

Kapitel 7

Chemische Ozonverluste in den Wintern 1991/92, 1994/95 und 1995/96

7.1 Berechnung der Ozonverlustraten während sonnenbeschienener Zeiten

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie aus dem mit den Auswahlkriterien gefilterten Satz von Matchen (Kapitel 5) chemische Ozonverlustraten berechnet wurden.

Signifikanter chemischer Ozonabbau sollte nach Kapitel 3 nur während Zeiten ablaufen, in denen das Luftpaket von der Sonne beschienen wird. Dieses Verhalten kann auch aus den Match-Daten selbst gezeigt werden, wie später in Abschnitt 7.6 gezeigt wird. Es kann demnach für jeden Match folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$\Delta X_{O_3} = L_s \cdot t_s + e \quad (11)$$

wobei L_s die Ozonänderung pro sonnenbeschienener Zeit angibt und e den statistischen Fehler bezeichnet, der mit dem Match verknüpft ist. Dabei sind die statistischen Unsicherheiten in der Größenordnung des chemischen Ozonabbaus selbst. Ein einzelnes Match Ereignis läßt daher keine Rückschlüsse auf den chemischen Ozonabbau zu.

Eine Ableitung chemischer Ozonverlustraten wird erst möglich, wenn die Matche zu Untergruppen zusammengefaßt werden, wobei jeder Untergruppe jeweils die Matche eines eingeschränkten zeitlichen und vertikalen Intervalls angehören. Die chemische Ozonabbaurate in diesem Zeitraum und Höhenintervall ergibt sich dann aus der Statistik über alle Matche der Untergruppe:

$$[\Delta X_{O_3}]_v = L_s \cdot [t_s]_v + e_v \quad (12)$$

v indiziert die verschiedenen Matche (= verschiedenen Luftvolumina) der Untergruppe, e_v gibt den statistischen Fehler des Matches v an. Bei Ozonverlusten ist L_s negativ; es wird hier analog zu vielen anderen Arbeiten dennoch als Ozonabbaurate bezeichnet, wobei die Inkonsistenz dieser Bezeichnung mit dem Vorzeichen in Kauf genommen wird. Wird (12) für alle Matche einer Untergruppe aufgestellt, ergibt sich ein weit überbestimmtes lineares Gleichungssystem für L_s , dessen least square Lösung (Lösung, welche Summe der e_v^2 minimiert) durch lineare Regression berechnet werden kann. In [Rex,1993] wurde gezeigt, daß dynamisch bedingte Einflüsse auf das Ozonmischungsverhältnis im Luftpaket statistisch verteilt sind und somit den Erwartungswert von L_s nicht beeinflussen. Die Rate L_s wird hier also als chemisch bedingte Ozonabbaurate interpretiert. Statistisch signifikante Ergebnisse ergeben sich nur, wenn L_s auf einer Statistik über viele Matche beruht.

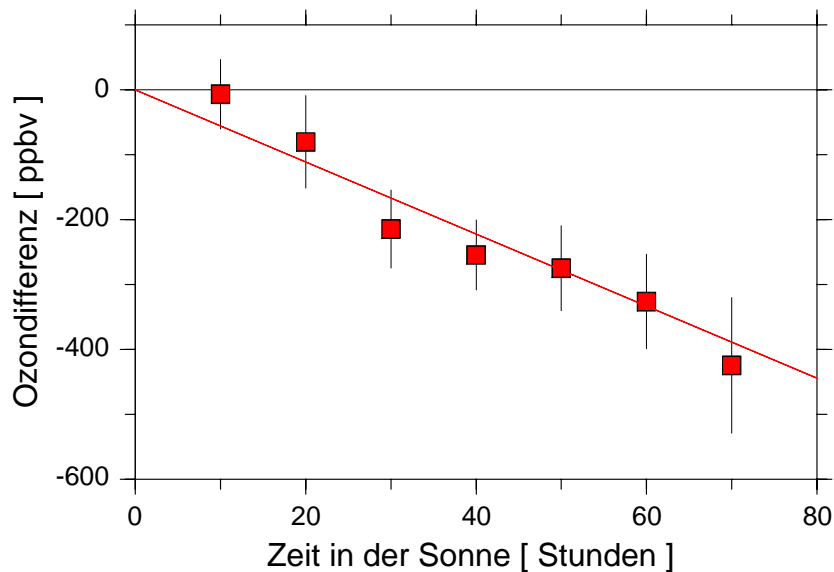


Abbildung 7.1: Differenz der beiden Ozonsondenmessungen (zweite Messung minus erste Messung) gegen die Zeit, die das Luftpaket zwischen beiden Messungen in der Sonne verbracht hat. Die eingetragenen Punkte stellen Mittelwerte dieser Differenz dar, wobei jeweils über alle Matche gemittelt wurde, die Sonnenzeiten in einem ± 10 Stunden Intervall um den jeweils auf der x-Achse angegebenen Wert aufweisen. 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. Die lineare Regression ergibt eine Ozonverlustrate von -5.5 ± 0.75 ppbv/Sonnenstunde. Die Fehlerbalken geben die einfache Standardabweichung an.

Die Ozonabbaurate variiert prinzipiell auch innerhalb einer Untergruppe noch räumlich und zeitlich. Daher müßte in (12) eigentlich auch L_s den Index v erhalten. L_s soll hier den Mittelwert der verschiedenen $[L_s]_v$ bezeichnen. In Abschnitt 7.6 wird untersucht, welche Voraussetzungen nötig sind, damit die Regressionsanalyse den Mittelwert der $[L_s]_v$ ergibt.

In einer Untergruppe von Matchen gibt es häufig Sondenpaarungen, die mehrmals, jeweils auf verschiedenen Niveaus, als Match vorkommen. Von allen diesen Matchen mit gleicher Sondenpaarung wurde in der Auswertung jeweils nur derjenige mit dem kleinsten Matchradius R berücksichtigt. So wurde sichergestellt, daß pro Untergruppe jede Sondenpaarung nur höchstens einmal Verwendung fand und somit die in einer Regression verwendeten Matche statistisch unabhängiger voneinander sind. Eine gewisse statistische Abhängigkeit der einzelnen Matche untereinander verbleibt dennoch, da einzelne Ozonsonden mehrmals auftreten können, wenn sie in einer Untergruppe mit mehreren verschiedenen Sonden gepaart als Match vorkommen. Wegen dieser möglichen statistischen Abhängigkeit einiger für die Regression verwendeter Punkte untereinander, können die im Folgenden gezeigten Fehlerbalken den wahren statistischen Fehler zum Teil etwas unterschätzen.

Abbildung 7.1 zeigt eine lineare Regression für eine Untergruppe von Matchen des Winters 1994/95. Wie später gezeigt wird, ist die hier verwendete Untergruppe so gewählt, daß sie den Zeitraum des maximalen Ozonverlusts dieses Winters erfaßt. Der lineare Zusammenhang zwischen Ozondifferenz und Sonnenzeit, der schon von Rex [1993] für den Ozonabbau im Jahr 1992 gefunden wurde, bestätigt sich hier sehr gut. Ähnliche lineare Zusammenhänge finden sich auch während aller anderen Zeiten und Höhenbereiche, in denen Ozonabbau festgestellt wurde.

Der Ozonabbau pro sonnenbeschienener Zeit (L_s) ist besonders geeignet, um die chemische Situation (speziell den Grad der Aktivierung des Chlors) im Wirbel zu beurteilen. Im Vergleich zum mittleren Ozonabbau pro Tag (L_t) ist er weniger davon abhängig, wieviel Sonne der Wirbel aufgrund der Jahreszeit und seiner Lage erhält. Gerade die sich schnell ändernde Lage des Wirbels kann zu schnellen Änderungen in der Rate L_t führen, auch wenn sich der Grad der Chloraktivierung nicht verändert. Allerdings hängt auch L_s bei gleicher Chloraktivierung etwas von den Beleuchtungsverhältnissen im Wirbel ab, wenn auch wesentlich schwächer als L_t . Da bei kleineren szw die aktuelle Ozonverlustrate größer ist als bei tiefen Sonnenständen, findet während gleich langer sonnenbeschienener Zeiten bei kleineren szw mehr Ozonabbau als bei großen szw statt. Dies führt bei gleichem Grad der Chloraktivierung zu größeren Raten L_s , wenn während sonnenbeschienener Zeiten der mittlere szw größer ist. Dies ist in der Regel der Fall, wenn S_{WIRBEL} größer ist. Bei einer differenzierten Interpretation von L_s muß demnach auch die Verteilung der entlang der Trajektorien aufgetretenen szw betrachtet werden.

Um bei der Angabe von L_s jeweils darauf aufmerksam zu machen, daß der Ozonabbau pro sonnenbeschienener Zeit gemeint ist, wird im Folgenden L_s in ppbv pro Sonnenstunde (ppbv/h_s) angegeben, obgleich 'Sonnenstunde' eigentlich keine physikalische Einheit ist.

7.2 Berechnung von Tagesmitteln der Ozonverlustraten

Die über den Tag gemittelte Ozonverlustrate (L_t) ist dennoch die für eine Bewertung des Ozonverlusts ausschlaggebende Größe. Speziell wenn der über einen gewissen Zeitraum akkumulierte Ozonverlust berechnet werden soll, muß über L_t integriert werden. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie L_t in der vorliegenden Arbeit aus L_s berechnet wurde und welche Vorteile dieses Verfahren hat.

L_t wurde bestimmt, indem L_s mit der mittleren Sonnenscheindauer pro Tag multipliziert wurde, die für das jeweilige Zeit- und Höhenintervall für Luftmassen innerhalb des Polarwirbels berechnet wurde. Dazu wurde S_{WIRBEL} (vgl. Abbildungen 6.5, 6.10 und 6.16) für alle isentropen Niveaus bestimmt und entsprechend der für die Interpolation benutzten vertikalen und zeitlichen Intervalle gemittelt. Tests haben ergeben, daß im Ergebnis keine merklichen Unterschiede auftreten, wenn statt dieser Reihenfolge der Mittelung zunächst für jeden Match das bei diesem Match aufgetretene ΔXO_3 mit dem zum Zeitpunkt des Matches und im Niveau des Matches gültigen S_{WIRBEL} multipliziert wird und erst danach L_s als Regression über diese Werte berechnet wird.

Eine naheliegendere Methode, Ozonverluste pro Tag zu berechnen, wäre, L_t als least square Lösung folgenden Gleichungssystems zu berechnen:

$$[\Delta\text{XO}_3]_v = L_t \cdot [t]_v + e_v \quad (13)$$

Das tatsächlich angewendete Verfahren hat demgegenüber aber zwei wesentliche Vorteile. Da der Ozonverlust tatsächlich nur während t_s auftritt, weist der pro Flugzeit bei den verschiedenen Matches aufgetretene Ozonverlust schon allein durch die statistische Streuung von $[t_s]_v/[t]_v$ eine beträchtliche Streuung auf, selbst wenn L_s bei allen Matches gleich wäre. Diese Streuung tritt bei der Lösung von (13) als statistischer Fehler im Ergebnis auf, während sie durch das hier verwendete Verfahren das Ergebnis nicht beeinflusst. Weiterhin wird auf diese Weise der Einfluß der Stichprobe geringer gehalten. Weicht das über v gemittelte $[t_s]_v/[t]_v$ bei den beprobten Luftpaketen von S_{WIRBEL} ab, würde L_t weniger für den Wirbel repräsentativ sein, wenn es als Lösung von (13) berechnet würde. Wenn z.B. die beprobten Luftpakete im Mittel

mehr Sonne erhalten haben, als der gesamte Wirbel, würde L_t als Lösung von (13) die mittlere Ozonabbaurate im Wirbel überschätzen. Eine solche Abweichung könnte durch ein ungleichmäßiges Beprobieren des Wirbels auftreten, wenn etwa Bereiche stärker beprobt werden, in denen mehr Sonne vorhanden ist. Bei der in der tatsächlich gewählten Methode L_t zu berechnen, wird sichergestellt, daß der pro sonnenbeschienener Zeit aufgetretene Ozonverlust korrekt mit der im Mittel im Wirbel vorherrschenden Sonnenzeit pro Tag auf mittlere Ozonverluste pro Tag umgerechnet wird.

Eine Ausnahme bilden Analysen, bei denen die Unterschiede der Ozonabbaurate in verschiedenen Wirbelbereichen untersucht werden. Bei diesen Untersuchungen wurde L_t jeweils als least square Lösung von (13) berechnet, da bei dieser Analyse auch die Korrelation des Ozonabbaus mit den unterschiedlichen Tageslängen in den verschiedenen Wirbelbereichen untersucht werden sollte. Dies wäre nicht sinnvoll, wenn diese Korrelation von vorneherein als Annahme in die Analysen einfließen würde.

In den folgenden Abschnitten werden die Ozonverluste während der untersuchten Winter detailliert beschrieben. Soweit nicht anders vermerkt, handelt es sich bei allen Angaben um Ozonabbauraten bei denen über den gesamten Polarwirbel gemittelt wurde. Die Fehlerbalken und Fehlerangaben beziehen sich jeweils auf die einfache Standardabweichung. Eine gemeinsame Interpretation und Diskussion der Ergebnisse aller Winter folgt im Kapitel 8.

7.3 Der Winter 1991/92

Der Winter 1991/92 wurde schon in [Rex, 1993] behandelt. Seitdem wurde jedoch der gesamte Ozonsondendatensatz aus den Rohdaten mit einem einheitlichen Programm neu berechnet und einer einheitlichen Qualitätskontrolle unterzogen. Weiterhin wurden zusätzlich zu den in [Rex, 1993] verwendeten drei Schichten auf weiteren 8 Niveaus Trajektorien gerechnet. Die in [Rex, 1993] beschriebene Auswertung wurde mit dem homogenisierten Sondendatensatz und dem ergänzten Trajektorien datensatz nochmals durchgeführt, wobei jetzt der gesamte Zeitraum Januar bis März und der Höhenbereich 350 K bis 550 K berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse dieser vollständigeren Auswertung werden hier mit der gegenüber [Rex, 1993] veränderten Definition des Polarwirbels dargestellt, um mit den Ergebnissen der folgenden Winter besser vergleichbar zu sein.

7.3.1 Zeitlicher Verlauf der Ozonabbaurate

Die Abbildungen 7.2 und 7.3 zeigen den zeitlichen Verlauf L_s und von L_t auf der 475 K Isentrope während Januar bis März 1992. Zusätzlich ist jeweils die Fläche möglicher PSC-Existenz (A_{NAT}) auf dieser Isentrope mit eingezeichnet. Die Ozonverlustrate stieg im Laufe des Januars schnell an und erreichte gegen Ende Januar mit $L_s = -10,1 \pm 1,3$ ppbv/h_s bzw. $L = -54 \pm 7$ ppbv/Tag ($= -1,7 \pm 0,2$ %/Tag) ein Maximum. Im Laufe des Februars fiel sie wieder auf nicht signifikante Werte ab. Während des gesamten März blieben die Werte dann unterhalb der Nachweisgrenze. Der zeitliche Verlauf der Ozonabbaurate stimmt gut mit dem Auftreten von PSC-Bedingungen überein, ist jedoch gegenüber diesem deutlich verzögert. A_{NAT} erreicht schon in der ersten Januarhälfte ihr Maximum und wird bereits nach der Erwärmung um den 20. Januar schnell kleiner. Ab Ende Januar sind dann keine PSC-Bedingungen mehr aufgetreten. Die Maxima der Ozonabbauraten, sowohl von L_t als auch von L_s , stimmen zeitlich also etwa mit dem Ende der PSC-Periode überein. Danach geht der Ozonverlust innerhalb von etwa zwanzig Tagen auf insignifikante Werte zurück.

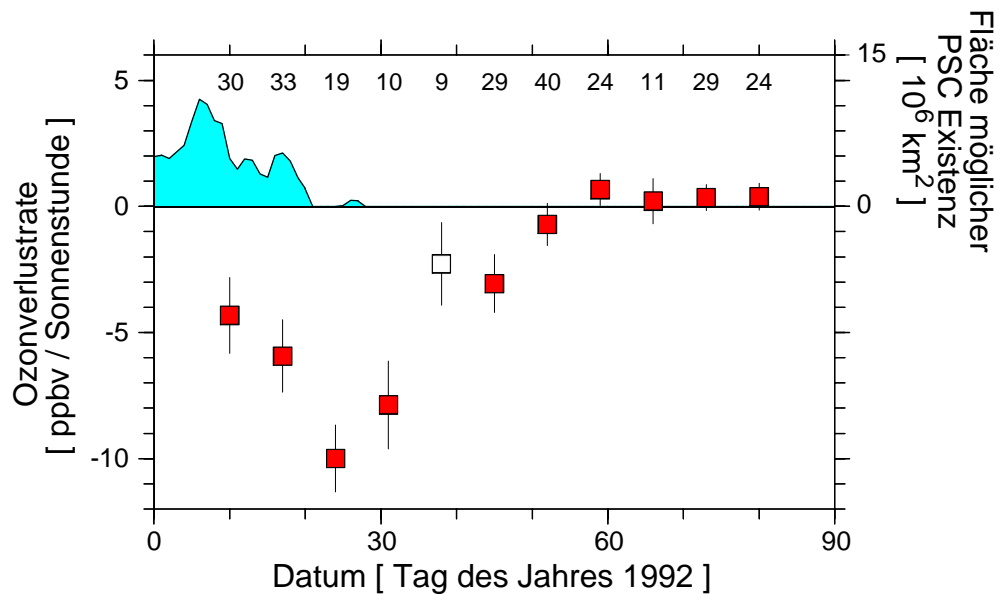


Abbildung 7.2: Zeitlicher Verlauf der Ozonabbaurate L_s im 465-485 K Höhenbereich während Januar bis März 1992. Die Punkte stellen jeweils Ergebnisse von Regressionen über Matche aus einer ± 7 Tage Umgebung dar. Am oberen Bildrand ist die Anzahl der pro Punkt verwendeten Matche vermerkt. Der Punkt, der auf weniger als zehn Matchen beruht, wurde nicht ausgefüllt. Die ausgefüllte Fläche gibt A_{NAT} auf der 475 K Isentrope an.

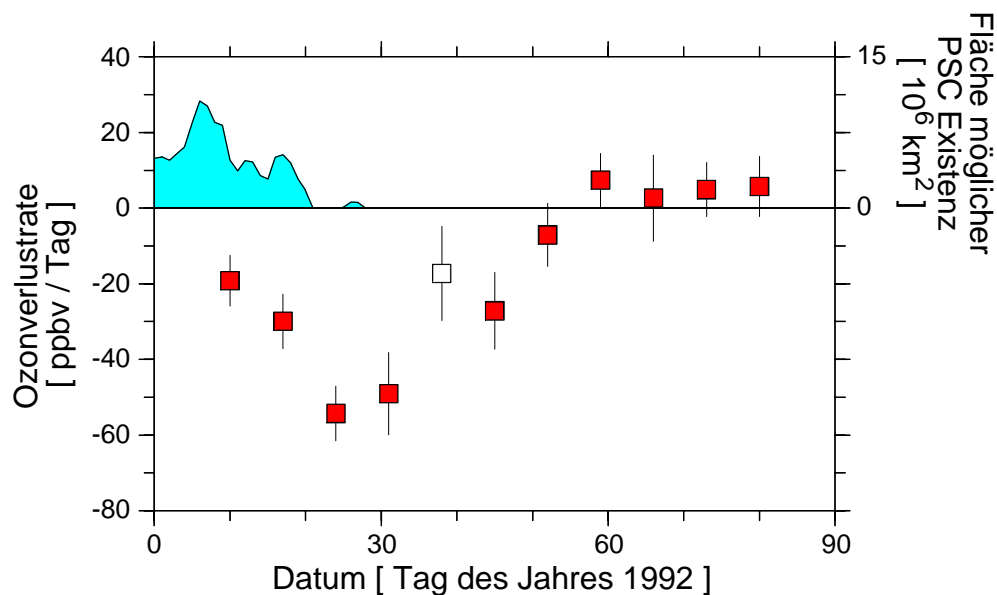


Abbildung 7.3: Wie Abbildung 7.2, aber für die Ozonabbaurate L_t .

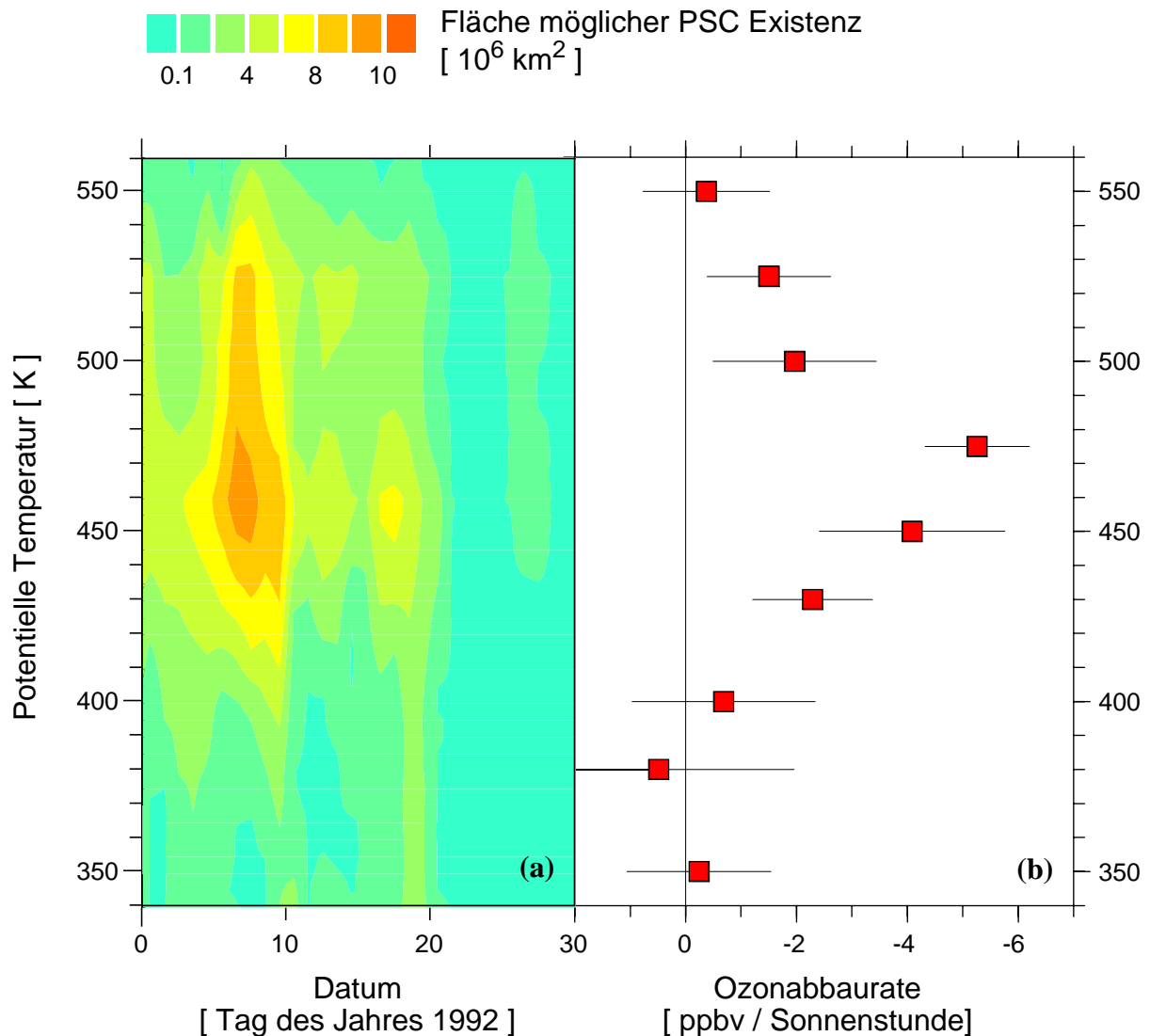


Abbildung 7.4: (a) Höhen-/Zeitschnitt von A_{NAT} während Januar 1992 (Ausschnitt aus Abbildung 6.3). (b) Profil der Ozonabbaurate L_s während des Zeitraums 1. Januar bis 9. Februar 1992.

7.3.2 Höhenprofil der Ozonabbaurate

Das Höhenprofil der Rate L_s während der Hauptabbauphase (1. Januar bis 9. Februar 1992) wird in Abbildung 7.4 gezeigt und dem Höhen-Zeitschnitt von A_{NAT} im Januar gegenübergestellt. L_s nimmt in 475 K ein ausgeprägtes Maximum an und nimmt darüber sehr schnell ab, wobei insignifikante Werte ab 550 K erreicht werden. In Abbildung 7.4 nicht gezeigt, ist ein weiterer Meßwert bei 700 K, wo ebenfalls keine signifikante Abbaurate gefunden wurde. Unterhalb von 475 K nimmt L_s kontinuierlich ab und bei 400 K und darunter wurde kein signifikanter Abbau mehr gefunden. Das Höhenprofil von L_s stimmt sehr gut mit dem Höhenprofil von A_{NAT} überein. Sowohl die Lage des Maximums von L_s trat in der Höhe auf, in der die größten Flächen mit PSC Temperaturen lagen, als auch die Ober- und Unterkante des Ozonabbaubereichs stimmen mit der oberen und unteren Begrenzung des nach EZMW Temperaturen möglichen PSC Bereichs überein. Sogar ein gewisses Plateau der Ozonabbaurate bei 500 K -

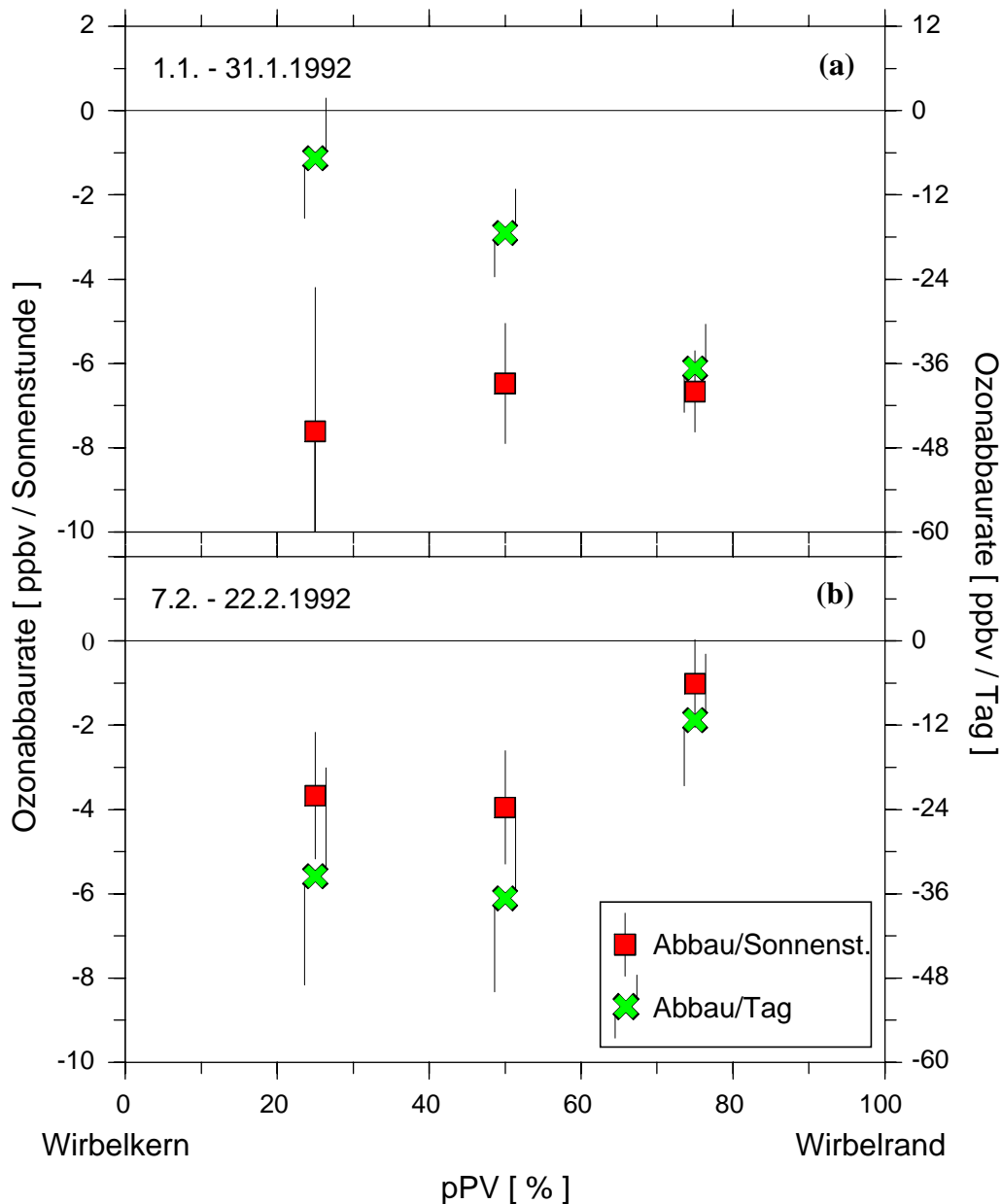


Abbildung 7.5: Die Ozonabbauraten L_s und L_t im 465-485 K Höhenbereich als Funktion von pPV während zweier Perioden des Winters 1991/92. (a) 1. bis 31. Januar vor und im Maximum des Ozonverlusts, (b) 7. bis 22. Februar während der Erholungsphase.

525 K kann man in A_{NAT} erkennen. Eine solche Übereinstimmung sollte allerdings bei Berücksichtigung der Fehlerbalken der Ozonverlustraten und der beträchtlichen Unsicherheiten, die mit der Bestimmung von PSC Bildung verbunden sind, nicht überinterpretiert werden.

7.3.3 PV-Profil der Ozonabbauraten

Abbildung 7.5 zeigt für zwei Zeiträume, wie sich jeweils der über den Polarwirbel gemittelte Ozonverlust auf den Rand und den Kern des Polarwirbels aufteilt. Wie erwähnt, wurde für diese Abbildung L_t ausnahmsweise durch Lösen von (13) bestimmt. Während des Januars ist L_s in beiden Wirbelbereichen nicht signifikant verschieden. L_t ist jedoch im Wirbelrand wesentlich

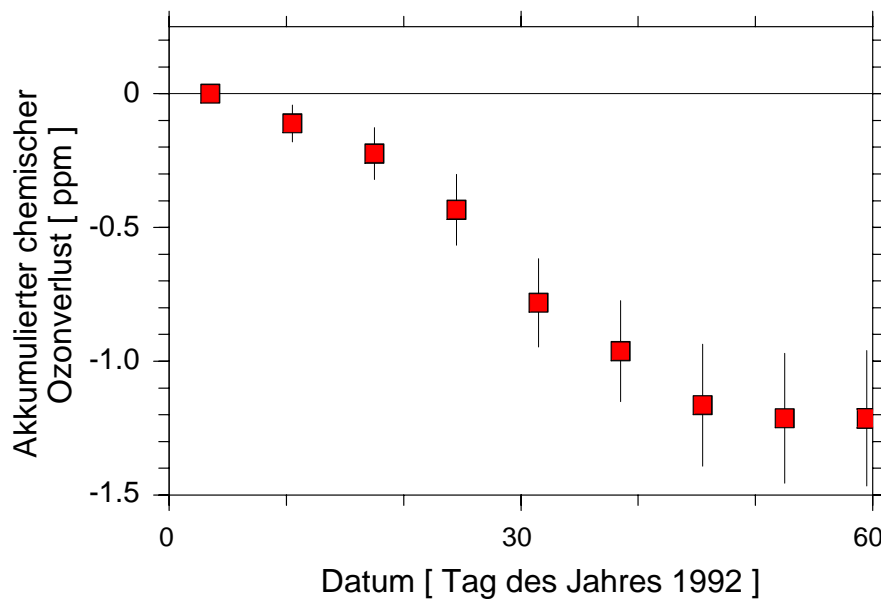


Abbildung 7.6: Akkumulierter chemischer Ozonverlust für die Luftschicht, die vom 1. Januar bis zum 29. Februar 1992 von 500 K auf 460 K absinkt.

größer als im Wirbelkern, was konsistent mit der in diesem Zeitraum dort längeren mittleren Tageslänge ist (vgl. Abbildung 6.5). Während der Erholungsphase im Februar hat sich dieses Bild deutlich verändert. L_s geht im Wirbelrand wesentlich schneller zurück als im Wirbelkern. Dieser schnellere Rückgang von L_s zusammen mit der Tatsache, daß die Unterschiede im Beleuchtungsverhältnis zwischen Wirbelrand und Wirbelkern mit der Rückkehr der Sonne abnehmen, führt dazu, daß nun sogar die täglichen Ozonverluste im Wirbelkern größer sind, als im Wirbelrand.

7.3.4 Über den Winter akkumulierter Ozonverlust

Soll das Ausmaß des Ozonabbaus bewertet werden, ist der über den Winter akkumulierte Ozonverlust die entscheidende Größe.

Für die Berechnung des akkumulierten Ozonverlusts in einer bestimmten Luftmasse muß das langsame diabatische Absinken der Luftmassen über die isentropen Flächen hinweg berücksichtigt werden. Die zeitliche Integration der Ozonabbauraten muß also entlang eines langsam absteigenden Pfades in der Theta-Datum Fläche erfolgen (siehe Abbildung 6.6). Um das zu ermöglichen, müßte zu jedem Zeitpunkt ein vollständiges Höhenprofil der Ozonabbaurate bekannt sein. Die Anzahl der Matche während des EASOE Winters läßt jedoch nur die Berechnung eines über den gesamten Zeitraum gemittelten Höhenprofils sowie zeitlich aufgelöster Ozonabbauraten in nur einer isentropen Fläche zu. Um den akkumulierten Abbau berechnen zu können, sind demnach zusätzliche Annahmen über die zeitliche Variation des Höhenprofils der Abbaurate erforderlich. Hier wird angenommen, daß die Form des Höhenpro-

files zeitlich konstant war und nur durch die Ozonabbaurate in 475 K moduliert wurde. Mit dieser Annahme durchquerten die Luftmassen den Bereich des maximalen Abbaus im Laufe der Zeit. Das andere Extrem wäre die Annahme, daß das Höhenprofil der Abbaurate mit den Luftmassen absank und es somit eine Luftmasse gibt, die sich permanent im Maximum des Profils befand. Dieses Maximum hätte dann Anfang Januar etwas oberhalb von 475 K und Mitte Februar etwas darunter gelegen, so daß sich im Mittel über den Zeitraum ein Maximum in 475 K ergäbe. Diese Annahme wäre demnach ebenfalls mit den in Abbildung 7.4 gezeigten Meßergebnissen konsistent. Mit dieser Annahme ergäbe sich ein größerer Abbau, so daß die hier vorgestellten Werte eher als untere Grenze anzusehen sind.

Abbildung 7.6 zeigt den akkumulierten Ozonabbau für die Luftschicht, die von 500 K Anfang Januar auf 460 K Ende Februar absank. Dies ist die Luftschicht, für die der größte akkumulierte Abbau gefunden wurde. In dieser Luftschicht wurde ein über den Wirbel gemittelter chemischer Ozonverlust von $-1,2 \pm 0,2$ ppbv zwischen dem 1. Januar und dem 29. Februar 1992 berechnet. Dies entspricht einem Abbau von 34 ± 6 %, wenn es auf das mittlere Ozonmischungsverhältnis bezogen wird, welches am 1. Januar in der Luftschicht geherrscht hat. Das als Bezugsgröße verwendete mittlere Ozonmischungsverhältnis wurde als Mittel über alle Ozonsondenmessungen bestimmt, die zwischen dem 27. Dezember 1991 und dem 14. Januar 1992 in der entsprechenden Luftschicht stattgefunden haben.

7.4 Der Winter 1994/95

7.4.1 Zeitlicher Verlauf der Ozonabbauraten

Durch die im Winter 1994/95 erstmalig durchgeführte Match-Kampagne ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Matche in diesem Winter wesentlich größer als in 1991/92 und läßt eine deutlich detailliertere Auswertung zu. Zunächst ist in Abbildung 7.7 und 7.8 zur einfacheren Vergleichbarkeit zum Winter 1991/92 der zeitliche Verlauf von L_s und L_t sowie jeweils der von A_{NAT} ähnlich wie in den Abbildungen 7.2 und 7.3 dargestellt. Die Raten sind jeweils auf den drei isentropen Flächen 440 K, 475 K und 490 K angegeben. Im Winter 1994/95 lassen sich zwei zeitlich deutlich getrennte Phasen schnellen Ozonverlusts erkennen. Die erste Phase erstreckte sich von Mitte Januar bis Mitte Februar und fand in allen drei hier gezeigten Schichten statt, wobei die größten Raten in der obersten Schicht (490 K) auftraten. Während des zweiten Ereignisses Mitte März wurde signifikanter Ozonverlust nur in den beiden unteren Schichten (440 K und 475 K) gefunden, wobei die größten Raten in der untersten Schicht auftraten. In 475 K betrug das Maximum der Ozonabbaurate während des ersten Ereignisses: $L_s = -7,2 \pm 1,5$, $L_t = -53 \pm 11$ ppbv/Tag ($= -1,6 \pm 0,4$ %/Tag). Nur 15 K darüber, in 490 K, ergaben sich deutlich größere maximale Raten: $L_s = -9,5 \pm 1,4$, $L_t = -71 \pm 10$ ppbv/Tag ($= -2,1 \pm 0,3$ %/Tag). Für beide Ozonverlustphasen dieses Jahres galt wiederum, daß der Ozonabbau stets vom Auftreten tiefer Temperaturen eingeleitet wurde und während der Erwärmung innerhalb von etwa zwei Wochen wieder zurückging. Besonders deutlich wird dies während der zweiten Ozonverlustphase im März, wo in 490 K die PSC-Temperaturen kaum unterschritten wurden und analog dazu auch kein erneuter Ozonabbau stattfand. A_{NAT} war während dieses zweiten Ereignisses in der untersten Schicht am größten und dort fanden sich auch die größten Ozonabbauraten.

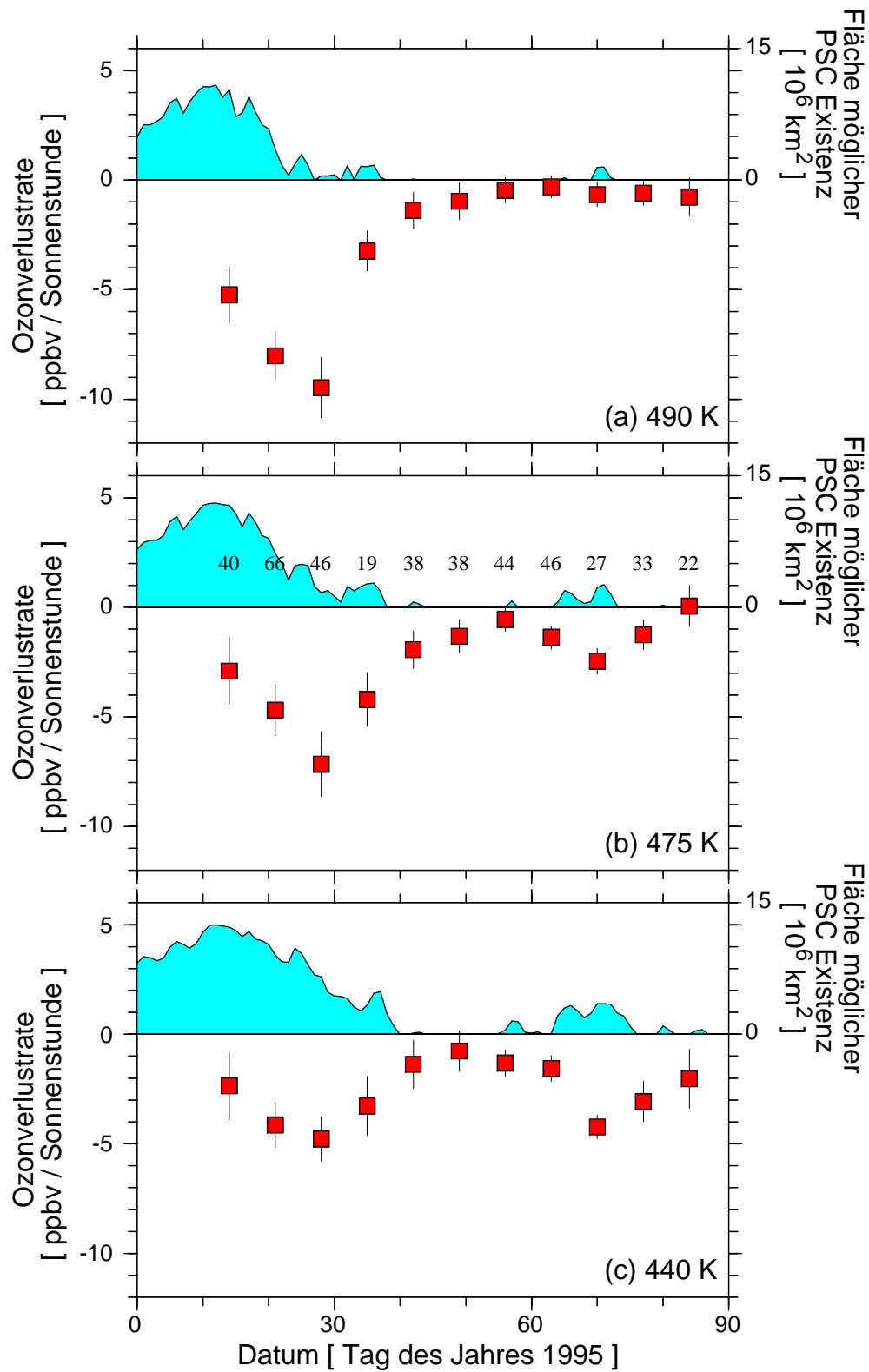


Abbildung 7.7: Wie Abbildung 7.2 für drei Höhenbereiche während Januar bis März 1995. (a) 480-500 K, (b) 470-480 K, (c) 430-450 K. Die unterschiedliche vertikale Auflösung wurde gewählt, um jeweils eine befriedigende statistische Signifikanz zu erreichen.

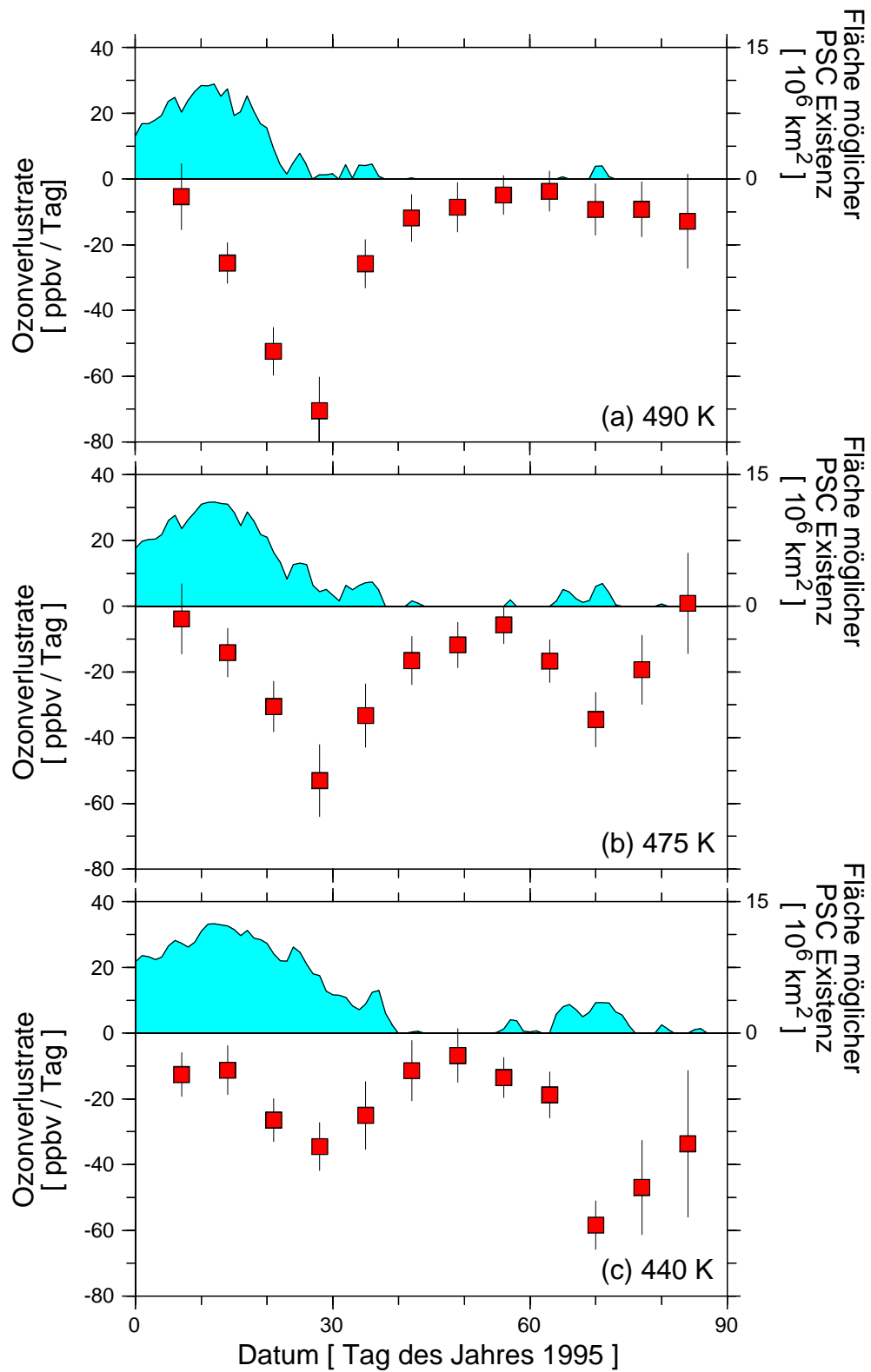


Abbildung 7.8: Wie Abbildung 7.7, aber für die Ozonabbaurate L_{τ} .

7.4.2 Höhen/Zeitschnitt der Ozonabbaurate

Durch die große Anzahl von Matches kann die Ozonverlustrate in diesem Winter in kontinuierlicher Höhengauflösung angegeben werden. Abbildung 7.9a zeigt einen Höhen/Zeitschnitt von L_s . Die Abbildung beruht auf 600 linearen Regressionen über jeweils verschiedene Untergruppen von Matches, wobei jede Untergruppe Matche aus einem gewissen Zeit- und Theta-Intervall umfaßt. Die Mitten der verwendeten Intervalle sind am linken und unteren Bildrand durch Punkte angedeutet. Die verwendeten Intervallbreiten sind ± 7 Tage bzw. ± 10 K in 520 K und darunter. In 535 K und darüber wurde in der Vertikalen stattdessen eine Intervallbreite von ± 15 K verwendet. Diese Die horizontalen und vertikalen Mittelungsbereiche sind durch die beiden Kästen nahe der linken Skala illustriert. In beiden Richtungen überlappen die Intervalle benachbarter Regressionen. Es sind also sowohl in vertikaler als auch in zeitlicher Richtung gleitende Mittel dargestellt. Für die flächige, farbkodierte Darstellung wurde zwischen den Ergebnissen der Regressionen linear interpoliert.

Drei Isolinien von A_{NAT} sind zur einfacheren Orientierung mit eingezeichnet. Ein vollständiger und übersichtlicher Höhen/Zeitschnitt der möglichen PSC-Flächen findet sich in Abbildung 6.8. Weiterhin ist das über den Wirbel gemittelte diabatische Absinken der Luftmassen durch die gepunkteten Linien angedeutet. Diese Linien sind analog zu denen in Abbildung 6.11.

Der Fehler der sich aus den Regressionen ergibt, ist in Abbildung 7.10 gezeigt. Hier ist die gegenüber Abbildung 7.9a geänderte Farbskala zu beachten, die gewählt wurde, damit die Strukturen erkennbar bleiben.

In Abbildung 7.9 ist die vertikale Erstreckung der beiden Ozonverlustphasen gut zu erkennen. Während der Ozonverlustphase Ende Januar fand in der Säule von ca. 420 K bis 590 K chemischer Ozonverlust statt. Dieser vertikale Bereich stimmt gut mit dem Bereich der PSC-Temperaturen im Januar überein. Bezogen auf die hier betrachteten Ozonmischungsverhältnisse waren die Verlustraten oberhalb von 475 K deutlich größer als im Bereich darunter. Wie an A_{NAT} sichtbar, begann die Erwärmung im oberen Bereich und führte dort bereits Mitte Januar zu einem Ende der Periode mit PSC-Temperaturen. Die Erwärmung setzte sich dann im Verlauf von etwa zwei Wochen nach unten durch, so daß unterhalb von etwa 500 K die PSC-Temperaturen noch bis in den Februar hinein anhielten. Demgegenüber geht der Ozonabbau in der gesamten Säule von 420-590 K im wesentlichen gleichzeitig zurück und erreicht insignifikante Werte in den ersten Februartagen. So hält der Abbau also in 550-590 K noch ca. 10 Tage nach dem Ende der PSC-Phase an, während er in 420-500 K bereits einige Tage vor dem theoretischen Ende der PSC-Phase abklingt. Diese Unterschiede sind durch die gewählte zeitliche Auflösung der Analyse gerade noch signifikant.

Im Bereich von 380-420 K begann der Ozonverlust erst Anfang Februar, nachdem auch dort kurz größere Bereiche mit PSC-Temperaturen aufgetreten waren. Zunächst endet er in diesem Bereich bereits wenige Tage später.

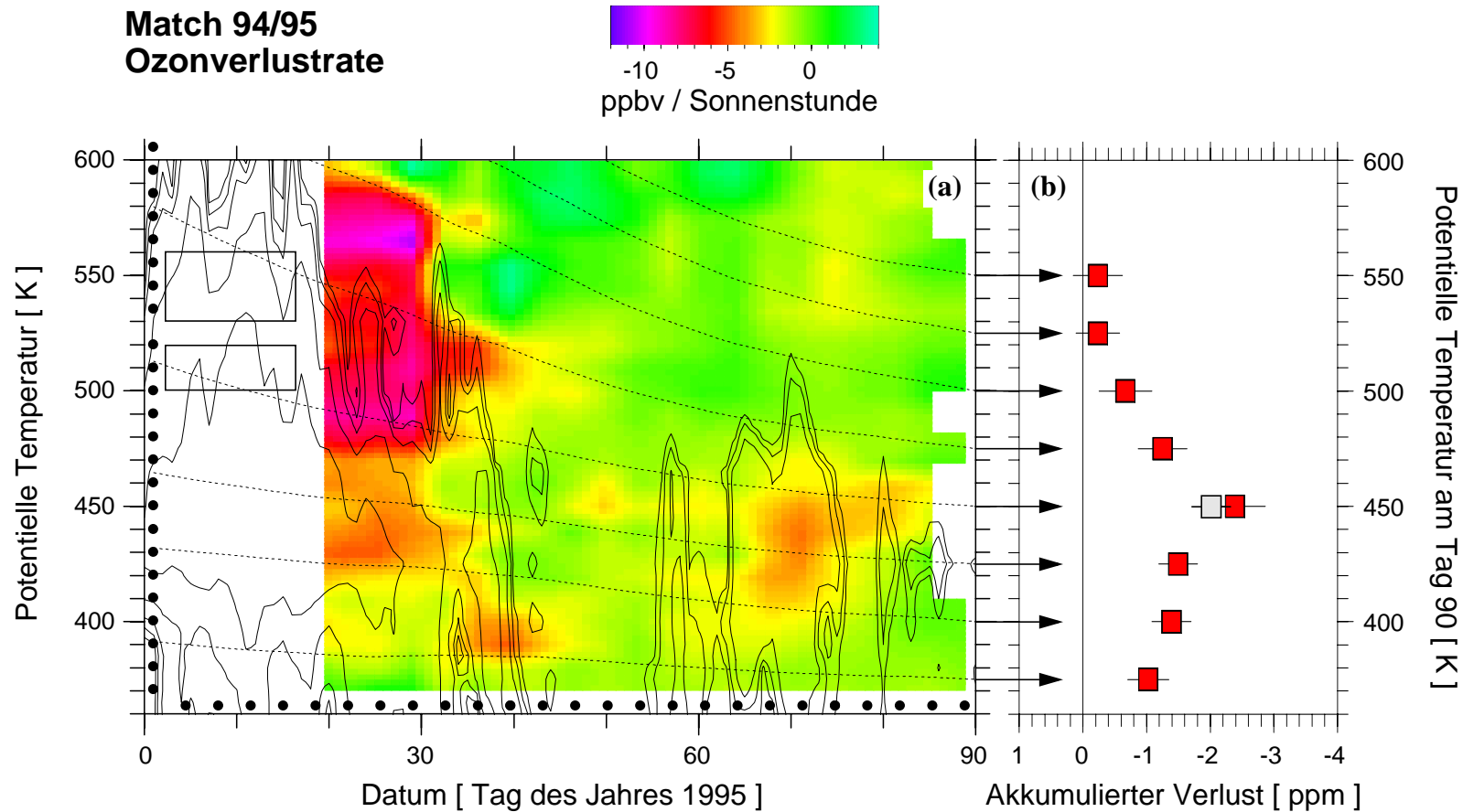


Abbildung 7.9: (a) Höhen-/Zeitschnitt der Ozonabbaurate L_s während Januar bis März 1995. Vor dem 20. Januar sind die täglichen Sonnenzeiten sehr kurz und L_s deswegen schlecht definiert. Die Abbildung beruht auf vielen Regressionen über insgesamt 1470 unterschiedliche Match Ereignisse. Die Kästen nahe der linken Skala geben die zeitliche und vertikale Auflösung an, Details siehe Text. Zusätzlich sind die $0,3$, $0,7$ und $1,5 \cdot 10^6$ km Isolinien von A_{NAT} zur Orientierung als durchgezogene Konturlinien mit eingezeichnet. Eine übersichtlichere Darstellung von A_{NAT} findet sich in Abbildung 6.8. Die gepunkteten Linien geben die diabatische Absinkbewegung im Wirbel an (vgl. Abbildung 6.11).

(b) Profil des akkumulierten chemischen Ozonabbaus zwischen 1. Januar und 31. März, welches sich aus einer Integration von L_t entlang der gepunkteten Linien in (a) ergibt. L_t ist auch vor dem 20. Januar gut definiert und wurde auch in dieser Zeit für die Berechnung des akkumulierten Abbaus verwendet (vgl. auch Abbildung 7.11). Die graue Markierung gibt den akkumulierten Ozonabbau zwischen 1. Januar und 20. März an (siehe Text).

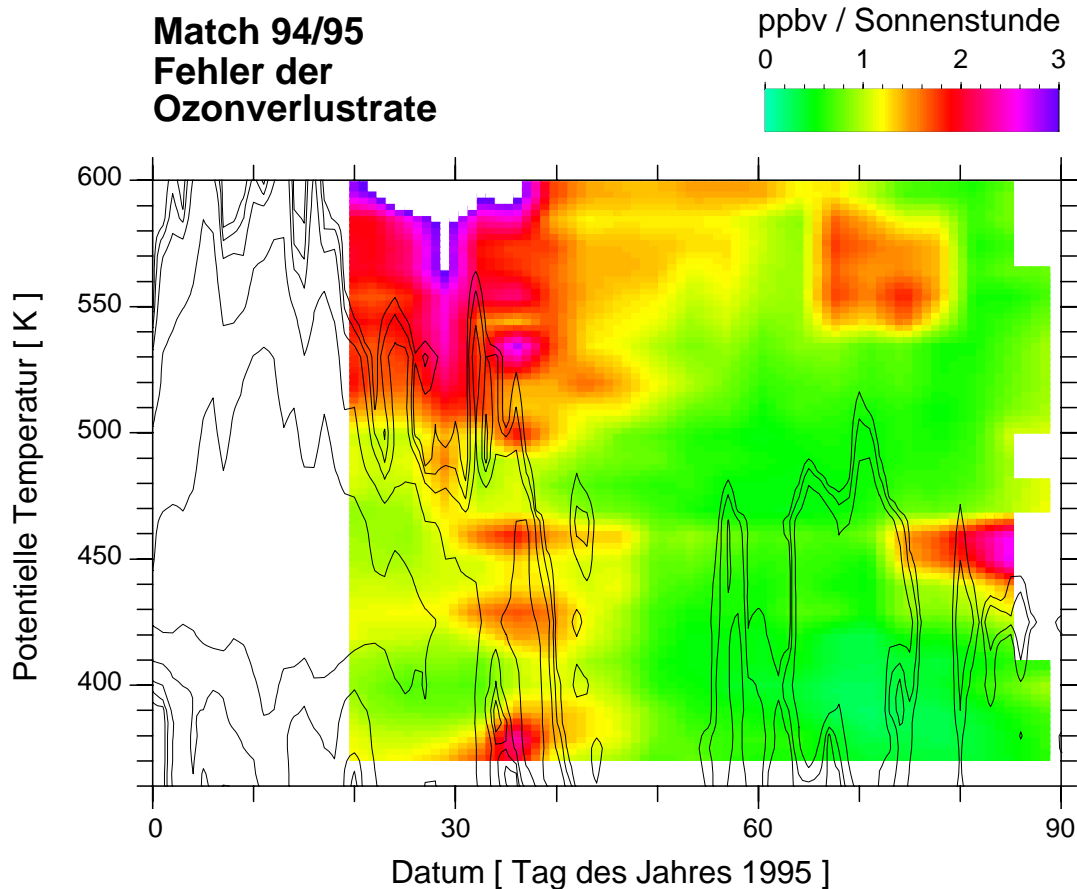


Abbildung 7.10: Zu Abbildung 7.9a gehörender statistischer Fehler der Ozonverlustrate L_s .

Die zweite Ozonverlustphase erstreckte sich von den ersten Märztagen bis etwa Mitte März. Der Ozonverlust bleibt dabei auf den Bereich von ca. 400-470 K beschränkt. Dieser Zeitraum und Höhenbereich stimmt wiederum sehr gut mit dem Bereich überein, in dem im März PSC-Temperaturen erreicht wurden. Die Rate L_s ist während dieser zweiten Phase jedoch wesentlich kleiner, als die maximalen L_s , die im Januar auftraten.

Für die Beurteilung der Auswirkungen der Ozonverlustraten sind jedoch die Raten L_t ausschlaggebend. Die Verlustrate der Ozonsäulendichte ergibt sich aus der vertikalen Verteilung der Verlustrate der Ozonkonzentration. Letztere ist in Abbildung 7.11a dargestellt, die zugehörigen statistischen Fehler sind in Abbildung 7.12 gegeben. Die Konzentration ist anders als das Mischungsverhältnis keine physikalische Erhaltungsgröße, sondern neben der chemisch bedingten Änderung der Konzentration können in einer Luftmasse auch Konzentrationsänderungen durch Expansion oder Kompression hervorgerufen werden. Um nur den chemisch bedingten Anteil der Konzentrationsänderung zu erfassen, wurde zunächst wie bisher die Verlustrate des Ozonmischungsverhältnisses bestimmt. Diese wurde dann mit zeitlich variablen mittleren Temperatur- und Druckprofilen auf die Verlustrate der Konzentration umgerechnet. Die mittleren Profile wurden aus allen im Wirbel erfolgten Ozonsondenmessungen bestimmt.

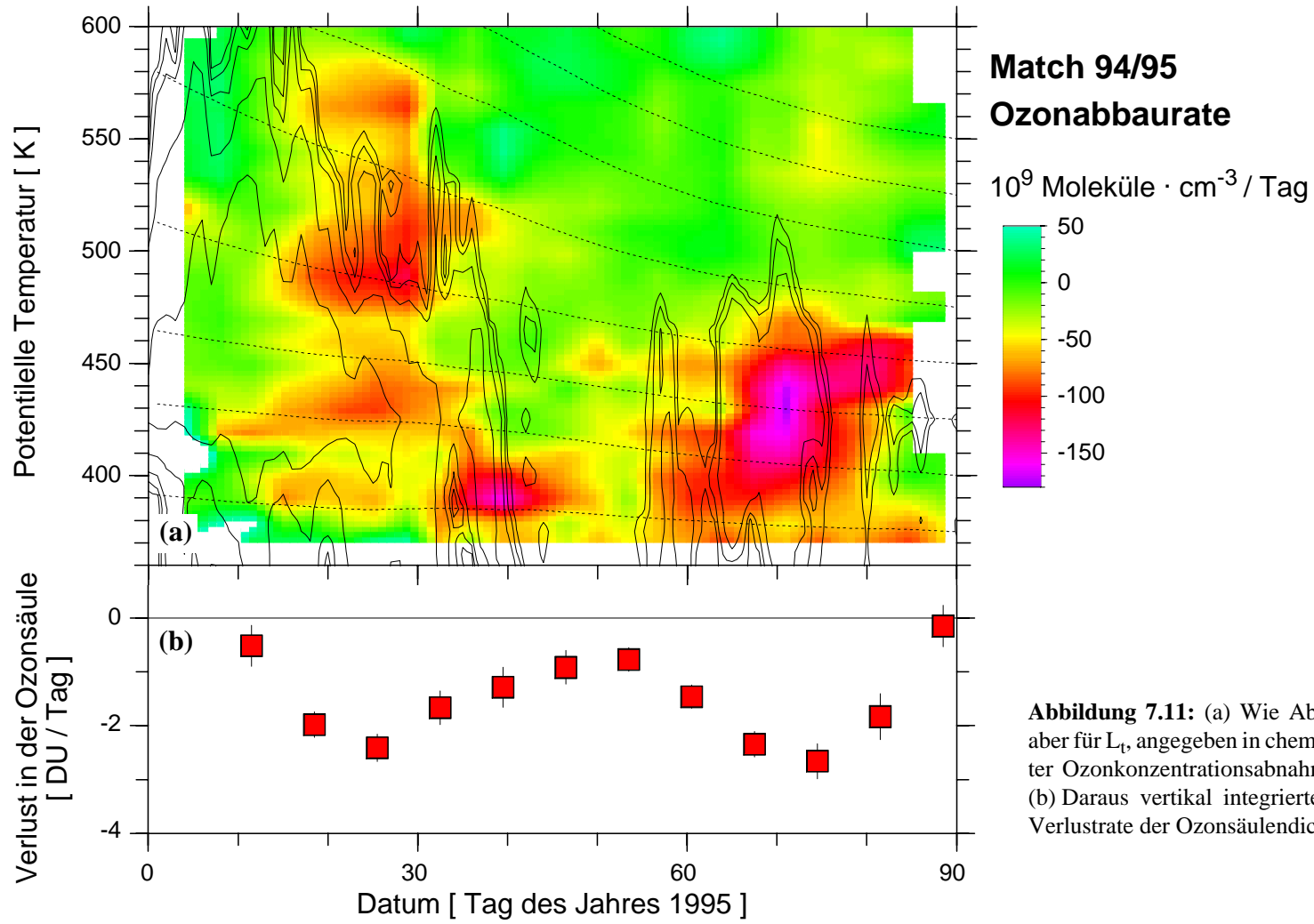


Abbildung 7.11: (a) Wie Abbildung 7.9. aber für L_{c} , angegeben in chemisch bedingter Ozonkonzentrationsabnahme pro Tag. (b) Daraus vertikal integrierte chemische Verlustrate der Ozonsäulendichte.

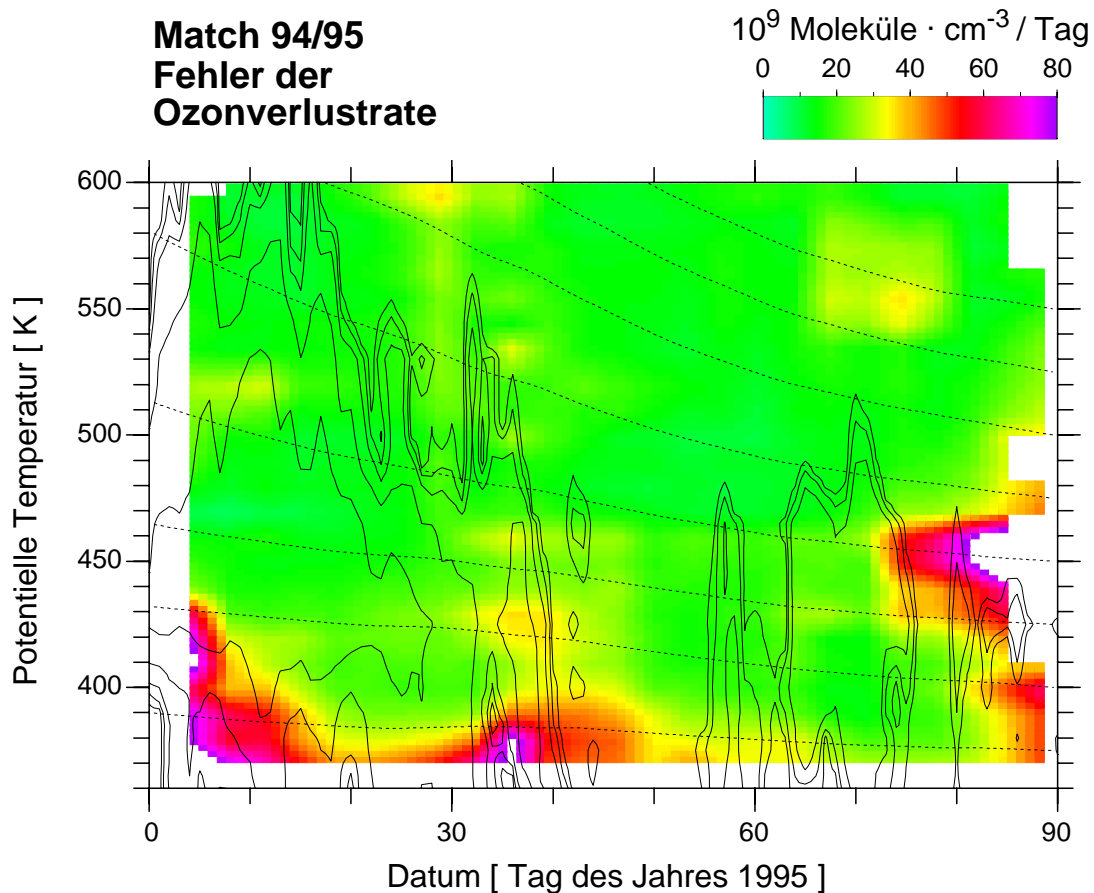


Abbildung 7.12: Zu Abbildung 7.11a gehörender statistischer Fehler der Ozonverlustrate L_t

Abbildung 7.11a zeigt, daß in diesen Einheiten in der Ozonverlustperiode im März deutlich größere Raten vorkommen, als während der früheren Verlustperiode. Das ist zum Teil durch die im März längeren Sonnenscheindauern pro Tag begründet. Ein weiterer Grund ist, daß dieser Ozonverlust weiter unten und somit im Bereich größerer Luftdichte stattfand, wo das Verhältnis Ozonkonzentration zu Ozonmischungsverhältnis größer ist.

7.4.3 Verlust in der Ozonsäule

Aus den Daten der Abbildung 7.11a wurde mit (3) die Verlustrate der Ozonsäule aufintegriert. Dabei wurde für die nötige Umrechnung von Theta auf geometrische Höhe das mittlere, zeitlich veränderliche Profil $h(\Theta)$ verwendet, welches für einige Niveaus in Tabelle 2.1 gegeben ist. Die für die Ozonsäule gefundenen Verlustraten in DU pro Tag sind in Abbildung 7.11b gegeben. Streng genommen beziehen sich diese Säulenverlustraten nur auf die Säule zwischen 380 K und 600 K. Da aber weder im oberen noch im unteren Randbereich der Abbildung 7.11a noch größerer Ozonverlust beobachtet wird und auch außerhalb dieses Bereichs folglich Abbildung 6.8 das Auftreten von PSCs und damit signifikantem Ozonabbau sehr unwahrscheinlich ist, kann davon ausgegangen werden, daß diese Säulenverluste den Verlust in der Gesamtsäule gut wiedergeben.

Die beiden Ozonverlustperioden in Januar/Februar und im März haben auf den Verlust in der Ozongesamtsäule sehr ähnliche Auswirkungen gehabt. Während beider Perioden wurden Verlusten von knapp 3 DU pro Tag erreicht.

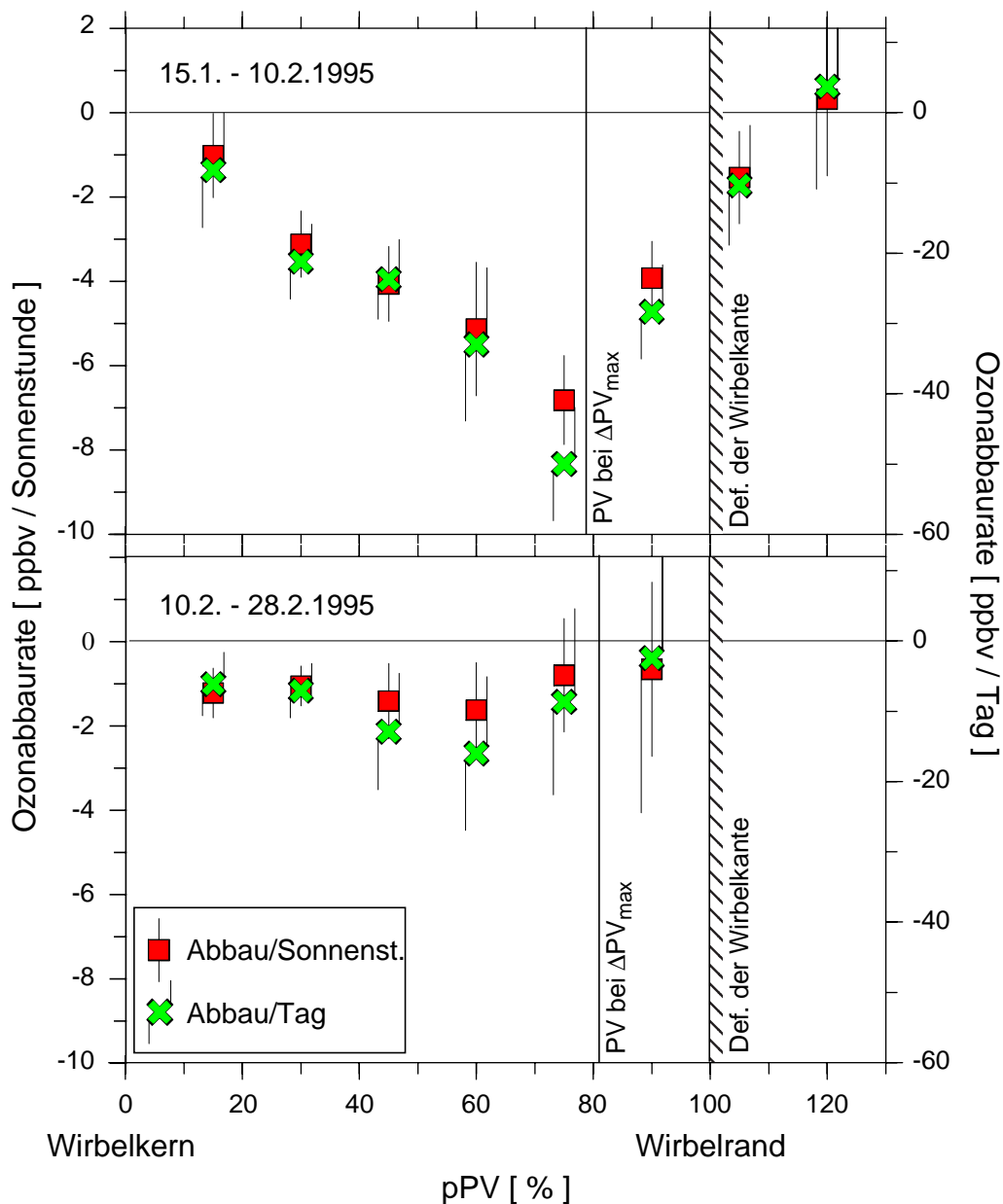


Abbildung 7.13: Wie Abbildung 7.5, aber für zwei Zeiträume im Winter 1994/95. Hier ist auch der pPV Bereich 100-130% mit dargestellt, welcher die direkte Umgebung des Wirbels darstellt. Zusätzlich ist der Bereich des größten horizontalen PV Gradientens (ΔPV_{max}) eingezeichnet.

7.4.4 PV-Profil der Ozonabbaurate

Abbildung 7.13 zeigt, wie die Ozonabbaurate während zweier Zeiträume vom Wirbelkern zum Wirbelrand hin variiert. Dargestellt sind L_s und L_t , wobei letzteres aus dem in Abschnitt 7.2 genannten Grund für diese Abbildung aus Regressionen Ozondifferenz gegen Flugzeit berechnet wurde. Während des ersten Zeitraums, der die Hauptphase des Ozonverlusts umfaßt, wurden im Wirbelrandbereich deutlich größere Abbauraten beobachtet als im Wirbelkern. Dabei unterscheidet sich die Form der beiden Kurven L_s (PV) und L_t (PV) in diesem Jahr kaum. Dies ist konsistent mit den in dieser Phase nur geringen Unterschieden der mittleren täglichen Sonnenzeiten zwischen Wirbelrand und Wirbelkern. Diese ungewöhnliche Situation ist durch die stark vom Pol verschobene Lage des Wirbels in dieser Periode begründet (siehe Abschnitt 6.6.2 und Abbildung 6.10). Im zweiten Zeitraum ist der Ozonabbau im gesamten Wirbel deutlich zurückgegangen. Die verbleibenden kleinen Abbauraten L_s zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Teilen des Wirbels. L_t hingegen scheint nach wie vor im Wirbelrandbereich (um 60% pPV) etwas größer zu sein als im Wirbelkern. Die Werte über 70% pPV lassen aufgrund der Länge ihrer Fehlerbalken keine Interpretation mehr zu.

In Abbildung 7.13a ist der Ring, der den Wirbel von außen umschließt, mit aufgenommen worden. Die Abbildung zeigt, das im Mittel über den angegebenen Zeitraum kein signifikanter Ozonabbau direkt außerhalb des Wirbels nachgewiesen werden konnte.

7.4.5 Über den Winter akkumulierter Ozonverlust

Auch für diesen Winter wurde der über den Winter akkumulierte chemische Ozonverlust berechnet. Da für dieses Jahr ein vollständiger Höhen-/Zeitschnitt der Ozonverlustrate berechnet werden konnte, sind dafür keine weiteren Annahmen nötig. Die akkumulierten Verluste wurden für acht mit den jeweiligen Luftmassen absinkende Flächen im Zeitraum 1. Januar - 31. März 1995 berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.9b enthalten. Man erkennt ein deutliches Maximum des akkumulierten Verlusts in der Luftschicht, die von 510 K Anfang Januar auf 450 K Ende März absinkt. In dieser Luftschicht berechnet sich der akkumulierte Ozonabbau zu 2.4 ± 0.5 ppmv, wobei allerdings 0,4 ppmv dieses Abbaus durch die hohen Werte von L_t um 450 K in den letzten zehn Märztagen hervorgerufen werden. Gerade in diesem Bereich tritt aber auch ein sehr großer statistischer Fehler auf (vgl. Abbildung 7.12), so daß diese letzten Raten nicht signifikant sind. Die Ergebnisse der Regressionen in diesem Bereich sind auch konsistent mit der Annahme, daß L_t hier wie in den benachbarten Niveaus bis zum 20. März auf Null zurückgegangen ist. Dies liegt bei Berücksichtigung von A_{NAT} nahe. Da der tatsächliche zeitliche Verlauf von L_t nach dem 20. März aus den Daten nicht geklärt werden kann, ist der oben angegebene akkumulierte Abbau nicht gesichert, was sich auch in seinem relativ großen Fehlerbalken widerspiegelt. Statt dieses Werts soll hier der akkumulierte Abbau zwischen Anfang Januar und dem 20. März betrachtet werden. Dieser betrug $2,0 \pm 0,3$ ppmv. Der Verzicht auf die letzten zehn Tage ermöglicht einen deutlich reduzierten Fehlerbalken. Unter der Annahme, das L_t sich in 450 K wie in den Nachbarniveaus verhalten hat, gibt dieser Wert auch den akkumulierten Abbau bis Ende März an. Er ist zusätzlich in Abbildung 7.9b als graue Markierung eingetragen. Dieser Abbau entspricht etwa 59 % des mittleren Ozonmischungsverhältnisses, welches Anfang Januar in der Luftschicht herrschte. Abbildung 7.14 zeigt den zeitlichen Verlauf des akkumulierten Ozonverlusts in dieser Luftschicht.

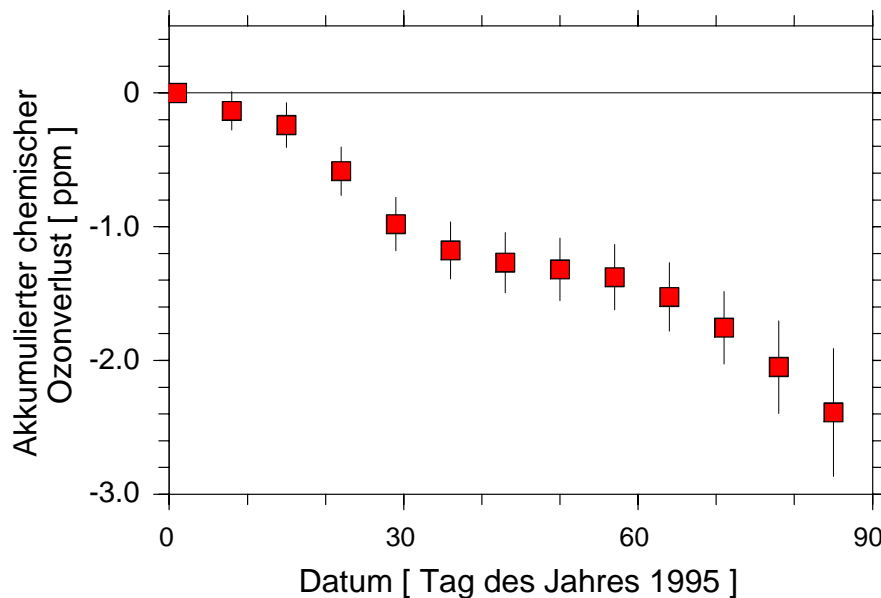


Abbildung 7.14: Wie Abbildung 7.6 für die Luftschicht, die von 507 K am 1. Januar bis 450 K am 31. März 1995 absinkt.

Der chemische Verlust in der Ozongesamtsäule akkumuliert über den Winter zu 127 ± 14 DU. Die mittleren Ozonsäulendichten im Polarwirbel betragen Anfang Januar 1995 etwa 350 DU. (Abbildung 3.8 und [Goutail et al., 1997]). Bezogen auf diesen Wert entspricht der angegebene Verlust 36 ± 4 %.

7.5 Der Winter 1995/96

Im Winter 1995/96 wurden durch die geringere Anzahl an verwendeten Sonden deutlich weniger Matche als 1994/95 erzielt. Aus diesem Grund muß die Auswertung auf einen kleineren Höhenbereich beschränkt bleiben und die zeitliche Mittelung auf ± 10 Tage vergrößert werden, um statistisch signifikante Ergebnisse zu erhalten.

7.5.1 Höhen/Zeitschnitt der Ozonabbaurate

Abbildung 7.15 zeigt den Ozonabbau im Bereich zwischen 410 K und 530 K. Diese Abbildung ist analog zu Abbildung 7.9 erzeugt, nur daß, wie erwähnt, die zeitliche Auflösung etwas schlechter gewählt wurde. Zusätzlich zu A_{NAT} (dünne Konturlinien) sind in der Abbildung auch die Bereiche mit möglicher PSC II Existenz A_{EIS} (dicke Konturlinien) eingetragen. Die statistischen Fehler zu Abbildung 7.15 sind in Abbildung 7.16 enthalten. Abbildung 7.17 zeigt die Ozonverlustrate in Ozonkonzentration pro Tag (analog zu Abbildung 7.11) und Abbildung 7.18 die dazu gehörigen statistischen Fehler.

Generell läßt sich auch 1995/96 wieder das bereits aus den hier untersuchten Vorwintern bekannte Verhalten der Ozonverlustrate erkennen. In Übereinstimmung mit den ausgedehnten Bereichen mit PSC I Bedingungen findet man im Januar wieder schnelle Ozonabbauraten. Die Werte sind vergleichbar den jeweils im Januar in den untersuchten Vorjahren aufgetretenen Abbauraten. Der Ozonabbau dauert auch in diesem Jahr bis zum Ende der PSC Periode an und geht in den meisten Höhenbereichen danach sehr schnell auf insignifikante Werte zurück.

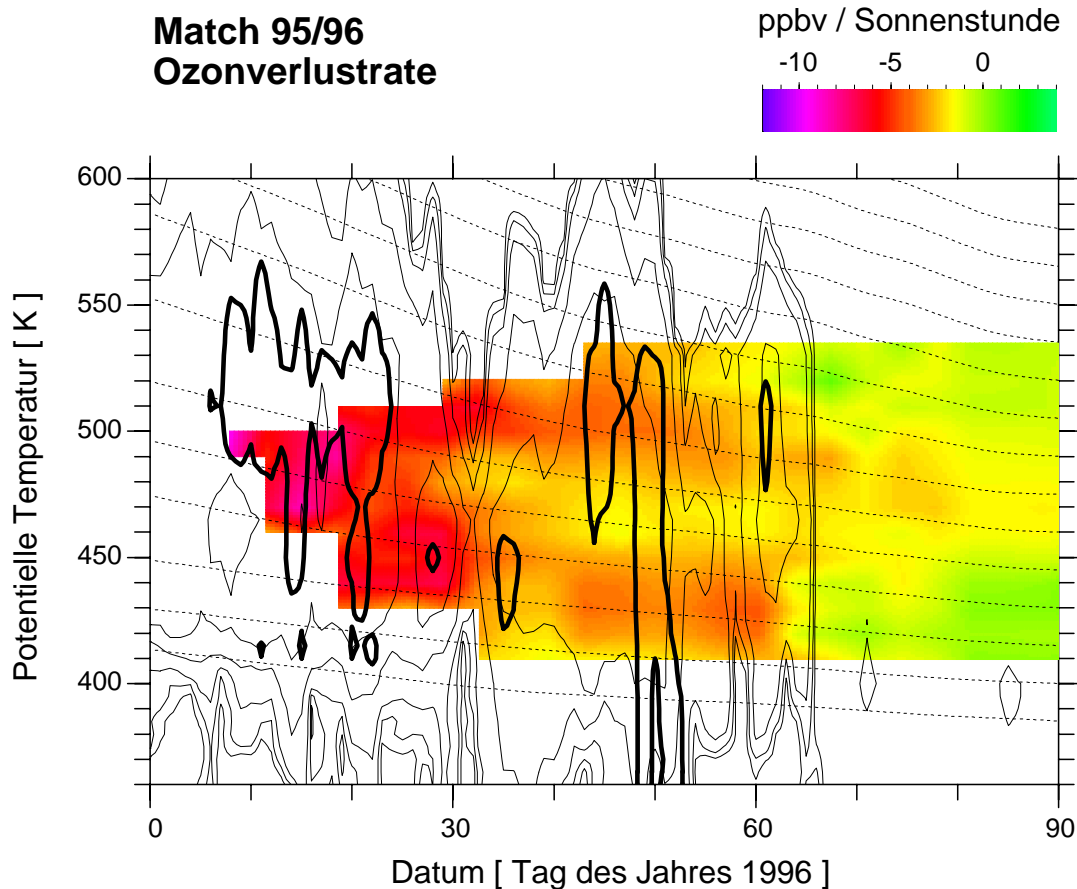


Abbildung 7.15: Wie Abbildung 7.9a für Januar bis März 1996. Zusätzlich gibt die dickere schwarze Konturlinie die $0,3 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ Isolinie von A_{EIS} an.

Zusätzlich zu diesem bereits aus den Vorjahren bekannten generellen Verhalten findet man jedoch in diesem extrem kalten Winter drei zunächst überraschende weitere Effekte:

1. In einem schmalen vertikalen Bereich um 470 K hält der Ozonabbau nach dem Ende der PSC-Periode in den ersten Märztagen bis in den April hinein an. Dabei geht L_s im März nur noch leicht zurück, während L_t sogar bis zum Ende der Kampagne am 15. April auf konstantem Niveau andauert. Dieser Effekt ist besonders deutlich in der Luftschicht, die von 545 K Anfang Januar auf 470 K Ende März absinkt. Die Ozonverlustraten L_s und L_t für diese Luftschicht sind in Abbildung 7.19 dargestellt.
2. Im gesamten Höhenbereich nimmt die Ozonabbaurate L_s bereits im Februar ab, obwohl A_{NAT} sich bis Ende Februar kaum ändert. Um diesen Effekt zu verdeutlichen, ist in Abbildung 7.20 L_s auf einer Fläche dargestellt, die mit einer Luftschicht von 490 K Anfang Januar auf 440 K Ende März absinkt.
3. In einem schmalen Band um etwa 465 K ist die Abnahme von L_s im Februar schneller als in den darüber und darunter liegenden Niveaus. Die schnellere Abnahme von L_s erfolgt demnach in der Luftmasse direkt unterhalb der Luftschicht in welcher im März verlängerter Ozonabbau beobachtet wird.

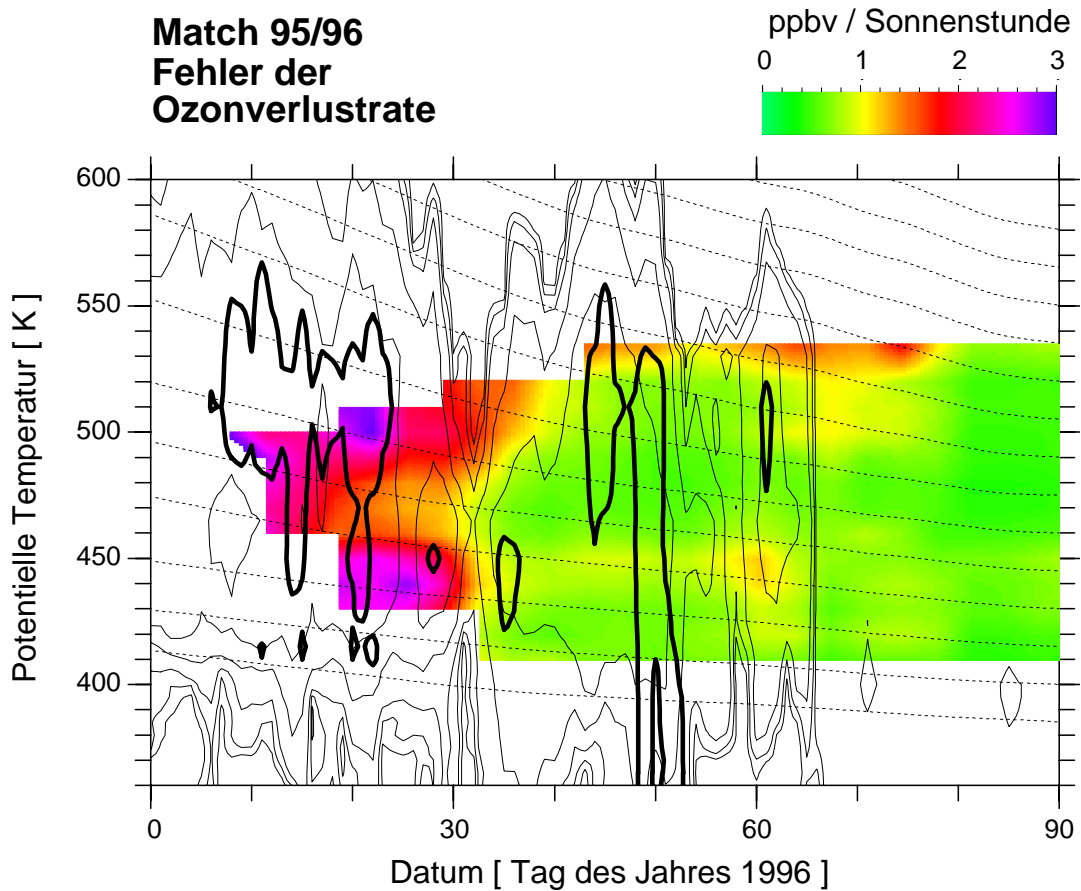


Abbildung 7.16: Zu Abbildung 7.15a gehörender statistischer Fehler der Ozonverlustrate L_s .

7.5.2 PV-Profil der Ozonabbaurate

Abbildung 7.21 zeigt die Ozonverlustraten L_s und L_t (in dieser Abbildung wieder als Regression der Ozondifferenzen über die Flugzeiten berechnet) in den verschiedenen Bereichen des Polarwirbels während der Phase maximaler Raten und während der Erholungsphase danach. Um beide Graphen besser vergleichen zu können, ist das L_s der früheren Phase im unteren Bild nochmal durch nicht ausgefüllte Markierungen wiederholt. Man erkennt so sehr deutlich, wie während der Erholungsphase L_s vom Wirbelrand her abnimmt.

7.5.3 Über den Winter akkumulierter Ozonverlust

Abbildung 7.22 zeigt den akkumulierten Ozonverlust in der von 545 K auf 440 K absinkenden Fläche sowie die zeitliche Entwicklung des mittleren Ozonmischungsverhältnisses auf der gleichen Fläche. Dies ist die Luftschicht in welcher der verlängerte Ozonabbau (oberer Punkt 2.) gefunden wurde. Der vom 20. Januar bis zum 10. April akkumulierte Verlust beträgt in dieser Luftschicht $2,4 \pm 0,3$ ppmv, was etwa 75 % des Ozonmischungsverhältnisses vom 20. Januar entspricht. Hier muß eine Anmerkung zur Verwendung von Prozentzahlen für akkumulierten Ozonverlust gemacht werden. Da in dem betrachteten Zeitraum Ozon in den Wirbel eingemischt wird, ist es nicht ganz klar, worauf die prozentuale Angabe bezogen werden sollte. Wird

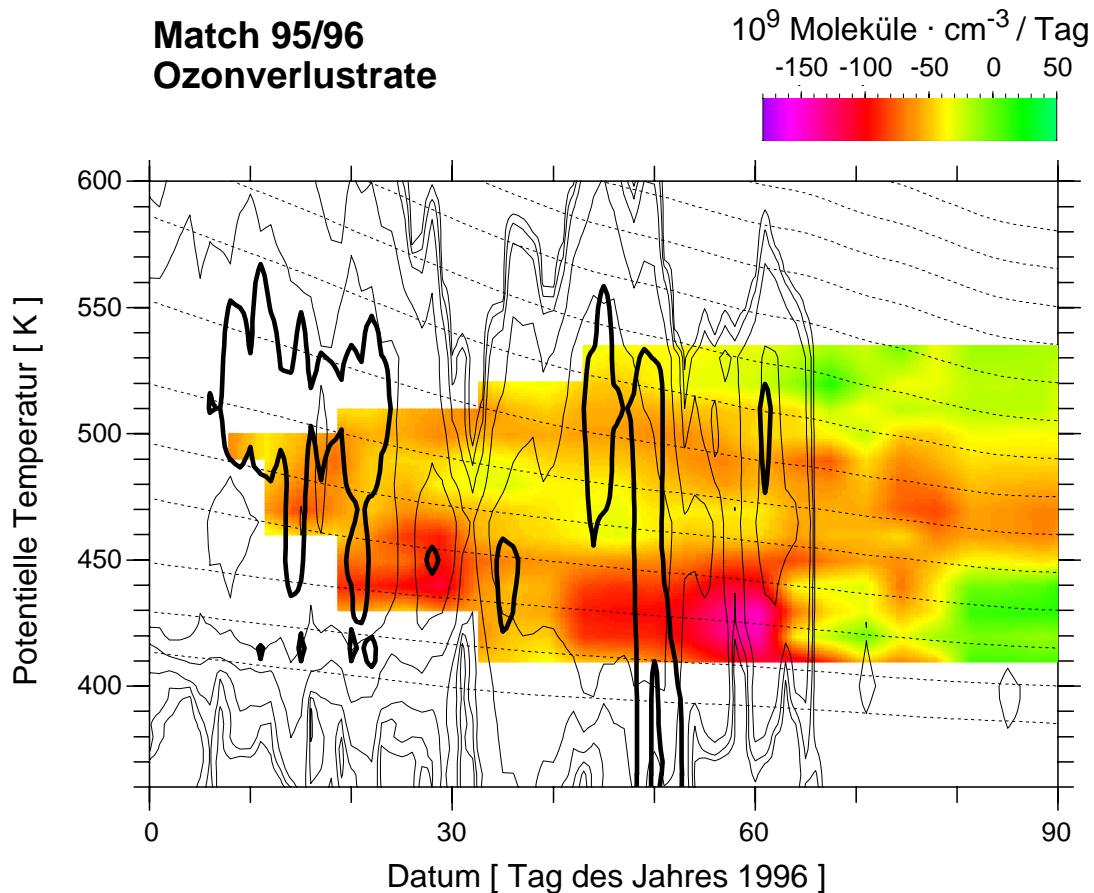


Abbildung 7.17: Wie Abbildung 7.15 aber für L_t , angegeben in chemisch bedingter Ozonkonzentrationsabnahme pro Tag.

sie bezogen auf das Ozonmischungsverhältnis, welches sich zu Beginn des Zeitraums in der Luftschicht befand, können theoretisch prozentuale Verluste von über 100 % vorkommen. Statt dieser zunächst naheliegenden Bezugsgröße ist es sinnvoller, die prozentualen Verluste auf die Summe des anfangs vorhandenen Ozons zuzüglich der während des Zeitraums eingeströmten Menge zu beziehen. Bei oberflächiger Betrachtung gibt das Ergebnis dann den Ozonverlust in Prozent der Ozonmenge an, die am Ende des Zeitraums vorliegen würde, wenn kein Ozonverlust stattgefunden hätte. Bei genauerem Hinschauen stimmt dies jedoch nicht, da die diffusive Einmischung von Ozon in den Wirbel erst durch das vom Ozonverlust hervorgerufene Ozonminimum im Wirbel verursacht wird. Die Menge des eingemischten Ozons läßt sich aus der am 10. April vorliegenden Differenz der beiden Kurven in Abbildung 7.22 grob abschätzen. Der auf die Summe des eingemischten und anfangs vorhandenen Ozons bezogene prozentuale Abbau beträgt im gleichen Zeitraum etwa 64 %. Bei der Bewertung dieses Ergebnisses sollte man sich bewußt sein, daß der angegebene Wert nur für den Bereich mit verlängertem Ozonabbau gilt, welcher nach Abbildung 7.17 nur eine geringe vertikale Ausdehnung hat.

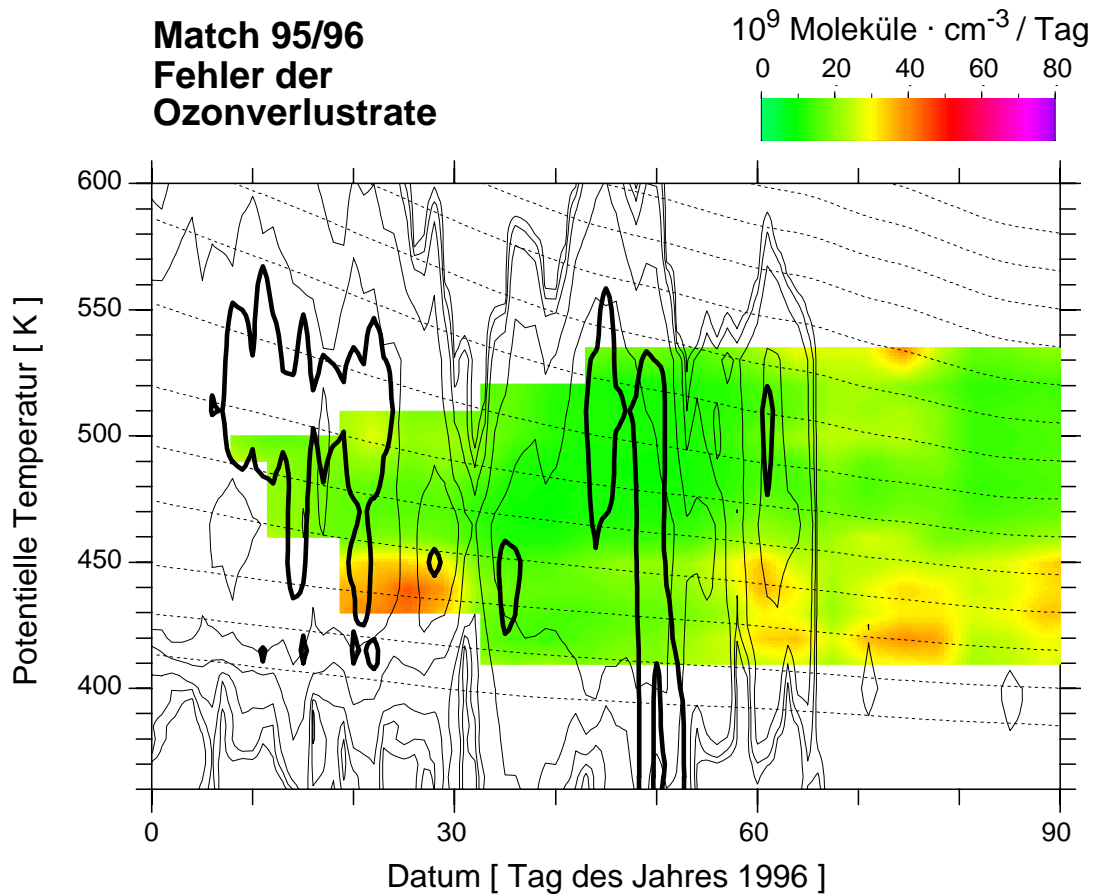


Abbildung 7.18: Zu Abbildung 7.17 gehörender statistischer Fehler der Ozonabbaurate L_t .

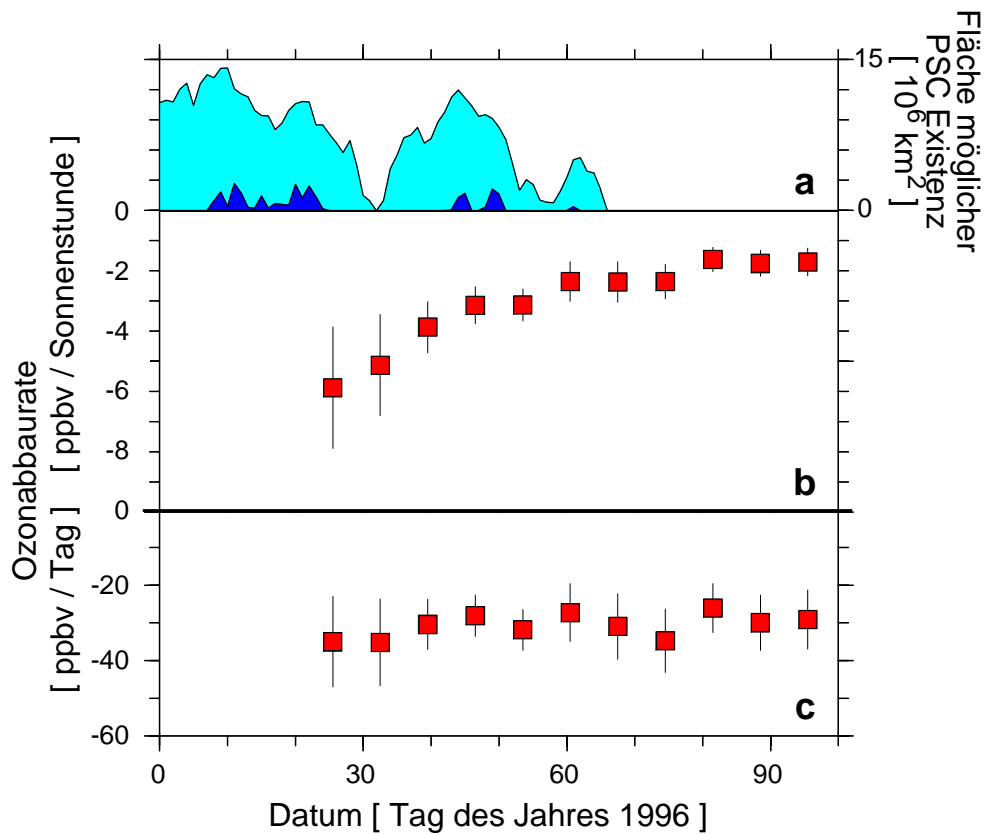


Abbildung 7.19: Die zeitliche Variation der Ozonabbauraten L_s (Teilbild b) und L_t (Teilbild c) in der Luftschicht, die von 535 K am 1. Januar auf 470 K am 31. März 1996 absinkt. In (a) ist A_{NAT} (hellgrau) und A_{EIS} (dunkelgrau) für diese Luftmasse angegeben.

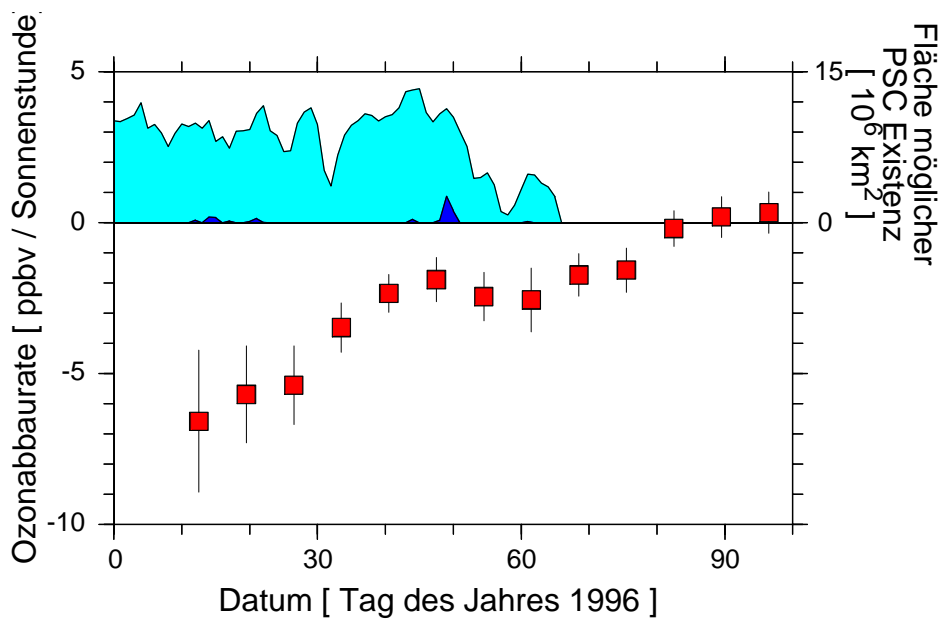


Abbildung 7.20: Die zeitliche Variation der Ozonabbaurate L_s in der Luftschicht, die von 485 K am 1. Januar auf 440 K am 31. März 1996 absinkt. Sonst wie Abbildung 7.19.

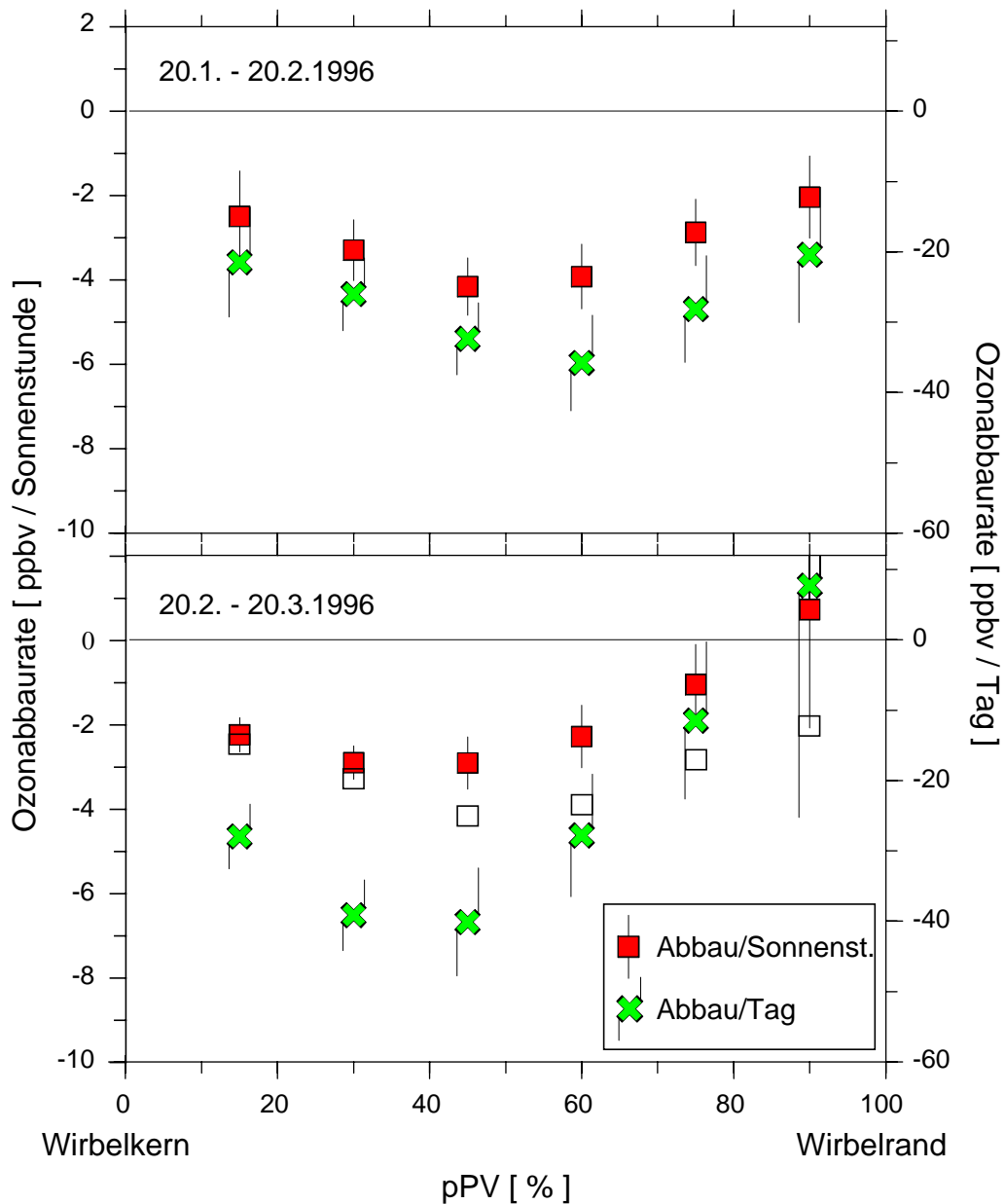


Abbildung 7.21: Wie Abbildung 7.5, aber für zwei Zeiträume im Winter 1995/96. (a) 20. Januar bis 20. Februar während der Hauptphase des Ozonverlusts, (b) 20. Februar bis 20. März während der Erholungsphase. Die Daten von L_s aus (a) sind in (b) zur besseren Vergleichbarkeit als nicht ausgefüllte Markierungen wiederholt.

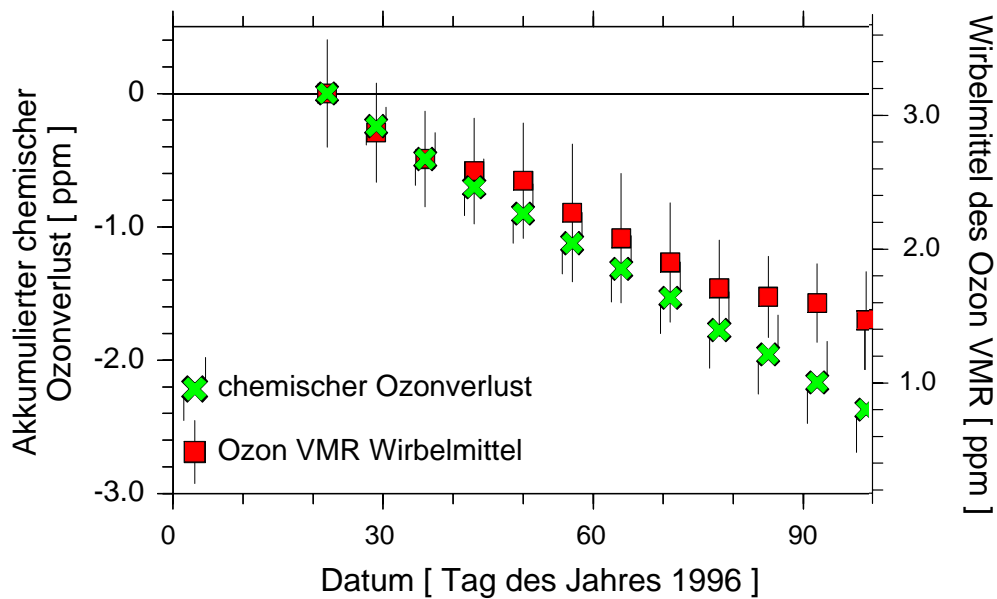


Abbildung 7.22: Wie Abbildung 7.6 für die Luftschicht, die von 535 K am 1. Januar bis 470 K am 31. März 1996 absinkt. Zusätzlich ist auch das über den Wirbel gemittelte Ozonmischungsverhältnis in der gleichen absinkenden Luftschicht eingetragen. Dieses mittlere Ozonmischungsverhältnis wurde aus allen Ozonsondenmessungen bestimmt, die im Polarwirbel stattgefunden haben. Die Fehlerbalken geben die Streuung der Meßwerte als einfache Standardabweichung an. Die Skalen beider Kurven sind um das mittlere Ozonmischungsverhältnis gegeneinander verschoben, welches Anfang Januar in der Luftschicht geherrscht hat. Von dieser Verschiebung der Skalen abgesehen sollten bei Abwesenheit von Mischungsprozessen beide Kurven identisch sein. Aus der Differenz der Kurven läßt sich die Menge des während des Winters eingemischten Ozons grob abschätzen.

7.6 Tagesgang der Ozonabbaurate

Im ersten Teil dieses Abschnitts soll qualitativ untersucht werden, ob während der dunklen Phasen entlang der Trajektorien meßbarer Ozonabbau stattgefunden hat. Eine Untersuchung, welche quantitativen Rückschlüsse die Match-Daten auf den Tagesgang der Ozonabbaurate erlauben, folgt im zweiten Teil dieses Abschnitts.

Für die Untersuchung des Ozonverlusts in der Dunkelheit wird ausgenutzt, daß das Verhältnis t_s zu t (oder auch t_s zu t_d wobei $t_d = t - t_s$ die dunkle Zeit entlang der Trajektorie bezeichnet) der verschiedenen Trajektorien beträchtlich streut. Abbildung 7.23 zeigt t_s über t_d für die bereits in Abbildung 7.1 benutzte Untergruppe von Matches aus 1995. Die statistische Streuung des Verhältnisses t_s/t_d läßt folgendes Gleichungssystem linear unabhängig werden:

$$[\Delta\text{XO}_3]_v = [t_s]_v \cdot L_s + [t_d]_v \cdot L_d \quad (14)$$

wobei der Index v die Trajektorie (bzw. den Match oder das Luftvolumen) indiziert und L_d die Ozonabbaurate im Dunklen bezeichnet. Die Fehlerterme e_v werden hier der Übersichtlichkeit halber weggelassen, womit das Gleichheitszeichen streng genommen nur für die Erwartungswerte der jeweiligen Größen stimmt. Das Gleichungssystem ist überbestimmt sobald mehr als zwei Matche vorliegen; die least square Lösungen für die beiden Raten L_s und L_d ergeben sich aus einer bivariaten linearen Regressionsanalyse. Da t_s und t_d jedoch trotz der Streuung miteinander korreliert sind, ist die Matrix $[t_s, t_d]_v$ schlecht konditioniert, wenn nur wenige Matche zur Verfügung stehen. Ein befriedigender Fehler im Ergebnis wird nur bei einer großen Anzahl von Matchen erreicht. Die bivariate Regression ergibt für die in Abbildung 7.23 dargestellten Matche folgende Werte:

$$L_s = -7.1 \pm 2.6 \text{ ppbv/h}$$

$$L_d = 0.7 \pm 1.0 \text{ ppbv/h}$$

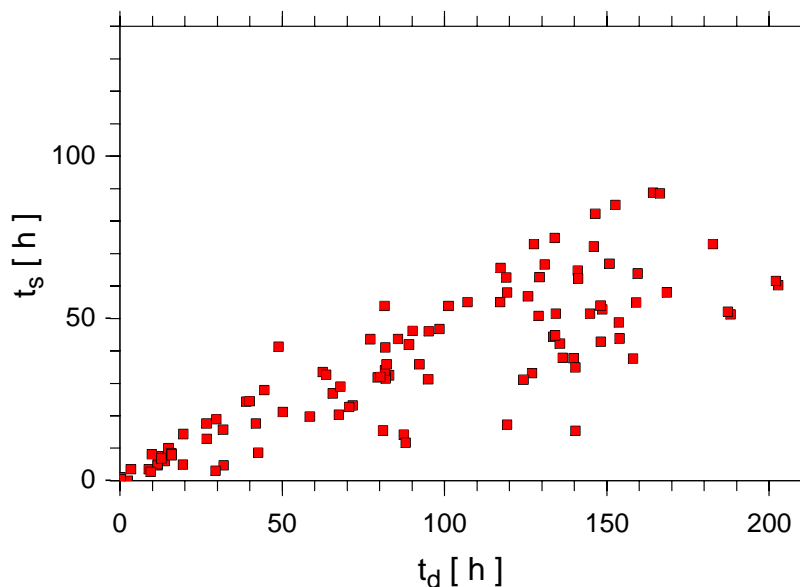


Abbildung 7.23: t_s über t_d für alle Matche in 470-500 K im Zeitraum 15. Januar bis 10. Februar 1995.

Anschaulich kann man sich die Ozondifferenzen der einzelnen Matche auf einer Achse aufgetragen vorstellen, die senkrecht zu der in Abbildung 7.23 dargestellten Ebene steht. Durch diese Ozondifferenzen wurde von der bivariaten Regression eine Ebene angepaßt, wobei L_s und L_d die Neigungen dieser Ebene in die beiden Koordinatenrichtungen t_s und t_d angeben. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, daß diese Ebene nur in t_s Richtung geneigt ist, also Ozonabbau im Rahmen der Fehlerbalken nur während sonnenbeschienener Zeiten stattfindet. Eine quantitative Interpretation der Rate L_s ist nicht besonders sinnvoll, da sie stark von der Definition der Sonnenzeiten abhängt. Wird z. B. statt der hier verwendeten Definition (Sonne sichtbar vom Ort des Luftpakets) 90° szw als Grenze zwischen dunklen Zeiten (dann als t_{d90° bezeichnet) und sonnenbeschienenen Zeiten (t_{s90°) verwendet, ergeben sich folgende Ergebnisse der bivariaten Regression:

$$\begin{aligned} L_{s90^\circ} &= -11.1 \pm 2.9 \text{ ppbv/h} \\ L_{d90^\circ} &= 1.7 \pm 2.4 \text{ ppbv/h} \end{aligned}$$

Auch während t_{d90° tritt kein signifikanter Ozonabbau auf, was ein Hinweis darauf ist, daß auch im szw-Bereich 90° bis zum geometrischen Sonnenuntergang kein wesentlicher Ozonabbau mehr stattfindet. Die Rate L_{s90° ist aber wesentlich größer als L_s , was einfach daran liegt, daß t_{s90° deutlich kürzer als t_s ist. Aufgrund dieser ausgeprägten Abhängigkeit der Rate L_s von der Definition der Sonnenzeiten, muß bei einer Angabe von L_s genau vermerkt werden, auf welcher Definition sie beruht. In der vorliegenden Arbeit wird L_s in der Diskussion nur qualitativ, zur Interpretation zeitlicher Veränderungen oder als Vergleich verschiedener Jahre untereinander, verwendet.

Die Abwesenheit von Ozonabbau im Dunkeln scheint ein allgemeingültiges Merkmal zu sein, welches sich jedenfalls in allen hier untersuchten Perioden gefunden hat. Hier werden noch die Ergebnisse weiterer bivariater Regressionen über Matche aus den Perioden mit dem jeweiligen maximalen Ozonverlusten der beiden anderen Winter angegeben:

1.1. - 9.2.1992, 465 - 485K:

$$\begin{aligned} L_s &= -7.0 \pm 1.5 \text{ ppbv/h} \\ L_d &= 0.4 \pm 0.4 \text{ ppbv/h} \end{aligned}$$

25.1. - 20.2.1996, 465 - 485K:

$$\begin{aligned} L_s &= -5.2 \pm 2.2 \text{ ppbv/h} \\ L_d &= 1.0 \pm 1.2 \text{ ppbv/h} \end{aligned}$$

Im zweiten Teil dieses Abschnitts soll untersucht werden, unter welchen Voraussetzungen die Abhängigkeit der Ozonverluste vom Sonnenzenitwinkel quantitativ aus den Daten ermittelt werden kann. Die möglichen Ergebnisse beruhen dabei auf den least square Lösungen von überbestimmten Gleichungssystemen, die sich in allgemeiner Form folgendermaßen schreiben lassen:

$$[\Delta\text{XO}_3]_v = \sum_{n=1}^N t_{n,v} \cdot L_n \quad (15)$$

wobei der Index n verschiedene Intervalle des Sonnenzenitwinkels indiziert und N angibt, wieviele Intervalle unterschieden werden. Alle Intervalle $n=1, \dots, N$ zusammen überdecken den gesamten Bereich von 0° - 180° , die Intervalleinteilung kann später so vorgenommen werden, daß

die statistische Signifikanz befriedigend wird. $t_{n,v}$ bezeichnet die gesamte Zeit, die das Volumen v im Sonnenzenitwinkelintervall n verbracht hat, es läßt sich aus den Trajektorien Daten berechnen. Dazu wurde analog zur Berechnung von t_s vorgegangen. Prinzipiell ist für das System (15) eine least square Lösung für L_n definiert, sobald $V > N$ gilt, wenn V die Zahl der verwendeten Matche bezeichnet. Die Lösung für L_n läßt sich dann mittels multivariater linearer Regressionsanalyse berechnen. Wegen der schlechten Kondition von $t_{n,v}$ ist das allerdings in der Praxis nur für $V \gg N$, also kleine N möglich. Welche physikalische Bedeutung die bei der Regressionsanalyse erhaltenen L_n haben, muß sorgfältig geklärt werden, bevor sie quantitativ interpretiert werden können. Die folgende Betrachtung zeigt, daß diese L_n nicht etwa den mittleren Ozonabbau in dem szw Intervall n angeben.

Hier wird zunächst der Ozonabbau entlang einer Trajektorie geschrieben als:

$$\Delta XO_3 = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \quad (16)$$

τ bezeichnet die Zeit entlang der Trajektorie, $\lambda(\tau)$ die jeweils aktuelle Ozonabbaurate. Das Integral wird nun derart in I einzelne Abschnitte aufgeteilt, daß auf jedem Abschnitt die Funktion $\tau_i(\text{szw})$ existiert (d.h. die anschaulichere Funktion $\text{szw}_i(\tau)$ sei eineindeutig auf jedem Abschnitt). Es läßt sich dann schreiben:

$$\Delta XO_3 = \sum_{i=1}^I \int_{ta_i}^{te_i} \lambda(\tau_i) d\tau_i \quad (17)$$

mit $ta_1 = 0$, $te_I = t$, $ta_{i+1} = te_i$ für i aus $(1, \dots, I-1)$. Dabei ist die Funktion $\tau_i(\text{szw})$ im allgemeinen für verschiedene i unterschiedlich. Nun kann in jedem Abschnitt τ durch szw substituiert werden:

$$\Delta XO_3 = \sum_{i=1}^I \int_{\text{szw}_{1_i}}^{\text{szw}_{2_i}} \lambda_i(\text{szw}) \left| \frac{d\tau_i}{d\text{szw}} \right| d\text{szw} \quad (18)$$

mit $\text{szw}_{1_i} = \min\{\text{szw}(ta_i), \text{szw}(te_i)\}$, $\text{szw}_{2_i} = \max\{\text{szw}(ta_i), \text{szw}(te_i)\}$, d.h., wenn $\frac{d\tau_i}{d\text{szw}} < 0$, werden die Integrationsgrenzen vertauscht. Daher steht $\frac{d\tau_i}{d\text{szw}}$ im Integral als Betrag. $\frac{d\tau_i}{d\text{szw}}$ ist zunächst nur auf $[\text{szw}_{1_i}, \text{szw}_{2_i}]$ definiert. Hier wird die Funktion $\rho_i(\text{szw})$ auf $[0^\circ, 180^\circ]$ eingeführt:

$$\begin{aligned} \rho_i &\equiv 0, & \text{szw} \in [0^\circ, \text{szw}_{1_i}) \\ \rho_i &= \left| \frac{d\tau_i}{d\text{szw}} \right|, & \text{szw} \in [\text{szw}_{1_i}, \text{szw}_{2_i}] \\ \rho_i &\equiv 0, & \text{szw} \in (\text{szw}_{2_i}, 180^\circ] \end{aligned}$$

$\rho_i(\text{szw})$ gibt an, wie lange sich der i -te Trajektorienabschnitt bei den verschiedenen szw aufgehalten hat. Weiterhin wird noch die später benötigte Funktion $\rho^*(\text{szw})$ auf $[0^\circ, 180^\circ]$ definiert,

$$\rho^*(szw) = \sum_{i=1}^I \rho_i(szw) \quad (19)$$

welche angibt, wie lange sich die Trajektorie insgesamt bei den verschiedenen szw aufgehalten hat.

Mit $\rho_i(szw)$ läßt sich (18) schreiben als:

$$\Delta XO_3 = \sum_{i=1}^I \int_{0^\circ}^{180^\circ} \lambda_i(szw) \cdot \rho_i(szw) dszw \quad (20)$$

Vertauschung von Summation und Integralbildung und Aufspaltung des Integrals in verschiedene szw Intervalle ergibt:

$$\Delta XO_3 = \sum_{n=1}^N \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \sum_{i=1}^I \lambda_i(szw) \cdot \rho_i(szw) dszw \quad (21)$$

mit $\text{minszw}_1 = 0^\circ$, $\text{maxszw}_N = 180^\circ$, $\text{minszw}_{n+1} = \text{maxszw}_n$ für n aus (1,..., N-1).

Es wird nun für jedes szw Intervall die Größe λ_n^* definiert:

$$\lambda_n^* = \frac{1}{t_n} \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \sum_{i=1}^I \lambda_i(szw) \cdot \rho_i(szw) dszw \quad (22)$$

Die λ_n^* sind nur für die n definiert, für die t_n ungleich Null ist. Sie sind ein in bestimmter Weise gewichtetes Integralmittel der Ozonabbauraten $\lambda_i(szw)$ über das szw Intervall n. Die genaue physikalische Bedeutung von λ_n^* wird später noch diskutiert. Zunächst ergibt sich formal mit (22) aus (21):

$$\Delta XO_3 = \sum_{n=1}^N t_n \cdot \lambda_n^* \quad (23)$$

Dies gilt für alle Trajektorien, wobei allerdings sowohl λ_n^* als auch t_n für alle Trajektorien unterschiedlich sind:

$$[\Delta XO_3]_v = \sum_{n=1}^N t_{n,v} \cdot \lambda_{n,v}^* \quad (24)$$

Da hier auch die $\lambda_{n,v}^*$ von v abhängen, ist noch nicht die Form von (15) erreicht. Eine Regressionsanalyse von (15) liefert in dieser Situation die L_n als Linearkombinationen der V verschiedenen $\lambda_{n,v}^*$, wobei alle $\lambda_{n,v}^*$ mit Wichtungsfaktoren eingehen, welche nichtlineare Funktionen aller $t_{1,v}, \dots, t_{N,v}$ ($v=1, \dots, V$) sind [Lehmann, 1997]. Diese Linearkombinationen sind nicht interpretierbar. Als weiterer Schritt wird nach zusätzlichen Annahmen gesucht, unter

denen sich die Ausdrücke für die L_n zu interpretierbaren Zusammenhängen vereinfachen. Zunächst wird die v -Abhängigkeit von $\lambda_{n,v}^*$ separiert:

$$\lambda_{n,v}^* = L_n + \Delta\lambda_{n,v}^* \quad (25)$$

wobei L_n als Mittelwert von $\lambda_{n,v}^*$ über alle Trajektorien gewählt wird, für die $t_{n,v}$ nicht Null ist. V_n bezeichnet die Anzahl dieser Trajektorien:

$$L_n = \frac{1}{V_n} \sum_{v=1}^{V_n} \lambda_{n,v}^* \quad (26)$$

Damit verschwindet der Mittelwert von $\Delta\lambda_{n,v}^*$:

$$\sum_{v=1}^{V_n} \Delta\lambda_{n,v}^* = 0 \quad (27)$$

Aus (24) folgt:

$$[\Delta XO_3]_v = \sum_{n=1}^N t_{n,v} \cdot (L_n + \Delta\lambda_{n,v}^*) \quad (28)$$

Wird die Annahme gemacht, daß $\Delta\lambda_{n,v}^*$ und $t_{n,v}$ für verschiedene v unkorreliert seien (Annahme I), gilt unter Berücksichtigung von (27), daß der Erwartungswert von

$$\sum_v t_{n,v} \cdot \Delta\lambda_{n,v}^* \quad (29)$$

verschwindet. Dieser Summand in (28) verhält sich also wie ein Fehlerterm und beeinflusst das Ergebnis der linearen Regression nicht. Mit Annahme I stellen sich also die bei der Regression erhaltenen L_n als arithmetische Mittel der $\lambda_{n,v}^*$ über alle Trajektorien für die $t_{n,v}$ nicht Null ist dar.

Die Gültigkeit der Annahme wird weiter unten diskutiert. Die Mittelwerte der $\lambda_{n,v}^*$ lassen sich unter Verwendung von (22) schreiben als:

$$L_n = \frac{1}{V_n} \cdot \sum_{v=1}^{V_n} \left(\frac{1}{t_{n,v}} \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \sum_{i=1}^I \lambda_{i,v}(\text{szw}) \cdot \rho_{i,v}(\text{szw}) \, \text{dszw} \right) \quad (30)$$

In dieser Form lassen sich die L_n weiterhin nur schwer physikalisch interpretieren. Daher werden hier zusätzliche Annahmen gemacht, um (30) zu vereinfachen. Zunächst werden die $\lambda_{i,v}(\text{szw})$ für jedes Luftvolumen geschrieben als:

$$\lambda_{i,v}(\text{szw}) = \bar{\lambda}_v(\text{szw}) + \delta_{i,v}(\text{szw}) \quad (31)$$

wobei $\bar{\lambda}_v(\text{szw})$ der über alle i gemittelte Wert von $\lambda_{i,v}(\text{szw})$ ist:

$$\bar{\lambda}_v(\text{szw}) = \frac{1}{I_v} \cdot \sum_{i=1}^{I_v} \lambda_{i,v}(\text{szw}) \quad (32)$$

$\bar{\lambda}_v(\text{szw})$ ist das Mittel über alle bei einem bestimmten szw in den verschiedenen Trajektorienabschnitten der Trajektorie v aufgetretene $\lambda_{i,v}$. $\bar{\lambda}_v(\text{szw})$ kann für diese Trajektorie als universeller Anteil der Abhängigkeit der Ozonabbaurate vom szw angesehen werden und stellt somit die in diesem Abschnitt gesuchte Größe dar, während die δ_i die lokalen Abweichungen von dieser Funktion beschreiben. Betrachtet man nur den Zyklus Z5 würden diese Abweichungen bei konstantem ClO_x im wesentlichen durch chemisches Ungleichgewicht verursacht sein. Für hohe Sonnenstände ist die Aufteilung der Spezies im ClO_x zwar gut im Gleichgewicht, bei tiefen Sonnenständen gilt dies nicht mehr. Cl_2O_2 hat bei einem szw von 87° eine Lebensdauer von ca. 0,5 h [Lehmann, 1997]. Es braucht also bei Sonnenaufgang eine merkliche Zeit, bis die hohen Cl_2O_2 -Konzentrationen, die sich über Nacht gebildet haben, abgebaut sind. In dieser Zeit ist die Ozonabbaurate etwas größer als bei gleichem szw unter Gleichgewichtsbedingungen. Bei Sonnenuntergang gilt aufgrund ähnlicher Überlegungen, daß die Ozonabbaurate bei gleichem szw etwas kleiner ist, als im Gleichgewicht. Nur am Rande sei hier bemerkt, daß beide Effekte asymmetrisch sind und sich im allgemeinen im Integral über die Trajektorie nicht aufheben. D. h., entlang von zwei Trajektorien kann unterschiedlicher Ozonabbau stattfinden auch wenn sich beide gleichlang bei den verschiedenen szw aufhalten und ClO_x für beide Trajektorien gleich und konstant war.

Da sich nun in der Realität auch ClO_x entlang der Trajektorie ändert, enthält δ_i nicht nur die Effekte des chemischen Ungleichgewichts, sondern auch die Änderung der Ozonabbaurate, die auf der Änderung der ClO_x -Konzentration beruht.

Nach (31) und (32) gilt für $\delta_{i,v}(\text{szw})$:

$$\sum_{i=1}^I \delta_{i,v}(\text{szw}) = 0 \quad (33)$$

Aus (30) folgt mit (31):

$$L_n = \frac{1}{V_n} \cdot \sum_{v=1}^{V_n} \left(\frac{1}{t_{n,v}} \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \left(\bar{\lambda}_v(\text{szw}) \cdot \sum_{i=1}^I \rho_{i,v}(\text{szw}) + \sum_{i=1}^I \delta_{i,v}(\text{szw}) \cdot \rho_{i,v}(\text{szw}) \right) dszw \right) \quad (34)$$

oder:

$$L_n = \frac{1}{V_n} \cdot \sum_{v=1}^{V_n} \left(\frac{1}{t_{n,v}} \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \bar{\lambda}_v(\text{szw}) \cdot \sum_{i=1}^I \rho_{i,v}(\text{szw}) dszw \right) + \frac{1}{V_n} \cdot \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \sum_{i=1}^I \sum_{v=1}^{V_n} \left(\delta_{i,v}(\text{szw}) \cdot \frac{\rho_{i,v}(\text{szw})}{t_{n,v}} \right) dszw \quad (35)$$

Nun wird angenommen, daß die $\delta_{i,v}$ und $\frac{\rho_{i,v}}{t_{n,v}}$ für verschiedene v unkorreliert seien (Annahme II). Mit (33) ist dann der Erwartungswert von

$$\sum_{v=1}^V \left(\delta_{i,v}(\text{szw}) \cdot \frac{\rho_{i,v}(\text{szw})}{t_{n,v}} \right)$$

gleich Null. Damit ändert der zweite Summand im Mittel nicht den Wert von L_n , sondern geht ausschließlich in den statistischen Fehler von L_n ein. (35) läßt sich demnach schreiben als:

$$L_n = \frac{1}{V_n} \cdot \sum_{v=1}^{V_n} \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \bar{\lambda}_v(\text{szw}) \cdot \sum_{i=1}^I \frac{\rho_{i,v}(\text{szw})}{t_{n,v}} \cdot \text{dszw} \quad (36)$$

Mit (19) wird daraus:

$$L_n = \frac{1}{V_n} \cdot \sum_{v=1}^{V_n} \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \bar{\lambda}_v(\text{szw}) \cdot \frac{\rho_v^*(\text{szw})}{t_{n,v}} \cdot \text{dszw} \quad (37)$$

Wobei für alle v gilt:

$$\int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \rho_v^*(\text{szw}) \cdot \text{dszw} = t_{n,v} \quad (38)$$

es handelt sich bei dem Faktor $\frac{\rho_v^*(\text{szw})}{t_{n,v}}$ also um eine auf eins normierte Wichtungsfunktion.

L_n hat somit die Form eines über alle Trajektorien gemittelten Integralmittels der Ozonabbaurate über das szw Intervall n . Dabei geht die Ozonabbaurate bei jedem szw mit der relativen Dauer gewichtet ein, die sich diese Trajektorie bei dem szw aufgehalten hat. Die Reihenfolge der Mittelung über die verschiedenen Trajektorien und der Wichtung der Ozonabbauraten ist nicht vertauschbar. Nur wenn zusätzlich vorausgesetzt wird, daß die Abweichungen der $\bar{\lambda}_v(\text{szw})$ (die Abweichungen werden hier als $\bar{\lambda}'_v(\text{szw})$ bezeichnet) von einem über v gemittelten $\bar{\lambda}^*(\text{szw})$ nicht mit den $\rho_v^*(\text{szw})/t_{n,v}$ korrelieren (Annahme III), läßt sich (37) wegen der dann verschwindenden Erwartungswerte von

$$\sum_{v=1}^V \left(\bar{\lambda}'_v(\text{szw}) \cdot \frac{\rho_v^*(\text{szw})}{t_{n,v}} \right)$$

schreiben als:

$$L_n = \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \bar{\lambda}^*(\text{szw}) \cdot \frac{1}{V_n} \sum_{v=1}^{V_n} \frac{\rho_v^*(\text{szw})}{t_{n,v}} \cdot \text{dszw} \quad (39)$$

Mit der Definition (40)

$$w_n(\text{szw}) = \frac{1}{V_n} \sum_{v=1}^{V_n} \frac{\rho_v^*(\text{szw})}{t_{n,v}} \quad (41)$$

ist (39):

$$L_n = \int_{\text{minszw}_n}^{\text{maxszw}_n} \bar{\lambda}^*(\text{szw}) \cdot w_n(\text{szw}) \cdot \text{dszw} \quad (42)$$

Unter den erwähnten Voraussetzungen stellen die L_n also Integralmittel über das szw-Intervall n dar, wobei diese mit der mittleren relativen Aufenthaltsdauer aller Trajektorien bei dem entsprechenden szw gewichtet sind.

Die Wichtungsfunktion $w_n(\text{szw})$ kann aus den Trajektorien Daten berechnet werden und muß jedenfalls bei der Angabe der L_n mit angegeben und bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Um eine ausreichende Datenbasis für eine multivariate Regression zu erhalten, wurden die Untergruppen von Matches aus den verschiedenen Jahren zusammengefaßt, die für die jeweilige bivariate Regression des Jahres verwendet worden waren. Es wurden folgende drei szw Intervalle unterschieden (also $N = 3$):

$$\begin{aligned} n = 1: \text{minszw}_1 &= 0^\circ, & \text{maxszw}_1 &= 85^\circ \\ n = 2: \text{minszw}_2 &= 85^\circ, & \text{maxszw}_2 &= 95^\circ \\ n = 3: \text{minszw}_3 &= 95^\circ, & \text{maxszw}_3 &= 180^\circ \end{aligned}$$

Eine feinere Einteilung lieferte keine statistisch signifikanten Ergebnisse. Als Ergebnis ergab sich:

$$\begin{aligned} L_{0^\circ-85^\circ} &= -11.2 \pm 2.4 \text{ ppbv/h} \\ L_{85^\circ-95^\circ} &= -1.2 \pm 2.7 \text{ ppbv/h} \\ L_{95^\circ-180^\circ} &= -0.5 \pm 0.4 \text{ ppbv/h} \end{aligned}$$

Die Wichtungsfunktionen $w_{0^\circ-85^\circ}(\text{szw})$ und $w_{85^\circ-95^\circ}(\text{szw})$ sind in Abbildung 7.24 angegeben. $w_{95^\circ-180^\circ}$ ist nicht von Bedeutung, da $L_{95^\circ-180^\circ}$ nicht signifikant von Null verschieden ist und hier angenommen wird, daß $\bar{\lambda}^*(\text{szw})$ für szw größer als 95° identisch Null ist. Abbildung 7.24 zeigt, daß $L_{0^\circ-85^\circ}$ im wesentlichen die Ozonabbaurate im Bereich $80^\circ-85^\circ$ angibt. In $L_{85^\circ-95^\circ}$ gehen die Ozonabbauraten bei szw größer als 90° mit deutlich mehr Gewicht ein, als die Raten bei kleineren szw.

Die Annahmen I bis III sind nur erfüllt, wenn die Streuung der $t_{n,v}$ rein statistischer Natur ist, oder die Ozonabbaurate über den gesamten Wirbel konstant ist. Beides ist in der Realität häufig nicht der Fall. Für kleine szw sind die $t_{n,v}$ im Wirbelrand systematisch länger als im Wirbelkern, während für große szw das Gegenteil gilt. Wenn nun auch die Ozonabbaurate im Wirbelkern sich systematisch vom Wirbelrand unterscheidet, sind die in den Annahmen I bis III geforderten statistischen Unabhängigkeiten nicht erfüllt. Abbildung 7.25 zeigt in den oberen drei Teilbildern die Variation der $t_{0^\circ-80^\circ,v}$, $t_{0^\circ-85^\circ,v}$ und $t_{85^\circ-180^\circ,v}$ mit pPV. Besonders $t_{0^\circ-80^\circ,v}$ korreliert sehr stark mit pPV, da kleine szw im Wirbelkern nur selten vorkommen. Aus diesem Grund wurde diese szw Einteilung nicht verwendet. Allerdings zeigen auch $t_{0^\circ-85^\circ,v}$ und $t_{85^\circ-180^\circ,v}$ eine deutliche Korrelation bzw. Antikorrelation mit pPV. Im unteren Teilbild ist die Variation von L_s mit pPV für die hier verwendete Daten dargestellt. Auch L_s hängt von pPV ab, was ein starkes Indiz dafür ist, daß auch die Ozonabbaurate bei festem szw eine pPV Abhängigkeit aufweist. Eine solche Abhängigkeit kann durch eine Variation der ClO_x -Konzentration von pPV zustandekommen. Dies bewirkt zusammen mit der Abhängigkeiten der $t_{n,v}$ von pPV, daß obige

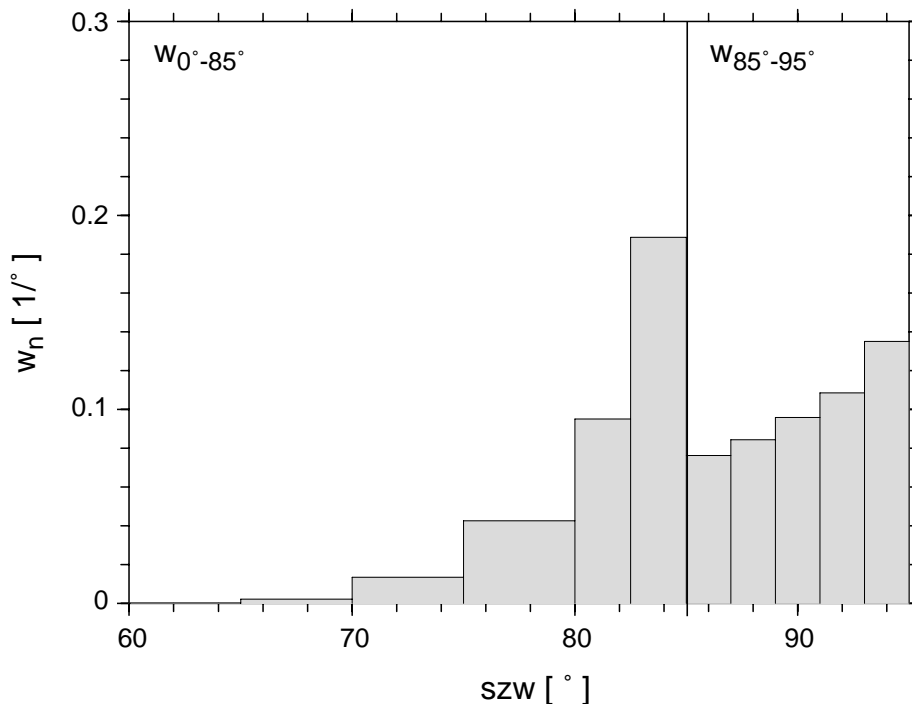


Abbildung 7.24: Die Wichtungsfunktionen $w_{0^{\circ}-85^{\circ}}$ und $w_{85^{\circ}-95^{\circ}}$ für die im Text beschriebene Gruppe von Matchen.

Annahmen I-III nur schlecht erfüllt sind. Bei dem gefundenen Vorzeichen der Abhängigkeiten von pPV bewirkt dies, das $L_{0^{\circ}-85^{\circ}}$ überschätzt wird, da die hohen Ozonabbauraten des Wirbelrands hier überproportional eingehen.

Die statistischen Fehler, die sich aus der multivariaten Analyse der vorliegenden Daten ergeben, sind so groß, daß eine quantitative Aussage über die szw Abhängigkeit der Ozonabbaurate sehr ungenau bleiben muß. Diese Situation könnte sich in kommenden Jahren ändern, wenn durch weitere Matchkampagnen mehr Daten vorliegen, die zusammen ausgewertet werden können. Sollte der statistische Fehler dabei beträchtlich abnehmen, müssen die Fehler, die auf den Abweichungen von den in der Herleitung gemachten Voraussetzungen beruhen, quantifiziert werden, bevor zuverlässige quantitative Angaben über die szw Abhängigkeit des Ozonverlusts gemacht werden können.

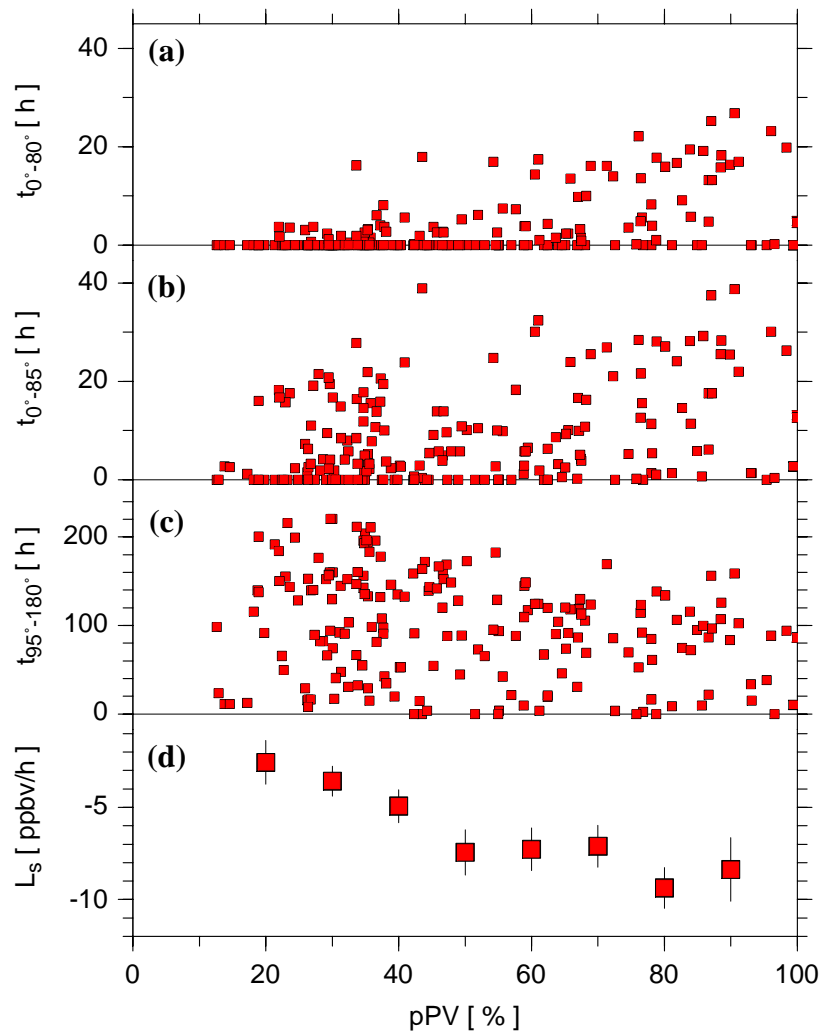


Abbildung 7.25: (a)-(c): Verschiedene $t_{n,v}$ für über pPV, für alle Matche der im Text beschriebenen Gruppe. (d) L_s über pPV für die gleiche Gruppe von Matchen.