektorien des Trajektorien-schwarms von der zentralen Trajektorie bestimmt. D_{\max}^{-} gibt den größten dieser Abstände an, der bei den in einer Isentropenfläche gestarteten Trajektorien aufgetreten ist. D_{\max}^{\perp} ist der größere der beiden Abstände, der bei den vertikal versetzt gestarteten Trajektorien aufgetreten ist.
- *PV-Variation entlang der Trajektorie* (PV^{\sim}): Die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen potentiellen Vorticity entlang der zentralen Trajektorie. Da bei der Bestimmung der potentiellen Vorticity durch die Bildung der zweiten Ableitungen bei der Berechnung der Rotation des Windfeldes relativ große statistische Streuung auftritt, wird vor dem Aufsuchen der Extremwerte ein gleitendes Mittel über ± 5 Stunden gebildet.
- *Ozonvariation in 2 K* ($XO_3^{\sim 2K A}$, $XO_3^{\sim 2K B}$): Die Differenz zwischen dem jeweiligen minimalen und maximalen Ozonmischungsverhältnis in einer 2 K Umgebung um das Niveau der Trajektorie. Dieser Wert wurde für beide Ozonsondenprofile eines Matches berechnet.
- *Ozonvariation in 5 K* ($XO_3^{\sim 5K A}$, $XO_3^{\sim 5K B}$): Wie oben, aber in einer 5 K Umgebung.
- *Ozonvariation in 10 K* ($XO_3^{\sim 10K A}$, $XO_3^{\sim 10K B}$): Wie oben, aber in einer 10 K Umgebung.
- *Lücke im Ozonprofil* (Δz^A , Δz^B): Der vertikale Abstand zwischen den beiden Meßpunkten im Ozonsondenprofil, über den zur Bestimmung des Ozonmischungsverhältnisses interpoliert werden mußte. Dieser Wert wurde für beide Ozonsondenprofile eines Matches berechnet.

5.5.3 Auswahl der Matche für die Auswertung

Um den statistischen Fehler des Ergebnisses zu minimieren, wurden die Matche unter Verwendung obiger Parameter gefiltert. Für die Auswertung wurden nur Matche verwendet, die in allen Parametern bestimmte Grenzwerte unterschritten. Aus der Analyse der statistischen Fehler (siehe im zweiten Teil dieses Abschnitts) ergaben sich dabei aufgrund der unterschiedlichen dynamischen Verhältnisse in den verschiedenen Höhenbereichen jeweils etwas voneinander abweichende optimale Grenzwerte. Im Höhenbereich um 475 K wurden folgende Auswahlkriterien verwendet:

- Die zweite Ozonsondenmessung muß innerhalb der Matchumgebung um den Ort des Luftpakets zum Zeitpunkt der Messung stattgefunden haben (siehe Abbildung 5.18).
Im Kern des Polarwirbels ($PV > 42 \text{ s}^{-1} \text{ nPV}$) wurde als Matchumgebung ein Kreis mit 500 km Radius um den Ort des Luftpakets definiert. D.h. alle Matche bis zu einem maximalen Matchradius (R_{\max}) von 500 km wurden ausgewertet.
Im Randbereich des Polarwirbels wurde als Matchumgebung eine Ellipse mit 500 km großer und 300 km kleiner Halbachse verwendet. Ihr Mittelpunkt wird von dem Ort des Luftpakets bestimmt, den dieses zum Zeitpunkt der Messung durch die zweite Sonde innehatte. Die Ausrichtung der großen Halbachse dieser Ellipse wird von der Bewegungsrichtung des Luftpakets zu diesem Zeitpunkt definiert (siehe Abbildung 5.18). Matche, bei denen die Ozon-

sondenmessung innerhalb dieser Ellipse stattgefunden hat, werden ausgewertet. Zur Berechnung, ob eine Ozonsondenmessung innerhalb der elliptischen Matchumgebung stattgefunden hatte, wurden α und R verwendet.

- D_{\max}^- kleiner als 1200 km.
- D_{\max}^\perp kleiner als 1300 km.
- t kürzer als 264 Stunden.
- PV^\sim kleiner als 25% der mittleren PV entlang der Trajektorie.
- $XO_3^{\sim 2K A}$ und $XO_3^{\sim 2K B}$ kleiner als 15%.
- $XO_3^{\sim 5K A}$ und $XO_3^{\sim 5K B}$ kleiner als 25%.
- Δz^A und Δz^B kleiner als 200 m.

Im Höhenbereich um 400 K wurden folgende Auswahlkriterien abweichend von oben verwendet:

- D_{\max}^- und D_{\max}^\perp kleiner als 1500 km.
- $XO_3^{\sim 2K A}$ und $XO_3^{\sim 2K B}$ kleiner als 20%.
- $XO_3^{\sim 5K A}$ und $XO_3^{\sim 5K B}$ kleiner als 30%.

Um 600 K wurde abweichend von den Auswahlkriterien in 475 K nur der Grenzwert für PV^\sim etwas schärfer definiert:

- PV^\sim kleiner als 20%.

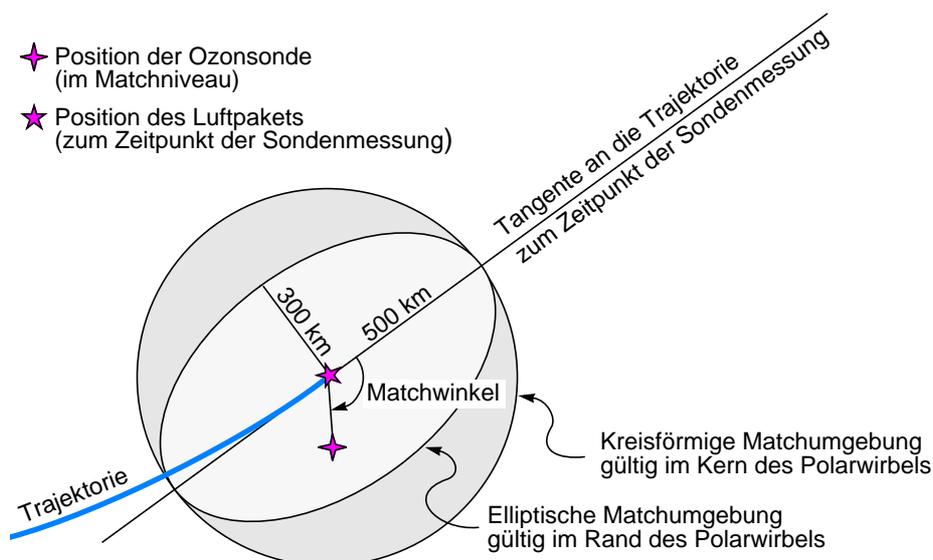


Abbildung 5.18: Definition des Matchwinkels und der Matchumgebungen im Rand ($36 \text{ s}^{-1} < nPV < 42 \text{ s}^{-1}$) und im Kern ($nPV > 42 \text{ s}^{-1}$) des Polarwirbels. Fand die Sondenmessung wie in diesem Beispiel innerhalb der für den entsprechenden PV-Bereich gültigen Matchumgebung statt, wird das Ereignis als Match bezeichnet und ausgewertet.

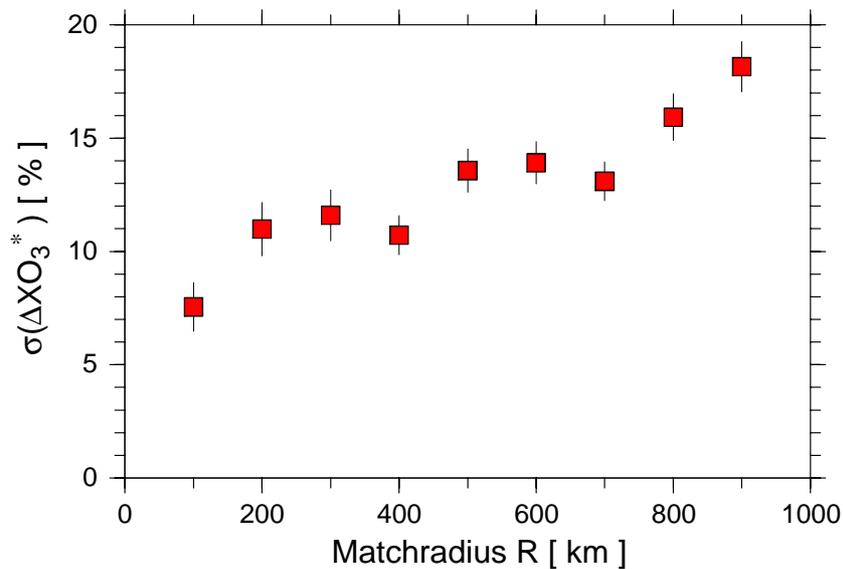


Abbildung 5.19: Streuung der Einzelmatche als Funktion des Matchradius. Jeder Punkt gibt $\sigma(\Delta XO_3^*)$ in einem 100km Intervall des Matchradius an. Das Diagramm beruht auf der Untergruppe von Matches, die zwischen dem 15. Januar und dem 10. Februar 1995 im Höhenbereich 470 bis 500 K stattgefunden haben. Die Fehlerbalken geben die statistische Unsicherheit des Schätzers für die Streuung an.

In den zwischen diesen Bereichen liegenden Niveaus wurden die Auswahlparameter gleitend zwischen den hier angegebenen angepaßt.

Die angegebenen Grenzwerte wurden gefunden, indem die statistische Streuung der Einzelmatche als Funktion des Qualitätsparameters untersucht wurde. Als Maß für die statistische Streuung wurde die Standardabweichung der Größe ΔXO_3^* verwendet:

$$\Delta XO_3^* = \Delta XO_3 + L_s \cdot t_s \quad (10)$$

$$\Delta XO_3 = XO_3^B - XO_3^A$$

L_s = Ozonabbaurate pro Sonnenstunde

Die Ozonabbaurate pro Sonnenstunde wurde, wie im Kapitel 7 beschrieben, aus der Gesamtheit der Matche im fraglichen Höhen- und Zeitintervall bestimmt. ΔXO_3^* stellt somit die um den erwarteten chemischen Ozonabbau korrigierte Differenz des Ozonmischungsverhältnisses dar. Diese Differenz beruht außer auf der lokalen Abweichung der Ozonabbaurate vom Mittel der Abbaurate auf der Summe der statistischen Fehler für einen Einzelmatch. Der Mittelwert von ΔXO_3^* ist definitionsgemäß Null, die Standardabweichung $\sigma(\Delta XO_3^*)$ gibt die Streuung der Einzelmatche an.

Abbildung 5.19 zeigt ΔXO_3^* in Abhängigkeit vom Matchradius beispielhaft für den Zeitraum 15.1. bis 10.2.1995 und den Höhenbereich 470 bis 500K. In dem so abgegrenzten Bereich war die Ozonabbaurate relativ zeit- und höhenunabhängig, wie später noch gezeigt wird. Sehr ähnliche Ergebnisse erhält man auch für die anderen untersuchten Zeiträume und Höhenbereiche. In Abbildung 5.19 wird deutlich, daß der statistische Fehler, der mit einem Match verbunden ist, bei Matches mit kleineren Matchradien beträchtlich kleiner ist. Gleichzeitig nimmt aber

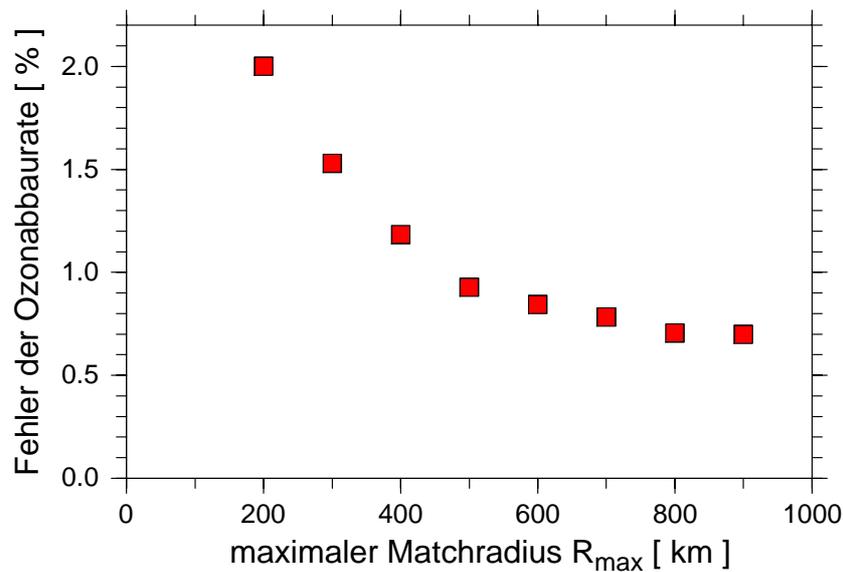


Abbildung 5.20: Statistischer Fehler der berechneten Ozonabbaurate in Abhängigkeit von der Wahl des maximal zulässigen Matchradius. Die Methode zur Berechnung der Ozonabbauraten und ihrer Fehler wird in Kapitel 7 beschrieben. Das Diagramm beruht auf der gleichen Untergruppe von Matches wie Abbildung 5.22.

auch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Matche mit abnehmendem maximal erlaubtem Matchradius ab, was den Fehler in der Berechnung der Ozonabbaurate wiederum vergrößert. Beide Effekte zusammen führen dazu, daß der Fehler im Endergebnis bei zunehmendem R_{\max} bis etwa 500 km kleiner wird und für größere R_{\max} sich nicht mehr wesentlich ändert (Abbildung 5.20) oder in dynamisch gestörten Lagen auch wieder zunimmt. Da die Auswertung auf Fälle beschränkt werden soll, in denen die Luftmasse von der zweiten Sonde möglichst genau getroffen wurde, wurde mit $R_{\max} = 500$ km das kleinste R_{\max} gewählt, bei dem der Fehler des Ergebnisses schon klein ist und auch bei dynamisch gestörten Lagen noch klein bleibt. Der weitere Vorteil eines möglichst kleinen R_{\max} ist, daß Parameter wie die Sonnenzeit für Matche mit kleinem Matchradius besser für die tatsächlich vermessene Luftmasse repräsentativ sind und man dynamisch bedingte Einflüsse besser ausschließt. Es wurde getestet, ob die berechnete Ozonabbaurate von der Wahl von R_{\max} abhängt. Abbildung 5.21 zeigt, daß dies im Rahmen der Fehlerbalken nicht der Fall ist.

In Abbildung 5.22 wird die Streuung in Abhängigkeit von α (Definition siehe Abbildung 5.18) untersucht. Es wird deutlich, daß bei der Verwendung einer kreisförmigen Matchumgebung im Rand des Polarwirbels bei α um 90° eine deutlich höhere Streuung auftritt, als bei Ereignissen, bei denen die Sonde im wesentlichen entlang des Flugpfades des Luftpaketes gemessen hat. Das ist darin begründet, daß im Wirbelrand der mittlere horizontale Ozongradient senkrecht zur Strömungsrichtung (und damit auch senkrecht zu den PV-Isolinien) deutlich größer ist, als in Strömungsrichtung. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei Matchen im Wirbelrand, bei denen die Sonde noch weiter außen im Wirbel gemessen hat, als sich das Luftpaket befand. Dies sind die Matche mit α um 90° im Gegensatz zu den Matchen mit α um -90° , bei denen die Sonde relativ zum Ort des Luftpaketes weiter innen im Wirbel gemessen hat. Aus Abbildung 5.22 geht hervor, daß im Wirbelkern die Streuung nicht vom Matchwinkel abhängt. Um eine gleichmäßi-

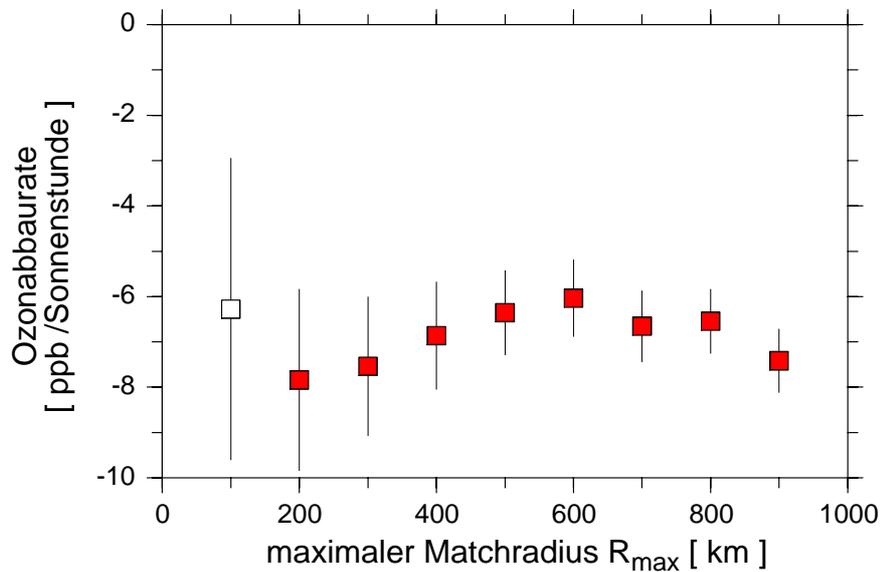


Abbildung 5.21: Berechnete Ozoneabbaurate in Abhängigkeit von der Wahl des maximal zulässigen Matchradius. Das Diagramm beruht auf der gleichen Untergruppe von Matches wie Abbildung 5.22. Die Methode, mit der die Abbauraten aus den Matchdaten berechnet wurden, wird in Kapitel 7 beschrieben. Die Fehlerbalken geben die statistische Unsicherheit als einfache Standardabweichung an.

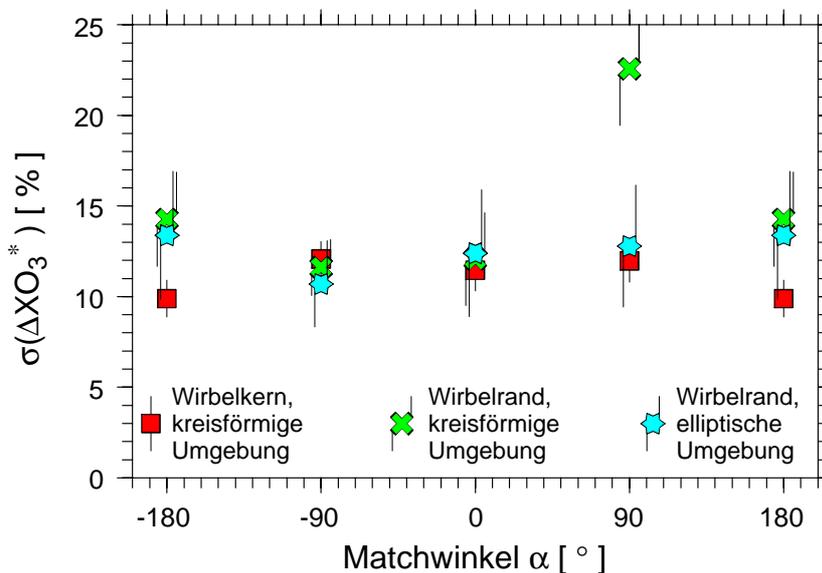


Abbildung 5.22: Streuung der Einzelmatche als Funktion des Matchwinkels. Jeder Punkt gibt $\sigma(\Delta X O_3^*)$ in einem 90° Sektor des Matchwinkels an. Der Sektor ist jeweils zentriert um den auf der x-Achse angegebenen Wert. Das Diagramm beruht auf der Untergruppe von Matches, die zwischen dem 15. Januar und dem 10. Februar 1995 im Höhenbereich 470 bis 500 K stattgefunden haben. Die verschiedenen Farben/Symbole beziehen sich auf verschiedene Definitionen der Matchumgebung (siehe Legende am unteren Bildrand). Um den Effekt deutlicher hervortreten zu lassen, wurden mit 700 km Radius für die kreisförmige Matchumgebung und 700 / 300 km große- / kleine Halbachse für die elliptische Umgebung etwas größere Bereiche gewählt als in der restlichen Auswertung.

ge Verteilung der Streuung zu erreichen, wurde im Wirbelrand die oben beschriebene elliptische Matchumgebung verwendet, während im Wirbelkern eine kreisförmige Matchumgebung am besten geeignet ist.

Abbildung 5.23 zeigt die Streuung der Einzelmatche über der PV Änderung entlang der Trajektorie (genaue Definition siehe Abschnitt 5.5.2). Es ist deutlich zu erkennen, daß Matche mit einer PV Änderung größer als 25% eine deutlich größere Streuung aufweisen und deshalb aus der Auswertung herausgenommen werden sollten.

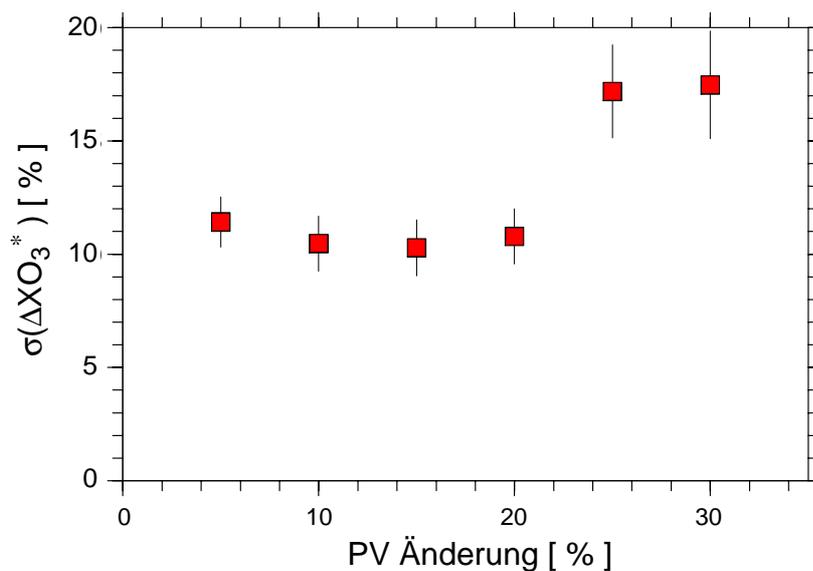


Abbildung 5.23: Streuung der Einzelmatche als Funktion der PV Änderung entlang der Trajektorie (Definition siehe Abschnitt 5.5.2). Jeder Punkt gibt $\sigma(\Delta X O_3^*)$ in einem 10% Intervall der PV Änderung an. Das Diagramm beruht auf der Untergruppe von Matchen, die zwischen dem 15. Januar und dem 10. Februar 1995 im Höhenbereich 470 bis 500 K stattgefunden haben.