

Abschlußbericht

zum BMBF-Projekt

Messungen des Transfers der solaren UV-B Strahlung durch die Atmosphäre der hohen Arktis



Berichtszeitraum: 01.09.1997 - 31.08.2000

Förderkennzeichen: 10 LO 9701/3

Antragsteller: Prof. Dr. O.Schrems
Alfred-Wegener-Institut
für Polar und Meeresforschung
Postfach 120161
27515 Bremerhaven
Tel.: 0471/4831-1480
Fax: 0471/4831-1425
Email: oschrems@awi-bremerhaven.de

Beteiligte

Wissenschaftler: Dr. Ch. Groß
Dr. H. Tüg
Dr. P. Beichert
Dr. S. Rohs
Dipl. Ing. Th. Hanken

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 2 |
| 2. Die Weiterentwicklung der UV-Spektralradiometer am AWI..... | 4 |
| 2.1. Stand der Meßtechnik zu Beginn des Förderzeitraumes..... | 4 |
| 2.2. Teilnahme am UV-Spektralradiometer Vergleich in Garmisch Partenkirchen..... | 6 |
| 2.3. Weiterentwicklung und Verbesserung der Meßgeräte..... | 8 |
| 3. Messungen im Rahmen des Projektes..... | 11 |
| 3.1. Meßort und Meßbetrieb..... | 11 |
| 3.2. UV-B Tagesdosen..... | 14 |
| 3.3. Ein Vergleich mit antarktischen UV-B Daten..... | 16 |
| 3.4. UV-A Tagesdosen 1998 bis 2000..... | 17 |
| 3.5. Vergleich der UV-B Daten mit dem Gesamtozon..... | 18 |
| 3.5.1. Vergleich der Messungen mit TOMS-Daten und Ozonsondierungen..... | 18 |
| 3.5.2. Änderungen von Ozon und Ozonindex in den Jahren 1997 - 1999..... | 20 |
| 4. UV-Strahlungstransferrechnungen..... | 24 |
| 4.1. Simulation von Spektren unter Einbeziehung gemessener Input-Parameter..... | 24 |
| 4.1. Der Einfluß von Albedo und Wolken auf UV-Tagesdosen..... | 26 |
| 4.2. Der Einfluß der Bodenalbedo auf den Ozonindex bei Wolkenbedeckung..... | 28 |
| 5. Zusammenfassung und Ausblick..... | 31 |
| 6. Teilnahme an Tagungen und Messen, Veröffentlichungen..... | 33 |
| Literatur..... | 36 |
| Anhang..... | 38 |
| • Reprint des AWI-Beitrags zum Bericht des Spektralradiometervergleichs in Garmisch-Partenkirchen [SEC98]..... | 38 |
| • Abstracts von Tagungsbeiträgen..... | 42 |
| • Preprint der Veröffentlichung 'Three years spectral resolved UV-Measurements at Koldewey Station (1997 - 1999)', Memoirs of National Institute of Polar Research, Spec. Issue, 54, 2001, in press..... | 48 |

1. Einleitung

Seit der Entdeckung des sogenannten "Ozonlochs" über der Antarktis werden Auswirkungen der beobachteten Abnahme der stratosphärischen Ozonschicht und ihre möglichen Folgen für das Leben auf der Erde verstärkt erforscht. Die Zerstörung des stratosphärischen Ozons stellt eine Gefahr für die Biosphäre und damit auch für die Menschheit dar, weil dieses Spurengas die Troposphäre und die Biosphäre von der gefährlichen solaren UV-Strahlung abschirmt. Es besteht deshalb eine hohe Dringlichkeit, die solare UV-Strahlung wegen ihrer Wirkung auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Mikroorganismen, Luftqualität, Materialien, biogeochemische Zyklen und Wechselwirkungen zwischen Chemie und Klima in der Troposphäre, zu quantifizieren.

Starker Ozonabbau wird seit Jahren auf einer globalen Skala sowohl in mittleren Breiten als auch insbesondere in den hohen Breiten der beiden Hemisphären beobachtet. Neben dem alljährlich wiederkehrenden Ozonloch über der Antarktis [Chu84] [Far85] wurde auch über der Arktis in den letzten Jahren verstärkter Ozonabbau beobachtet [Mül97] [Rex97]. Einen wesentlichen Unterschied zwischen der Situation in der Antarktis und der Arktis bildet die unterschiedliche Temperatur, Form und Stabilität der Polarwirbel. In den Wintern 1997/1998 und 1998/99 bildete sich kein stabiler Polarwirbel über der Arktis aus. Damit blieben die Temperaturen entsprechend höher und ein dem Antarktischen Ozonloch vergleichbarer Ozonabbau, wie er im Frühjahr 1997 in der nördlichen Hemisphäre nachgewiesen wurde, blieb 1998 und 1999 aus. Im Gegensatz dazu war der Polarwirbel über der Arktis im Winter 1999/2000 sehr stabil und es konnte im Frühjahr 2000 ein starker Ozonabbau z.B. mit den vom Alfred-Wegener-Institut durchgeführten Ozonsondierungen [Kön97] am Meßstandort nachgewiesen werden.

Neben dem bekannten Zusammenhang zwischen Ozonsäule und UV-Strahlung gibt es verschiedene weitere Parameter, die den Transfer der UV-Strahlung durch die Atmosphäre beeinflussen. Dazu zählen neben dem Ozon auch andere Spurengase und vor allem Wolken und Aerosol. Darüber hinaus beeinflusst auch das Rückstreuvermögen des Bodens, die sogenannte Bodenbedo, den Strahlungsfluß.

Die nachfolgend beschriebenen UV-Messungen des Alfred-Wegener-Institutes liefern Meßdaten von einem Meßort (Ny-Ålesund, 78,5°N, 12°O), der im arktischen Winter fast immer innerhalb des Polarwirbels liegt. Spektrale UV-B Daten von 280 bis 322nm wurden über den gesamten Förderungszeitraum kontinuierlich gemessen. Ab März 1998 wurde zusätzlich die UV-A Strahlung von 320 bis 400 nm aufgezeichnet. Die Auswertung der Meßdaten im Hinblick auf den quantitativen Zusammenhang zwischen den Veränderungen in der stratosphärischen Ozonschicht und der am Boden einfallenden UV-B Strahlung erfolgte unter Einbeziehung der vom Alfred-Wegener-Institut durchgeführten Ozonsondierungen und der täglich zur Verfügung stehenden Satellitendaten von TOMS. Ein weiterer Schwerpunkt der Dateninterpretation liegt auf dem Einfluß von Bewölkung auf den UV-Strahlungstransfer. Durch einen Vergleich der auf Spitzbergen aufgezeichneten Daten mit Messungen des gleichen Gerätes an der deutschen Neumayer-Station in der Antarktis, wird vor allem der Einfluß der Wolken im Zusammenwirken mit der Bodenbedo mit bzw. ohne Schneebedeckung deutlich.

Am Alfred-Wegener-Institut haben die Herren Dr. Christian Groß, Dr. Peter Beichert, Dr. Susanne Rohs und Dr. Helmut Tüg an der Durchführung des Projektes mitgearbeitet. Die Wartung und Kalibrierung der Spektralradiometer erfolgte in Kooperation mit Dipl. Ing. Thomas Hanken von der Firma iSiTEC in Bremerhaven. Die im Rahmen des Projektes in der Zeit vom 1.9. 1997 - 31.8. 2000 durchgeführten Arbeiten sowie die erreichten Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben.

2. Die Weiterentwicklung der UV-Spektralradiometer am AWI

2.1. Stand der Meßtechnik zu Beginn des Förderzeitraumes

Bei dem im Alfred-Wegener-Institut mit Fördermitteln des BMBF (Förderkennzeichen 03PL000A) entwickelten UV-B Meßgerät handelt es sich um ein Array-Spektralradiometer. Während nahezu alle weltweit eingesetzten UV-B Spektralradiometer auf dem Scannerprinzip mit nachgeschaltetem Photomultiplier beruhen, wird bei diesem Gerät eine Mikrokanalplatte (kein Dioden-Array!) als photonenzählendes Detektorarray eingesetzt. Das Gerät war ursprünglich für den Einsatz in der Wassersäule konzipiert (Forschungsthema: „UV-B Wirkung auf Phytoplankton“). Nach dem erfolgreichen Einsatz auf mehreren Forschungsschiffen wurde es für atmosphärische Messungen umgebaut. Die Geräte dieses Typs wurden in den Polargebieten auf Spitzbergen, an der Neumayer-Station auf dem Ekstöm-Schelfeis und an der Jubany-Station auf der Antarktischen Halbinsel eingesetzt. Hinzu kommen noch Einsätze der druckfesten Unterwasserversionen, die für Profilmessungen im Wasser entwickelt wurden und dort oft über Monate verbleiben, z.B. im Kongsfjord (Spitzbergen) und in der Potter Cove, (Antarktische Halbinsel).

Während bei den üblicherweise eingesetzten Scannern der gewünschte Wellenlängenbereich durch Drehen der Gitter und das Vorbeiführen des Spektrums am Austrittsspalt schrittweise abgetastet wird, kann mit der Mikrokanalplatte der gesamte UV-B Bereich von 280 bis

320 nm in 32 Kanälen simultan im Sekundentakt erfaßt werden. Die bei diesem Meßprinzip durch den erweiterten Mittenspalt naturgemäß auftretenden Streulichtprobleme konnten auf optischem Wege mittels eines gegenläufigen Interferenzfilters gelöst werden. Das Gerät kommt so ohne bewegliche Komponenten aus, die an der steilen Abbruchkante des Spektrums leicht zu Unsicherheiten der Wellenlänge und damit zu erheblichen Fehlern in der Bestrahlstärke führen. Nach den bisher gesammelten Erfahrungen kann das Gerät über Monate im Betriebsmodus verbleiben und dabei zeitlich lückenlose Daten aufzeichnen. Die exakte Zuordnung zu anderen Meßgrößen ist jederzeit möglich. Schnelle atmosphärische Veränderungen, wie sie beispielsweise durch Wolken verursacht werden, können mit Scannern dagegen nur unzureichend wiedergegeben werden.



Abb. 1 Innenansicht des UV-B Spektralradiometers: Links der Doppelmonochromator (Bentham DM 150), rechts das Hochspannungsnetzteil und die Elektronik. Der Detektor befindet sich nicht sichtbar hinter dem DM 150.

Das Spektralradiometer ist in einem wetterfesten Gehäuse untergebracht (MILEX, 62 x 52 x 48 cm) und wird mittels eines Miniatur-Kompressorkühlers und einer gegenläufiger Heizung auf 1°C temperaturstabilisiert. Die relative Luftfeuchtigkeit wird durch ein Trockenmittel auf unter 20% gehalten und ständig überwacht.

Für die Teilnahme an der deutschen UV-Spektralradiometer Vergleichskampagne (Garmisch Partenkirchen, August 1997) im Rahmen dieses Projektes wurde es notwendig den Meßbereich auf den Wellenlängenbereich des UV-A bis 400nm auszuweiten. Durch die beschränkte Anzahl der Detektionskanäle unseres UV-B Spektralradiometers, erschien es angebracht die UV-A Messungen mit einem zweiten Gerät durchzuführen. Aus zeitlichen Gründen wurde für den Vergleich der einfachste Lösungsansatz, ein dem UV-B Gerät quasi baugleiches UV-A Gerät, realisiert. Lediglich durch Verwendung eines Gitters mit anderer Dispersion wurde der Meßbereich von 280-322nm auf 318-400nm verschoben und aufgeweitet.

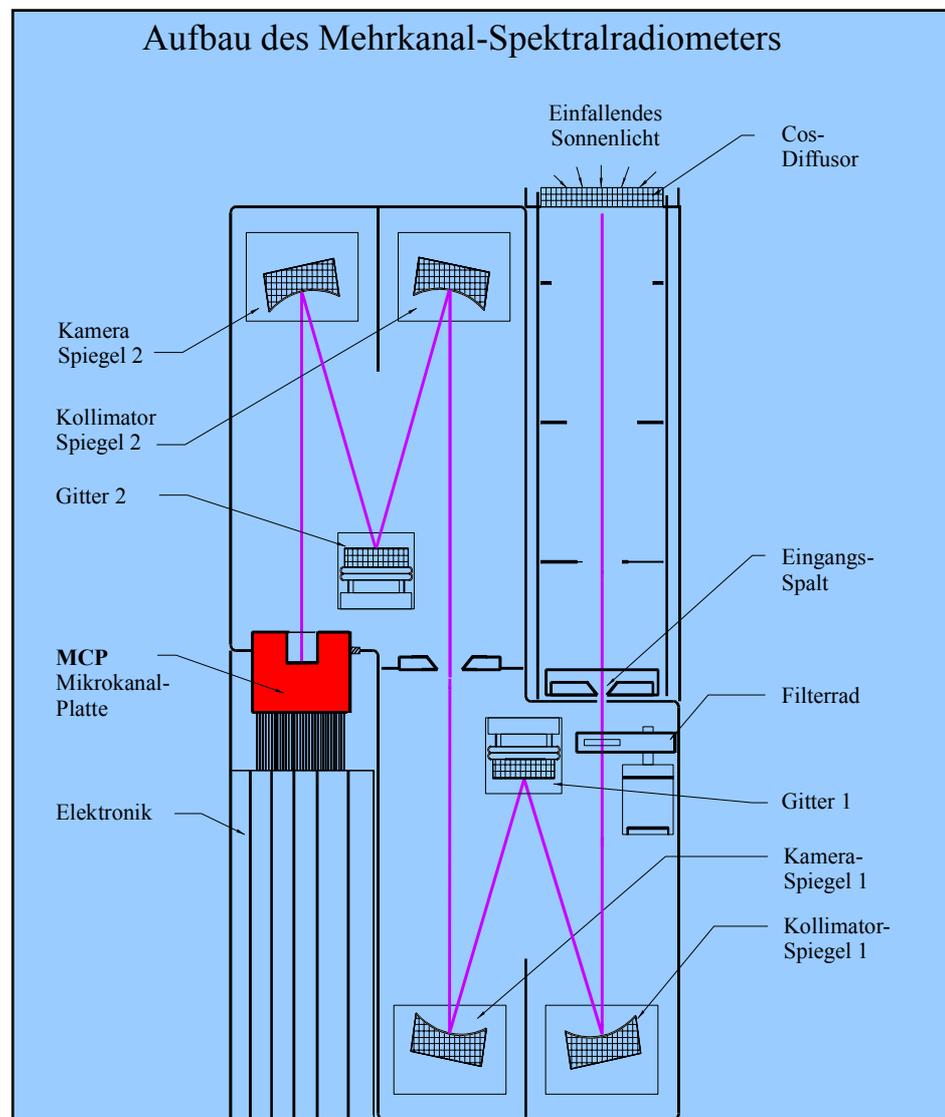


Abb. 2

2.2 Teilnahme am UV-Spektralradiometer Vergleich in Garmisch Partenkirchen

Die im Rahmen des Projekts geforderte Teilnahme an einem Nationalen Meßgerätevergleich für UV Spektralradiometer fand in der Zeit vom 3. bis 15. August 1997 am Fraunhofer Institut für Umweltforschung in Garmisch-Partenkirchen (IFU) statt. Insgesamt haben 12 Geräte an dem Vergleich teilgenommen. Die Messungen erstreckten sich sowohl über den UV-B als auch über den UV-A Bereich. Da unser Instrument zu dieser Zeit nur für die spektrale Erfassung von 280 - 322 nm ausgelegt war, mußte eine modifizierte Version für den UV-A Bereich gebaut werden. Aus Zeitmangel konnte das UV-A Gerät vor der Vergleichskampagne nicht mehr ausreichend getestet werden. Daher konnten wir leider nur die UV-B Daten in den Vergleich einfließen lassen. Die Ergebnisse für unser Instrument werden im folgenden kurz zusammengefaßt. Für weitere Einzelheiten des Vergleichs sei auf den offiziellen Bericht [SEC98] bzw. den Auszug im Anhang verwiesen.



Abb. 3 Die beiden UV-Spektralradiometer auf der Dachplattform des Fraunhofer Institutes für atmosphärische Umweltforschung in Garmisch Partenkirchen bei der Teilnahme am deutschen Meßgeräte Vergleich 1997 mit Dipl. Ing. Thomas Hanken, Dr. Helmut Tüg und Dr. Christian Groß (v.l.n.r.).

Die ersten vier Tage vom 4. – 8. August waren alle Meßgeräte auf dem Dach des IFU zu Außenmessungen aufgebaut, in der darauffolgenden Woche wurde jedes Instrument im Kalibrierlabor des IFU getestet. Bei den Außenmessungen sollte der Spektralbereich von 285 – 410 nm von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang im halbstündigen Rhythmus gemessen werden. Da es sich bei den anderen Geräten ausschließlich um scannende Systeme handelte,

die das Spektrum Wellenlänge für Wellenlänge zeitversetzt abtasten, wurde für die ersten drei Tage der Außenmessungen eine Scangeschwindigkeit von 8 nm pro Sekunde vorgegeben, um zeitlich synchronisierte Messungen zu gewährleisten. Das heißt, zu Beginn der Aufnahme eines Spektrums wurde die einfallende Strahlung bei 285 nm gemessen und ca. 17 Minuten später bei 410 nm. Da unser Mehrkanal-System alle Wellenlängen des Meßbereichs gleichzeitig erfaßt, mußten einige Änderungen in der Software zur Datenaufnahme und im Meßmodus vorgenommen werden, um die Daten mit dem gegebenen Standard vergleichen zu können. Auf diese Weise wurden synthetische Spektren erzeugt, die dem Zeitversatz der Scanner-Spektren angenähert sind. Es zeigte sich jedoch, daß vor allem bei schnell veränderlichem Sonnenstand bzw. durchbrochener Bewölkung ein schwacher Einfluß der nicht exakt übereinstimmenden zeitlichen Auflösung sichtbar blieb.

Im einzelnen ergab sich eine gute Übereinstimmung unserer UV-B Dosis mit dem Referenzgerät des IFU. Die vom AWI-Gerät gemessene UV-B Dosis (290 - 315 nm) liegt etwa 5% unter dem Referenzwert, eine Abweichung, die im wesentlichen auf den noch nicht korrigierten Cosinusfehler unserer Eingangsoptik zurückzuführen ist. Ein drehbarer Meßtisch zur Bestimmung des Cosinusfehlers unserer Geräte im Kalibrierlabor ist in Arbeit, so daß in Zukunft eine Cosinuskorrektur der Spektren durchgeführt werden kann. Abweichungen vom Referenzspektrum wurden jedoch im kurzwelligen Spektralbereich unterhalb von 295 nm nachgewiesen. Dieser Bereich geht aufgrund der hohen Dynamik des Spektrums nicht sichtbar in die Berechnung der UV-B Dosis ein. Hier zeigen unsere Daten einen zu steilen Abfall, der jedoch auf eine Überkorrektur der Spektren bzgl. der Spaltfunktion zurückgeführt werden konnte. Diese Überkorrektur erfolgte auf Grund einer Messung der Spaltfunktion in unserem Kalibrierlabor mit einem HeNe-Laser bei 632.8 nm. Die bei dieser Wellenlänge ermittelte Spaltfunktion läßt sich nicht fehlerfrei auf den UV-B Bereich übertragen. Im Labor des IFU konnte die Spaltfunktion mit einem HeCd-Laser im UV bei einer Wellenlänge von 325 nm neu vermessen werden. Unter Verwendung dieser Spaltfunktion verschwindet die Überkorrektur. Ein HeCd-Laser für unser Kalibrierlabor ist daraufhin angeschafft worden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bzgl. der Datenqualität ist die Wellenlängengenauigkeit und Wellenlängenstabilität der UV-Spektralradiometer. Hier haben Scanner häufig Probleme, weil die Wellenlängengenauigkeit von der exakten mechanischen Drehung der Monochromatorspiegel abhängt. Unser Mehrkanal-Instrument arbeitet hingegen mit fixierten Gittern, was zu einer deutlich verbesserten Stabilität der Wellenlängeneinstellung führt. Die Einstellung erfolgt durch Justierung einer Quecksilberlinie auf den 50 µm breiten Zwischenraum zwischen zwei benachbarten Kanälen und entspricht einer Genauigkeit von 0.01 nm. Die Stabilität kann jederzeit durch Messen der Quecksilberlinie nachgeprüft werden. Während der gesamten Vergleichskampagne blieb unsere Wellenlängeneinstellung stabil.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das Gerät eine hohe Datenqualität erreicht, daß sich aber vor allem im Bereich der Fehlerkorrekturen Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen ließen, die im folgenden Zeitraum realisiert werden konnten.

2.3. Die Entwicklung eines kombinierten UV-A/B Spektralradiometers

Mit dem für den Meßvergleich der UV Spektralradiometer gebauten UV-A Meßgerät wurden für einen Übergangszeitraum in den Jahren 1998 und 1999 an der Koldewey-Station auf Spitzbergen neben dem solaren UV-B auch spektrale Messungen des UV-A Bereichs zwischen 320 nm und 400 nm durchgeführt. Dieses Gerät ist allerdings aus mehreren Gründen für den UV-A Bereich nicht optimiert und stellte nur eine schnell realisierbare Übergangslösung für den Gerätevergleich 1997 und erste Messungen im Anschluß daran dar. Einerseits hat dieses Instrument eine für Messungen im UV-A Bereich nicht erforderliche hohe Dynamik und Empfindlichkeit, andererseits ist die spektrale Auflösung durch nur 32 parallel arbeitende Meßkanäle für den abzudeckenden Wellenlängenbereich von 320 - 400 nm sehr gering. Zur Erfüllung der NDSC Spezifikationen ist jedoch eine spektrale Auflösung von mindestens einem Nanometer notwendig.

Aus diesen Gründen wurde für den UV-A Bereich ein eigenes, den geringeren Anforderungen an UV-A Messungen gemäß wesentlich preiswerteres Spektralradiometer entwickelt. Zur Wellenlängenselektion kommt dabei nur ein Einfachmonochromator zum Einsatz, was der deutlich geringeren Dynamik der bodennahen solaren Strahlung oberhalb von 315 nm entspricht. Als Detektor dient ein Peltier gekühltes 256-kanaliges Diodenarray, welches für UV-A Messungen eine ausreichende Empfindlichkeit hat. Die große Anzahl der Detektionskanäle führt zu einer hohen Abtastrate des Spektrums mit einem Meßpunkt alle 0.6 nm. Der Meßbereich liegt zwischen 318 und 470 nm. Damit bleibt der parallele Meßmodus und damit die hohe zeitliche Auflösung für den gesamten UV-Bereich erhalten, was insbesondere beim Messen unter schnell veränderlichen atmosphärischen Bedingungen, wie z.B. durchbrochener Bewölkung, von großem Vorteil ist. Durch die Verwendung eines verkleinerten Hochspannungsnetzteils wurde es möglich, das UV-A Gerät zusätzlich im wetterfesten temperierten Gehäuse des UV-B Gerätes unterzubringen. Beide Geräte werden über denselben Laptop zur Aufnahme zeitgleicher Spektren gesteuert. Sie sind ansonsten unabhängig voneinander und verfügen jeweils über eine eigene aber baugleiche Eingangsoptik mit einem Diffuser aus Teflon, der von einer Quatzkuppel abgedeckt ist.

Mit dieser Neuentwicklung verbunden sind meßtechnische Verbesserungen am UV-B Gerät. Hierzu gehören u.a. ein vereinfachtes Austauschen von Eingangstubus und Quatzkuppel sowie eine Veränderung des UV-B Meßbereichs. Bisher wurde im UV-B ab 280 nm gemessen. Unterhalb von 290 nm kommt aufgrund der starken Absorption des Ozons jedoch keine meßbare Strahlung mehr am Boden an. Der Bereich von 280 - 290 nm sagt jedoch etwas über das Streulichtverhalten des Meßgerätes aus und wurde aus diesem Grund in der Entwicklungsphase eingeschlossen. Durch die Verwendung eines Gitters mit anderer Dispersion erstreckt sich der Meßbereich des UV-B Moduls in der Zukunft von 290 bis 320 nm, was bei der Verwendung des 32 kanaligen Detektors zu einer verbesserten Abtastrate von einem Meßpunkt pro Nanometer führt (vorher ein Meßpunkt pro 1,35 Nanometer).



Abb. 4 Das kombinierte UV-A/B Spektralradiometer mit den zwei getrennten Eingangskuppeln für UV-A und UV-B auf dem Dach der NDSC-Station des AWI in Ny-Ålesund auf Spitzbergen

Komplett neu erstellt wurde die Software zur Erfassung des gesamten UV-Bereichs. Als wesentliche Erweiterung wird für jedes gemessene Spektrum sofort das Gesamtzozon nach dem Dobson Prinzip aus den UV-Daten berechnet (siehe hierzu Kapitel 3.5). Dafür erfolgt eine automatische Berechnung der Luftmasse für den Beobachtungsort aus der geographischen Breite und Länge, dem Datum sowie der Tageszeit. Dieser 'online' berechnete Wert gibt z.B. den Meteorologen an den Meßstationen Hinweise auf starke zeitliche Gradienten des Gesamtzozons. Diese Information kann dann zu gezielten weiteren Untersuchungen, wie dem Starten einer Ozonsonde genutzt werden.

Seit März 2000 zeichnet ein solches neues UV-Spektralradiometer an der NDSC-Station auf Spitzbergen Daten auf. Ein typisches Spektrum ist in Abb. 5 dargestellt. Ein zweites Gerät steht seit Mai 2000 an der biologischen Anstalt Helgoland (Stiftung Alfred-Wegener-Institut) auf Helgoland zur Verfügung. Der Einsatz auf der Neumayer-Station ($70,65^\circ$ Süd, $8,25^\circ$ West) in der Antarktis erfolgt ab Januar 2001. Das Gerät ist bereits mit dem Forschungsschiff 'Polarstern' dorthin unterwegs. Weitere Geräte z.B. für die Messungen an der argentinischen Jubany-Station auf der antarktischen Halbinsel ($62,23^\circ$ Süd, $58,67^\circ$ West) oder einen neuen Meßstandort in den Tropen werden folgen.

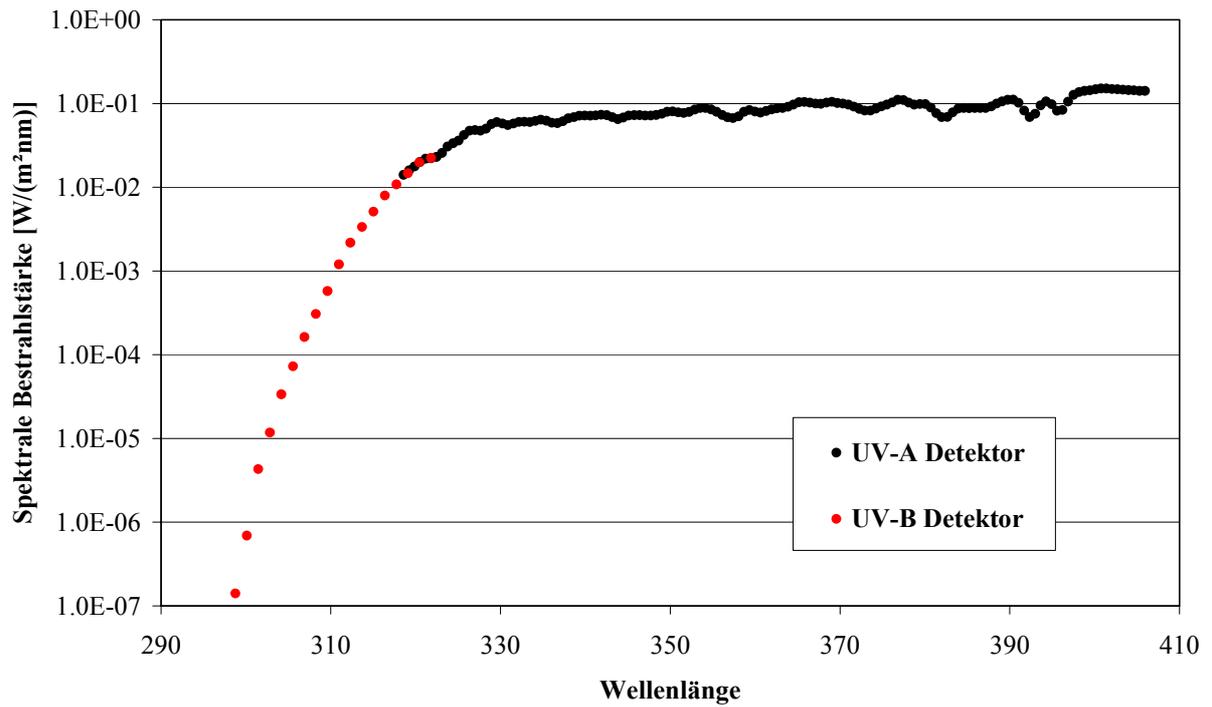


Abb. 5 Spektrale UV-Bestrahlstärke, gemessen mit dem kombinierten UV-A/B Spektralradiometer des AWI in Ny-Ålesund (Spitzbergen) am 21. März 2000 um 11:17 Uhr UTC (Local Noon).

3. Messungen im Rahmen des Projektes

3.1. Meßort und Meßbetrieb

Der Meßstandort Ny-Ålesund ist ein kleines Dorf auf Spitzbergen ($79^{\circ} 56'$ Nord, $11^{\circ} 57'$ Ost) und dient heute fast ausschließlich der Wissenschaft. Seit Beginn der Forschungsarbeiten des Alfred-Wegener-Institutes in Ny-Ålesund Ende der achtziger Jahre bilden die Beobachtungen der nordpolaren Stratosphäre dort einen besonderen Schwerpunkt. Seit 1992 ist die Forschungsstation in Ny-Ålesund Teil der arktischen Primärstationen in dem globalen, international betriebenen NDSC-Netzwerk (Network for Detection of Stratospheric Change). Das NDSC – Meßprogramm (ganzjährige Meßreihen) führt das AWI in Kooperation mit der Universität Bremen und dem Norwegischen Institut für Luftforschung durch.

In die europäischen Meßkampagnen EASOE (European Arctic Stratospheric Ozone Experiment) im Winter 1991/92 und SESAME (Second European Stratospheric Arctic and Midlatitude Experiment) im Winter 1993/94 sowie 1994/95 war die NDSC-Station Ny-Ålesund mit einbezogen. Auch im Rahmen des deutschen Ozonforschungsprogrammes wurden verschiedene Projekte durchgeführt (z.B. die MATCH-Kampagnen). 1994 wurde für die NDSC-Station Ny-Ålesund ein neues Observatoriumsgebäude errichtet, welches im Juni 1995 durch Bundesforschungsminister Dr. Jürgen Rüttgers seiner Bestimmung übergeben werden konnte. Das NDSC-Meßprogramm enthält einige für den UV-Strahlungstransfer wichtige Parameter. Darin eingeschlossen sind Ozonsondierungen (mind. 1 mal pro Woche),



Wolkeninformationen aus den visuellen synoptischen Wetterbeobachtungen, Lidar Daten über Aerosol Profile, Säulendichten wichtiger Spurengase aus FTIR Messungen sowie eine Vielzahl von auf- und abwärtsgerichteten bodennahen Strahlungsflüssen jenseits der UV-Bereiche. Alle Daten werden kontinuierlich als 1 - 5 Minutenmittel erfaßt (siehe [KOE97]).

Abb. 6 Horizontabschattung nach Osten: Blick vom Dach der NDSC-Station über den Kongsfjord.

Das Spektralradiometer des AWI befindet sich auf der Dachplattform des NDSC Gebäudes in einer Höhe von ca. 10 m über dem Meeresspiegel. Die Umgebung von Ny-Ålesund ist differenziert. Da ist zum einen der große Kongsfjord, der sich nach Norden bis ins offene Meer erstreckt. Dies ist die einzige Richtung mit freiem Horizont (siehe Abb. 8). In den anderen Himmelsrichtungen ist der Horizont durch Berge verdeckt, die bis zu 800 m hoch und einige

Kilometer von Ny-Ålesund entfernt sind. Abbildung 6 zeigt den Blick über den Kongsfjord nach Osten. Lediglich nach Süden ist der Zeppelinfjellet relativ nah, der mit einer Höhe von 554 m den Horizont deutlich abschattet (siehe Abb. 7).

Abb. 7

Horizontabschattung nach Süd / Südwest: Blick aus dem Blauen Haus der Koldewey-Station über das NDSC Gebäude (ganz links mit der Kuppel auf dem Dach) zum Zeppelinfjellet (links). Auf der Dachplattform des NDSC-Gebäudes erkennt man noch schwach das gelbe Gehäuse des UV Spektralradiometers (siehe Pfeil).



Bei 89° 56' Nord kommt die Sonne nach der polaren Nacht zum ersten mal am 21. Februar und am 20. Oktober zum letzten mal im Jahr über den Horizont. Über die abschattenden Berge kommt die Sonne jedoch erstmals am 20. März eines jeden Jahres in den Ort Ny-Ålesund, bei einer Sonnenhöhe von 11° am Mittag. Die maximale Sonnenhöhe am 21. Juni beträgt 35°.

Im Sommer so von Mitte Juni bis September ist die Umgebung schneefrei und der Fjord eisfrei. Die ersten Schneefälle setzen i.A. im September ein und der Fjord friert über Winter zu. In der Regel taut der Fjord Ende Mai wieder auf, lediglich im Jahre 1998 war er bis Mitte Juni eisbedeckt. In Abbildung 9 ist der Jahresgang der Bodenbedo für 1997 abgebildet. Dieser durch die saisonale Schneebedeckung bedingte Jahresgang ist auf Spitzbergen auch durch die geringe Luftverschmutzung sehr groß. Die schneebedeckte Landschaft erreicht hier eine Albedo bis 0.9, d.h. 90% des einfallenden UV-Lichtes werden zurückgestreut.



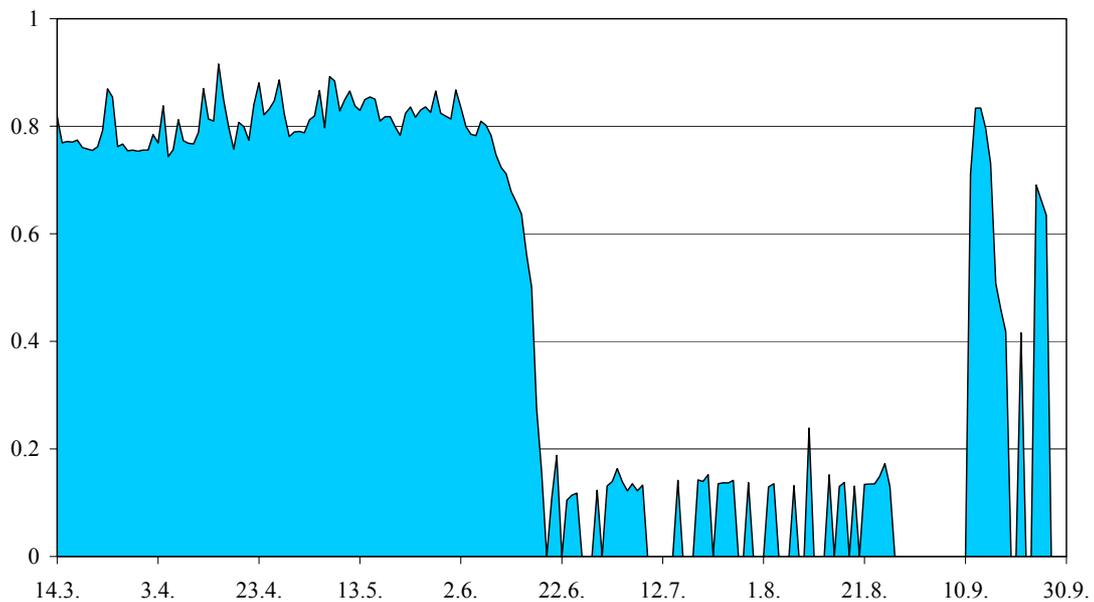
Abb. 8

Blick vom Standort des Spektralradiometers nach Norden auf den Ausgang des Kongsfjord ins offene Meer. Dies ist die einzige Richtung, in der der Horizont kaum durch Berge abgeschattet wird.

Die Albedo Daten für 1997 in Abbildung 9 wurden mit Hilfe eines nach unten gerichteten Photometers gemessen und beziehen sich damit auf eine relativ kleine Fläche. In den UV-Strahlungstransport geht jedoch eine gemittelte Bodenalbedo im Umkreis von ca. 50 km um dem Meßort herum ein. Dies konnte mit Hilfe dreidimensionaler Strahlungstransferrechnungen gezeigt werden [DEG98]. Der deutlich sichtbare Einfluß der Bodenalbedo auf die UV Strahlung am Boden wird in den Kapiteln 3.2 und 4.2. untersucht.

Abb. 9

Bodenalbedo NDSC-Station Ny-Ålesund 1997



Der kontinuierliche Meßbetrieb umfaßt die sekundliche Erfassung der Spektren die im Normalbetrieb jeweils über 5 Minuten gemittelt abgespeichert werden, um die Datenmengen nicht zu groß werden zu lassen. Die UV-B Strahlung wurde von Mai 1997 bis Oktober 2000 kontinuierlich gemessen. Das Meßgerät wurde jeweils Mitte Oktober abgebaut, über Winter in Bremerhaven neu kalibriert und in 1998, 1999 und 2000 Anfang März wieder in Ny-Ålesund aufgebaut. Der Aufbau 1997 erfolgte erst Anfang Mai, da an dem damals neuen Gerät noch einige Tests bzgl. der Datenqualität und Stabilität durchgeführt wurden. Die Messung der UV-A Strahlung erfolgte in 1998 und 1999, zeitgleich und im gleichen Meßmodus wie beim UV-B, mit dem zusätzlichen UV-A Spektralradiometer. Ab März 2000 wird die gesamte solare UV-Strahlung mit dem neuen kombinierten UV-A/B Meßgerät erfaßt.

3.2. UV-B Tagesdosen

In Abb. 10 ist der Jahresgang der UV-B Tagesdosis (280 nm - 320 nm) für das Jahr 2000 dargestellt; in Abb. 11 für die Jahre 1997 - 1999. Die dem Sonnenstand entsprechende Zunahme der Tagesdosen zum 21. Juni hin wird durch die Fluktuationen der Bewölkung überlagert, die eine große Streuung der Meßwerte bedingt. Der Vergleich der Datensätze spiegelt die unterschiedliche Wettersituation der verschiedenen Jahre wider. 1999 war auf Spitzbergen ein sehr schlechter Sommer mit einer geringen Sonnenscheindauer. So zeigt die Abbildung für 1999 nur einen Tag mit einer UV-B Tagesdosis größer 40 kJ/m², die nur bei sehr gutem Wetter überschritten wird. In den Jahren 1997 und 2000 gab es hingegen 10 bzw. 11 Tage und in dem außergewöhnlich sonnigen Sommer 1998 sogar 21 Tage mit einer Tagesdosis größer 40 kJ/m².

Allen Datensätzen gemein ist jedoch eine von der Jahreszeit abhängige Änderung der Streuung. Im Frühjahr ist sie deutlich geringer als im Sommer und Herbst. Ein Grund dafür liegt in der jahreszeitlich variierenden Häufigkeit von Wolken auf Spitzbergen. Die langjährigen Wolkenbeobachtungen an der Station zeigen eine signifikant längere Sonnenscheindauer in den Monaten April und Mai als für den Rest des Jahres. Der wesentlichere Grund für die geringe Streuung der Tagesdosen im Frühjahr liegt aber in der hohen Bodenbedo bei Schneebedeckung. Die Bodenbedo zeigt auf Spitzbergen einen ausgeprägten Jahresgang von Werten um 80% für eine geschlossene Schneedecke und um 10% für den schneefreien Fall (siehe Abb. 9). Der Schnee verschwindet am Meßstandort Ny-Ålesund i.A. Anfang Juni. Durch das hohe Rückstreuvermögen einer Schneedecke kommt es bei Bewölkung zu mehrfacher Reflexion der einfallenden Strahlung zwischen der Schneedecke und der Wolkenunterseite. Diese Mehrfachreflexion führt zu einer Erhöhung des Strahlungsflusses am Boden, die dem abschwächenden Effekt der Wolken entgegenwirkt und somit zu einer Glättung der Werte für die Tagesdosis führt. Die ersten Schneefälle im Herbst, Anfang September für 1998 bzw. Mitte September für 1997, 1999 und 2000, sind ebenfalls in den Abbildungen zu erkennen. Ähnliche Ergebnisse sind vor kurzem für Messungen in den Alpen veröffentlicht worden [REN00].

Ab

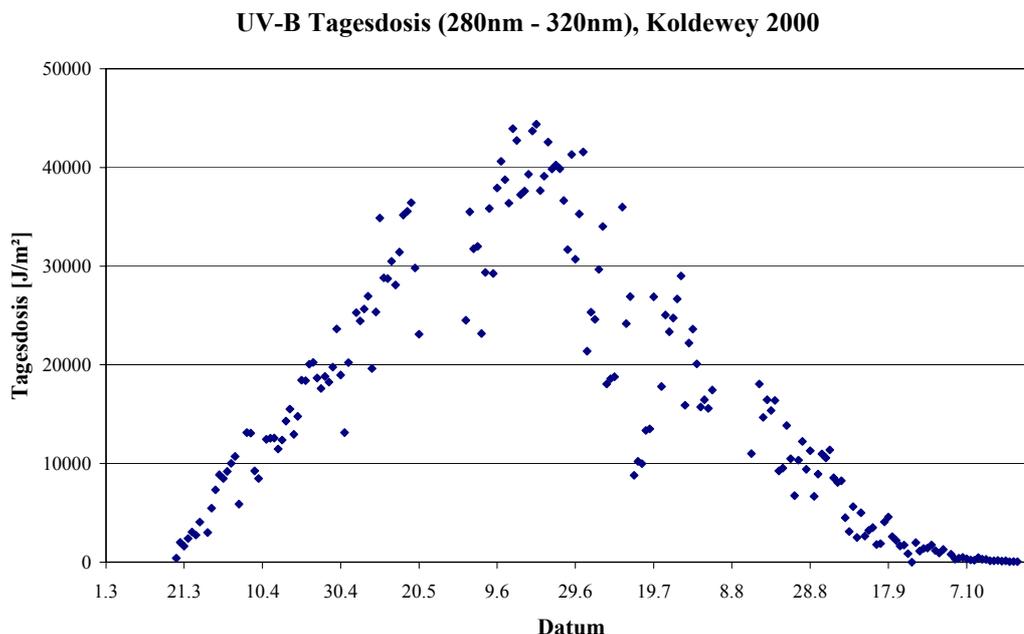
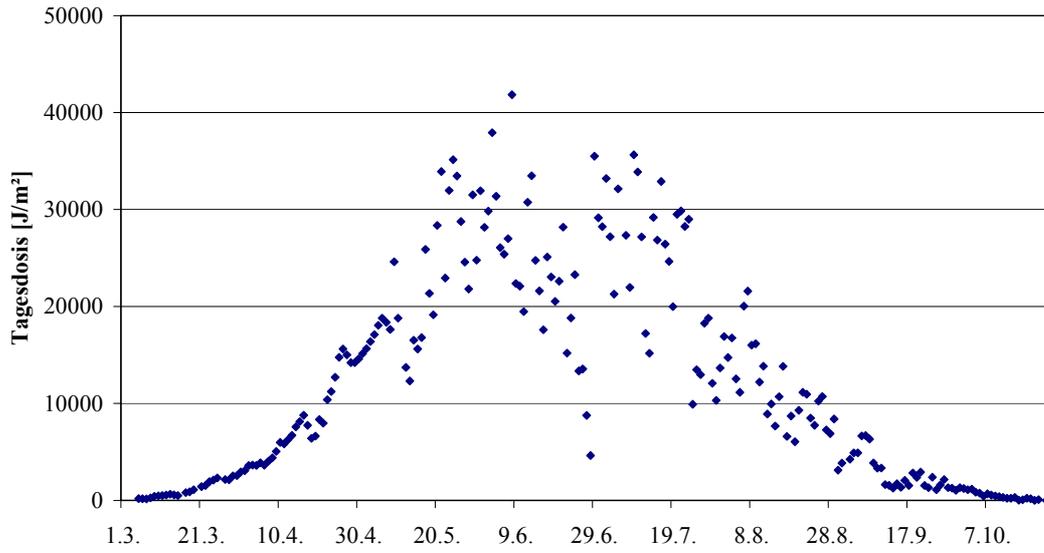
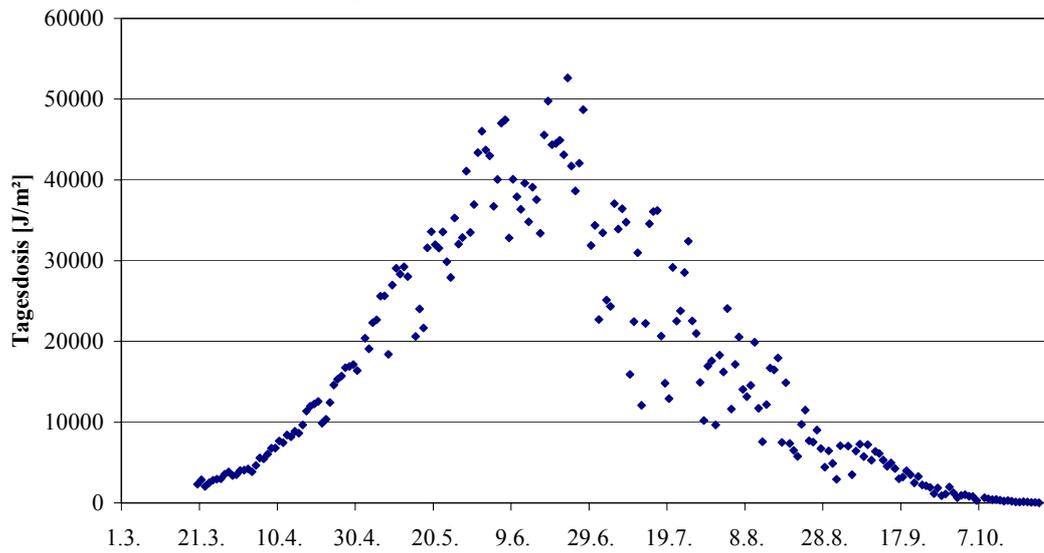


Abb. 11

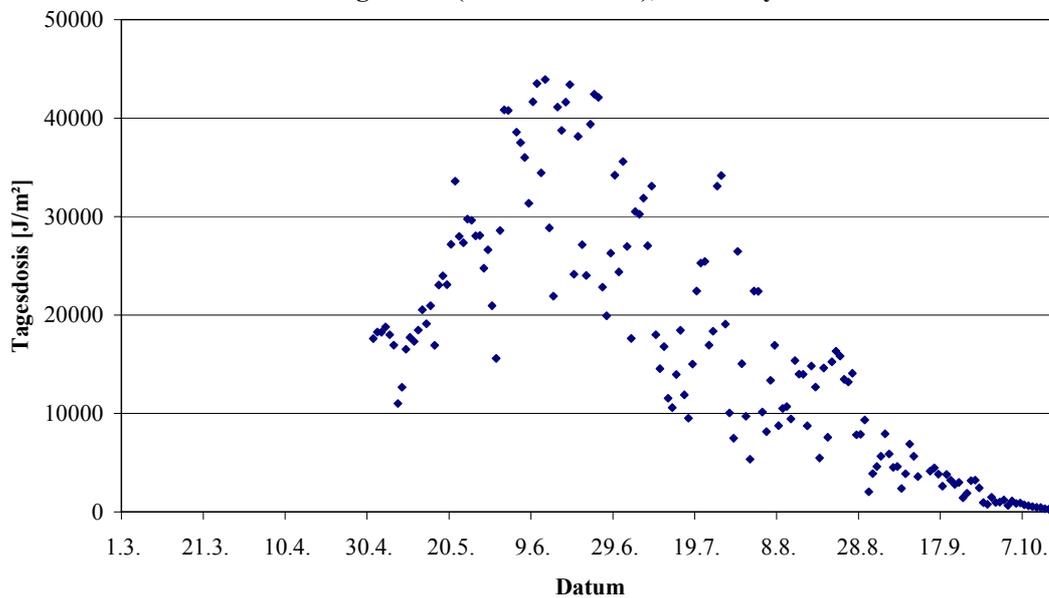
UV-B Tagesdosis (280nm - 320nm), Koldewey 1999



UV-B Tagesdosis (280nm - 320nm), Koldewey 1998



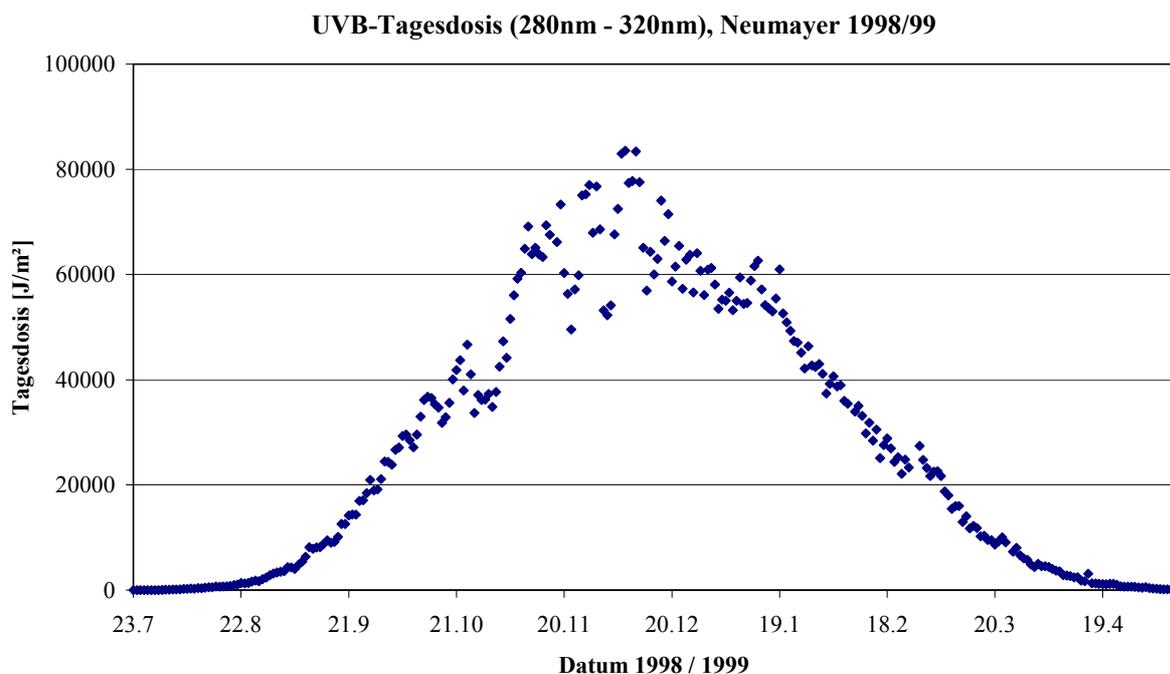
UV-B Tagesdosis (280nm - 320nm), Koldewey 1997



3.3. Ein Vergleich mit antarktischen UV-B Daten

Die Abschwächung des Wolkeneinflusses auf die UV-Tagesdosis durch Schnee läßt sich gut durch einen Vergleich mit UV-Messungen an der deutschen Neumayer-Station in der Antarktis belegen. Die Neumayer-Station ($70,65^\circ$ Süd und $8,25^\circ$ West) weist eine ganzjährige Schneebedeckung verbunden mit einer relativ konstanten Bodenalbedo um 80% auf. Wie an der NDSC-Station in Ny-Ålesund werden dort seit einigen Jahren vom Alfred-Wegener-Institut ganzjährig UV-B Messungen mit einem Spektralradiometer gleicher Bauart durchgeführt. Der Jahresgang der Tagesdosis, der in Abb. 12 für die Saison 1998 / 99 an der Neumayer-Station dargestellt ist, zeigt wie erwartet eine deutlich geringere Streuung, als sie im Sommer und im frühen Herbst auf Spitzbergen zu beobachten ist. Meteorologische Beobachtungen zeigen für den Standort Neumayer eine vergleichbare Variabilität der Bewölkung, die jedoch keine so ausgeprägten saisonalen Unterschiede aufweist wie auf Spitzbergen. Die Absolutwerte der Tagesdosen für Neumayer liegen deutlich höher als für Ny-Ålesund. Das ist zum einen natürlich durch die geographische Breite bedingt: Neumayer liegt knapp 10° näher am Äquator als Ny-Ålesund. Das entspricht einer maximalen Sonnenhöhe von $43,1^\circ$ im Gegensatz zu $34,5^\circ$ für Ny-Ålesund. Zum anderen führt die hohe Reflexion der einfallenden Strahlung an der Schnee- oder Eisoberfläche zu einer Erhöhung des Strahlungsflusses am Boden. So wurden für Spitzbergen im Mai höhere Tagesdosen als bei vergleichbarem Sonnenstand im Juli nachgewiesen (siehe Abb. 10 und Abb. 11). Eine Klärung des Einflusses der Bodenalbedo auf den Strahlungsfluß im Zusammenspiel mit Bewölkung ist am einfachsten mit Hilfe von Modellrechnungen möglich, die in Kapitel 3 beschrieben werden.

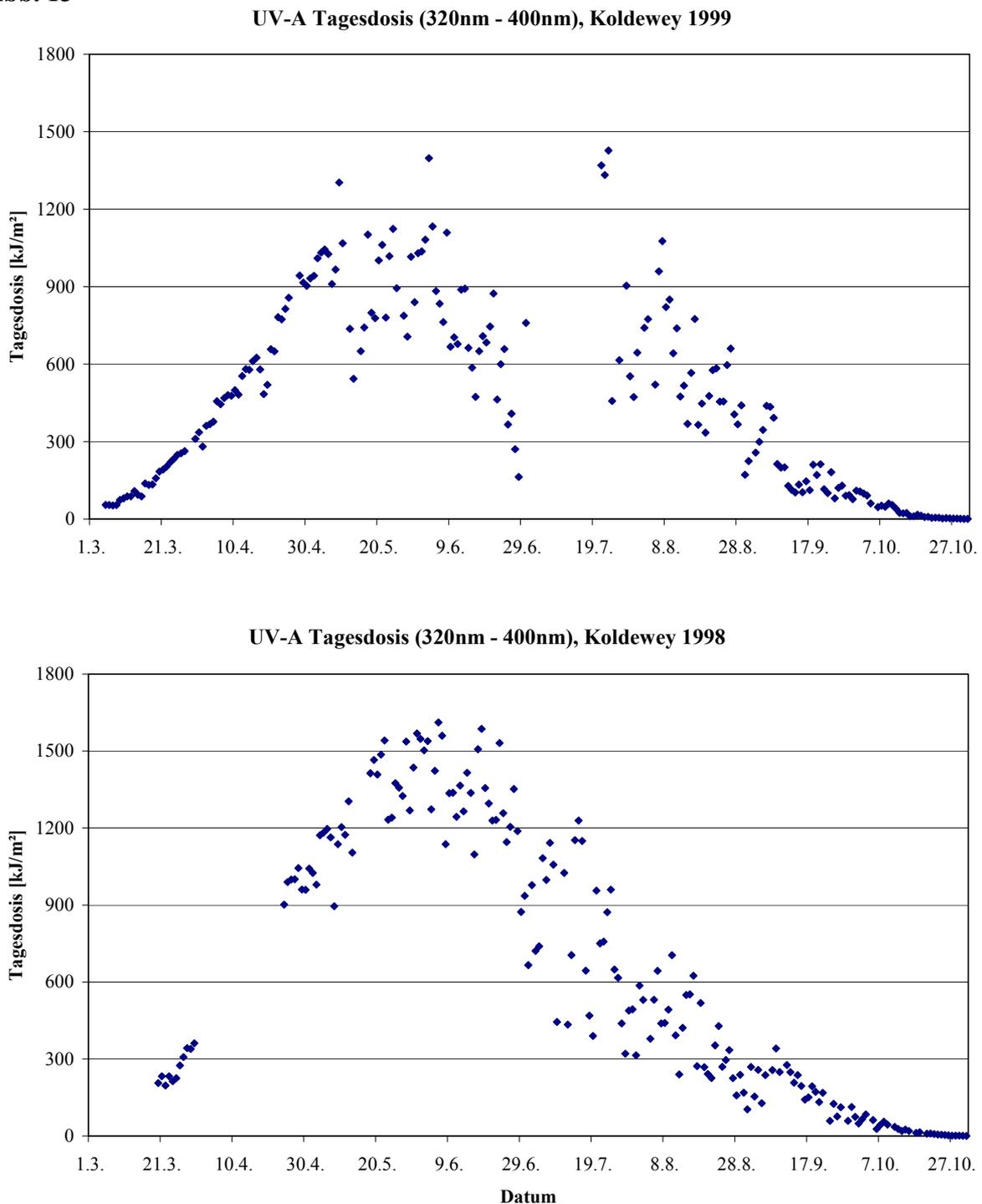
Abb. 12



3.4. UV-A Tagesdosen 1998 und 1999

Abbildung 13 zeigt die Tagesdosen von 320 nm bis 400 nm, die 1998 und 1999 mit dem UV-A Spektralradiometer gemessen wurden. Leider mit zwei zweiwöchigen Datenlücken Anfang April 98 und Anfang Juli 99, die auf Probleme mit dem Meßgerät zurückzuführen sind. Auch hier zeigen sich die deutlich höheren Werte im Sommer 1998, welche die unterschiedlichen Witterungsverhältnisse widerspiegeln und die geringere Streuung der Daten im Frühjahr und ab Mitte September aufgrund der hohen Albedo der Schneebedeckung. Die Absolutwerte werden auch hier vom deutlich besseren Wetter 1998 geprägt.

Abb. 13



Die UV-A Daten vom Jahr 2000 sind noch nicht vollständig ausgewertet. Da in dem neuen UV-A/B Spektralradiometer für den UV-A Bereich ein 256 kanaliges Photodiodenarray als Detektor eingesetzt wird, hat sich die Anzahl der Datenpunkte von 32 auf 256 erhöht. Zur Auswertung dieser Spektren muß daher erst die gesamte für eine automatische Aufbereitung der Daten geschriebene Software dem neuen Format angepaßt werden.

3.5. Vergleich der UV-B Daten mit dem Gesamtozon

Um den Einfluß des Gesamtozons auf die Spektren von dem anderer Parameter (z.B. Aerosol, Wolken, etc.) zu trennen, wird das Ozonindex genannte Verhältnis zweier Wellenlängen (300 nm / 320 nm) eingeführt. Während die Absorption des Ozons für diese beiden Wellenlängen stark unterschiedlich ist, bleibt der Einfluß der anderen Größen in guter Näherung konstant und fällt in Folge dessen bei der Verhältnisbildung näherungsweise heraus. Seckmeyer et al. zeigten [SEC96], daß die Absorption von Wolken im UV nicht ganz konstant ist, aber sie fanden nur eine schwache Abnahme der Transmission von etwa 10% von 300 bis 400 nm. Diese Abnahme ist linear, so daß der Effekt von 300 zu 320 nm nur 2% ausmacht. Diese Wellenlängenabhängigkeit wird durch den aufwärts gerichteten Photonenfluß über der Wolke verursacht, der durch Mie-Streuung an den Wolkenpartikeln entsteht. Dieser wird dann wellenlängenabhängig gemäß der Rayleigh-Streuung wieder nach unten gestreut [KYL97].

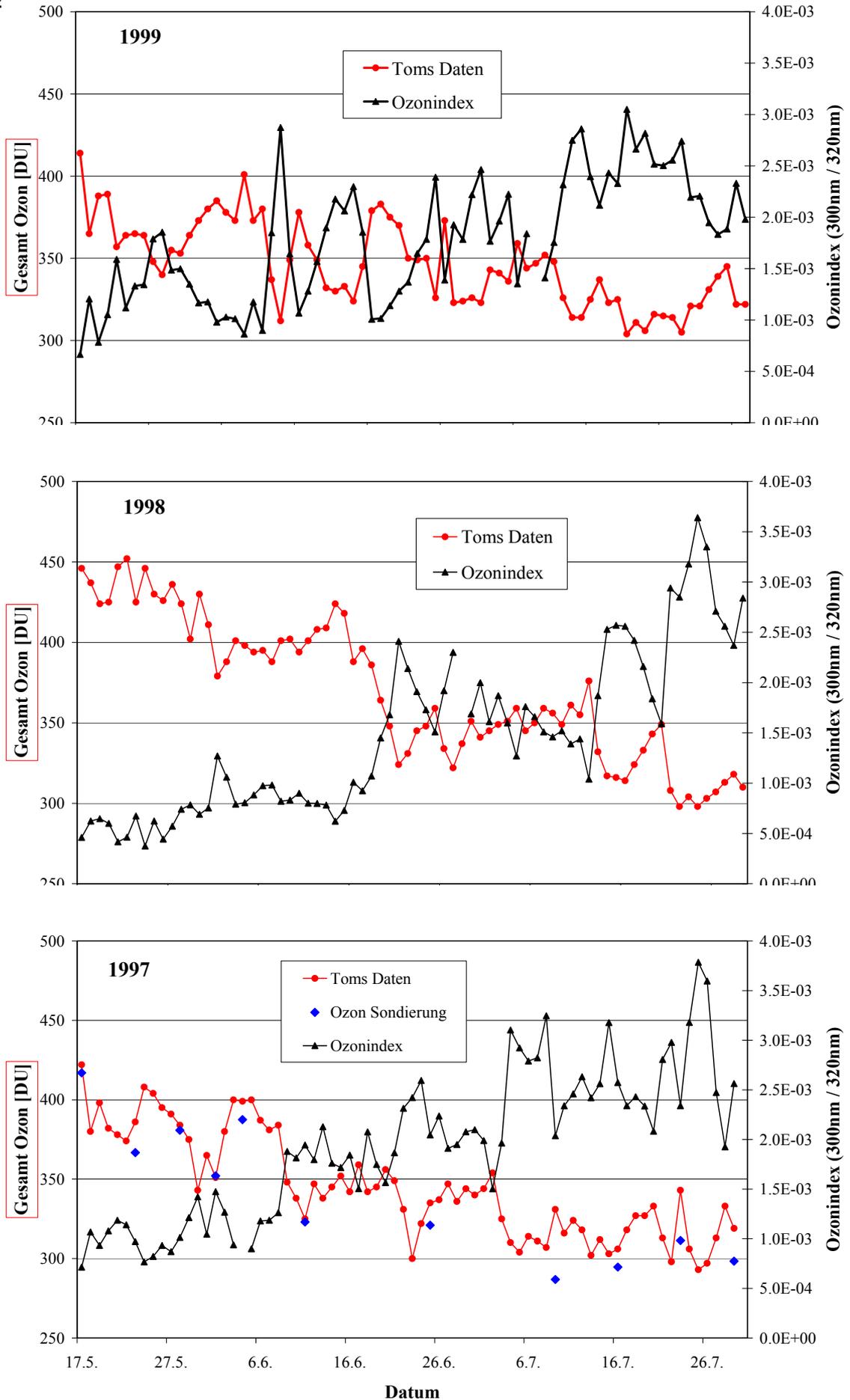
Desweiteren konnten Mayer et al. mit Monte Carlo Rechnungen zeigen, daß es in Wolken sehr großer optischer Dicke zu einer enormen Vergrößerung des optischen Weges der Photonen durch die Mie-Streuung kommen kann [MAY98]. Dies führt zu einer verstärkten UV-B Absorption durch Ozon in der Wolke und kann die Ergebnisse optischer Verfahren zur Bestimmung der Ozonsäule, welche die Strahlung unterhalb der Wolke messen, stark verfälschen. Die Größe dieses Fehlers steigt mit dem Ozongehalt der Wolke und mit zunehmender Sonnenhöhe. Im letzteren Fall nimmt der Weg des Lichtes durch die Ozonschicht bis zum Minimalwert bei senkrechtem Sonnenstand ab und die zusätzliche Absorption in der Wolke gewinnt relativ dazu an Bedeutung. Bezüglich beider Parameter liegen auf Spitzbergen geeignete Bedingungen vor: Zum einen erreicht die Sonne in dieser Breite maximal eine Höhe von 35°. Zum anderen spielt das troposphärische Ozon aufgrund der geringen Luftverschmutzung dort keine große Rolle.

3.5.1. Vergleich der Messungen mit den TOMS-Daten und Ozonsondierungen

In Abb. 14 ist der aus den gemessenen UV-B Spektren berechnete Ozonindex im Vergleich zum Gesamtozon aufgetragen. Das Gesamtozon wird in Ny-Ålesund mittels Ozonsonden ca. einmal wöchentlich gemessen (siehe Abb. 14 für 1997). Das ist für einen Vergleich mit den täglichen Schwankungen im Ozonindex nicht befriedigend, deshalb wurden zum Vergleich die täglich zur Verfügung stehenden Satelliten-Daten von TOMS herangezogen. In Ny-Ålesund stehen Ozon-Daten noch von einigen weiteren Verfahren zur Verfügung wie FTIR, DOAS, Differential Absorption LIDAR und Mikrowellen. Eine ausführliche Diskussion dieser Daten zeigt jedoch einige Einschränkungen auf [LAN99], während sich die TOMS Messungen als über den gesamten Zeitraum sehr stabil erweisen.

Abb. 14

Vergleich: Gesamt Ozon - Ozonindex, Sonnenstand 30°, Ny-Ålesund



Um den Einfluß des Sonnenstandes und damit der unterschiedlichen Luftmasse aus den UV-B Daten zu eliminieren, wurden für den Vergleich mit den TOMS-Daten jeweils die Spektren eines Tages herausgesucht, bei denen genau eine Luftmasse von 2 bzw. eine Sonnenhöhe von 30° vorlag. Diese Luftmasse, wird bei 79° nördlicher Breite nur in der Zeit vom 17. Mai bis 29. Juli erreicht, so daß sich der Vergleich auf diesen Zeitraum des Jahres beschränkt. Die Abbildung zeigt, daß die täglichen Schwankungen des Ozonindex und die täglichen Variationen des Gesamtozons sehr gut antikorreliert sind.

Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, daß der Vergleich der UV-Messungen und der Satelliten-Daten dadurch fehlerbehaftet ist, daß die zeitliche Übereinstimmung zwischen der Satellitenmessung und der Messung des UV-Spektrums nur auf ca. $\pm \frac{1}{2}$ Tag genau ist, da der Zeitpunkt des Überfluges von TOMS, nicht mit dem Zeitpunkt des herausgesuchten Sonnenstandes übereinstimmt. Außerdem sind die TOMS-Daten zusätzlich über eine Fläche von etwa 40 x 40 km² räumlich gemittelt. Somit sind der Vergleichbarkeit bei starken zeitlichen und räumlichen Gradienten im Gesamtozon Grenzen gesetzt. Die in Abb. 14 für 1997 zusätzlich aufgetragenen Ozon Werte aus Sonden Aufstiegen zeigen bereits bis zu 10% Abweichung von den TOMS-Daten. Näheres zur Fehlerbetrachtung findet sich im nächsten Abschnitt.

3.5.2. Änderungen von Ozon und Ozonindex in den Jahren 1997 bis 1999

Die im Hinblick auf den anthropogenen Ozonabbau letzten Endes entscheidende Frage für die Abschätzung eines Trends im UV-B Klima ist die, nach dem quantitativen Zusammenhang zwischen den Veränderungen des Ozongehalts der Stratosphäre und der UV-B Einstrahlung auf der Erdoberfläche. Nach Abschluß der Messungen 1998 lagen erstmals vollständig die UV-B Spektren und die TOMS Daten für 2 Jahre an der NDSC-Station in Ny-Ålesund vor. Damit wurde es möglich, das Verhältnis der Gesamtozon-Werte beider Jahre mit dem Verhältnis der Ozonindices zu vergleichen. Wird für jeden Tag das Verhältnis der Ozonindices zweier Jahre gebildet, fällt der Einfluß der sich mit dem Sonnenstand über das Jahr ändernden Luftmasse heraus. Deshalb muß für die Verhältnisbildung keine bestimmte Luftmasse herausgesucht werden. Da das Verfahren jedoch bei sehr niedrigem Sonnenstand immer schlechter wird, sind im folgenden nur die Monate Mai bis August berücksichtigt.

Anhand der UV-B Meßdaten von 1997 und 1998 konnte eine funktionale Abhängigkeit der Änderung des Ozonindex von der Änderung des Gesamtozons ΔO_3 abgeleitet werden. Dieser funktionale Zusammenhang der Verhältnisse der Ozonindices mit den Verhältnissen der TOMS-Daten nach Gleichung (2) leitet sich aus dem einfachen Ansatz (1) ab. Der freie Parameter ΔB (0.0125 DU^{-1}) wurde mit Hilfe eines Least-Square-Fits an die Daten von 1997 und 1998 bestimmt. Diese Funktion kann nun auf die Vergleiche 1997/1999 und 1998/1999 angewandt werden. Da die Daten von 1999 nicht in den Fit einbezogen sind, ergibt sich daraus ein Test für die Übertragbarkeit der Ergebnisse.

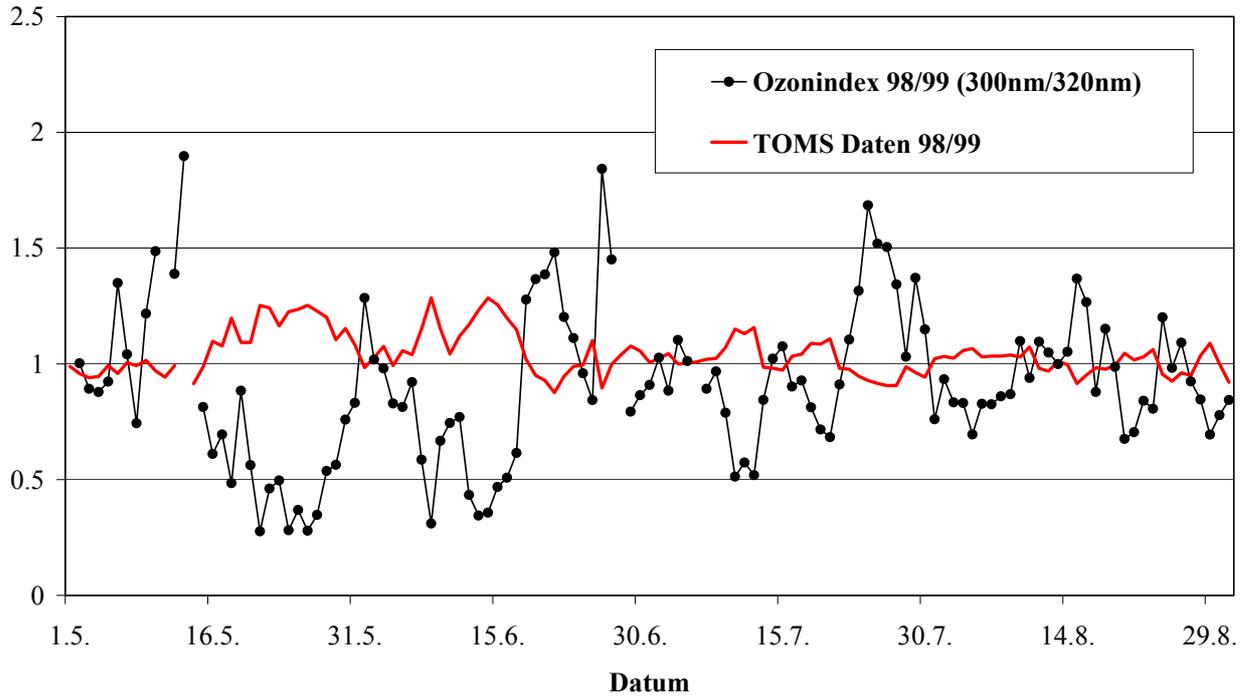
$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-B_\lambda [O_3]) \quad (1)$$

$$O_3 \text{ Index}(97/98) = \exp(-\Delta B \Delta O_3) \quad (2)$$

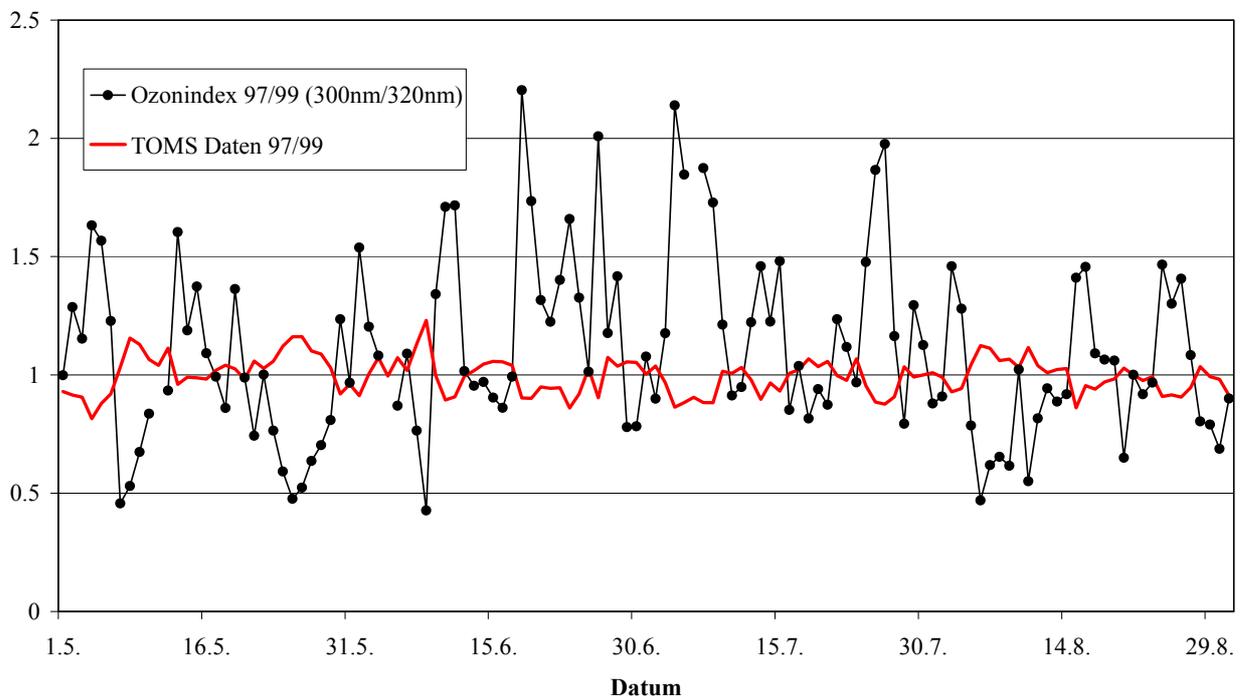
$$\text{mit: } \Delta O_3 = [O_3]_{(97)} - [O_3]_{(98)} \quad \text{und} \quad \Delta B = B_{300\text{nm}} - B_{320\text{nm}}$$

Abb. 15

Ny-Ålesund: Ozon und Ozonindex, Vergleich der Verhältnisse 1998/1999



Ny-Ålesund: Ozon und Ozonindex, Vergleich der Verhältnisse 1997/1999



In Abb. 15 sind die Verhältnisse zweier Jahre (1998/1999 bzw. 1997/1999) für das von TOMS gemessene Gesamt Ozon und den aus den UV-Spektren ermittelten Ozonindex dargestellt. Man erkennt deutlich die Spiegelsymmetrie beider Kurven bzgl. der 1-Linie und die Überhöhung des UV-Response auf Ozonänderungen.

In Abb. 16 ist der Fit nach Gleichung (2) als Funktion des Gesamtozons von 1997 und 1998 im Vergleich zum gemessenen Verhältnis der Ozonindices 1997/1998, 1997/1999 und 1998/1999 dargestellt. Die Abb. zeigt, daß die gemessenen Verhältnisse der Ozonindices mit den nach obigem Ansatz aus den TOMS-Daten theoretisch berechneten Quotienten i.A. recht gut übereinstimmen. Einige deutliche Ausreißer, sind auf starke räumliche und zeitliche Gradienten im Gesamtozon zurückzuführen. Dies läßt sich z.B. für den krassen Ausreißer vom 30. Mai im Diagramm 1997/1998 nachvollziehen: Der TOMS-Wert für 1997 zeigt einen großen Sprung bzgl. der Ortskoordinaten: Für den Breitengrad der NDSC-Station ($78,93^\circ$ N, $11,95^\circ$ O) liegt ein TOMS-Wert von 430 DU vor, aber nur $0,1^\circ$ weiter nördlich ($79,03^\circ$ N, $11,95^\circ$ O) beträgt der TOMS-Wert nur noch 402 DU. Das entspricht einer Entfernung von 11,1 km und liegt damit im Fehlerbereich durch die räumliche Mittelung der TOMS-Messungen. Eine Reduktion des Ozonwertes für den 30.5.98 von 430 DU auf 402 DU, führt nach Formel (2) zu einer Reduktion der Fitfunktion von 2,97 auf 2,09 und damit deutlich in die richtige Richtung. Dieses Beispiel zeigt, wie starke Inhomogenitäten sich auf den Vergleich der TOMS-Daten mit den Ozonindices auswirken können. Dies gilt natürlich auch für schnelle zeitliche Änderungen, da die Satellitenmessungen und die Bodenmessungen nicht exakt zeitgleich erfolgen. Über den gesamten Meßzeitraum betrachtet ergibt sich aber, daß solche extremen Bedingungen selten sind.

Somit läßt sich nach 3 Jahren spektral aufgelösten UV-B Messungen an der NDSC-Station Ny-Ålesund die Beziehung zwischen den Änderungen im Gesamtozon und dem Ozonindex der am Boden einfallenden UV-Strahlung durch Gleichung (2) quantitativ beschreiben.

Abb. 16a)

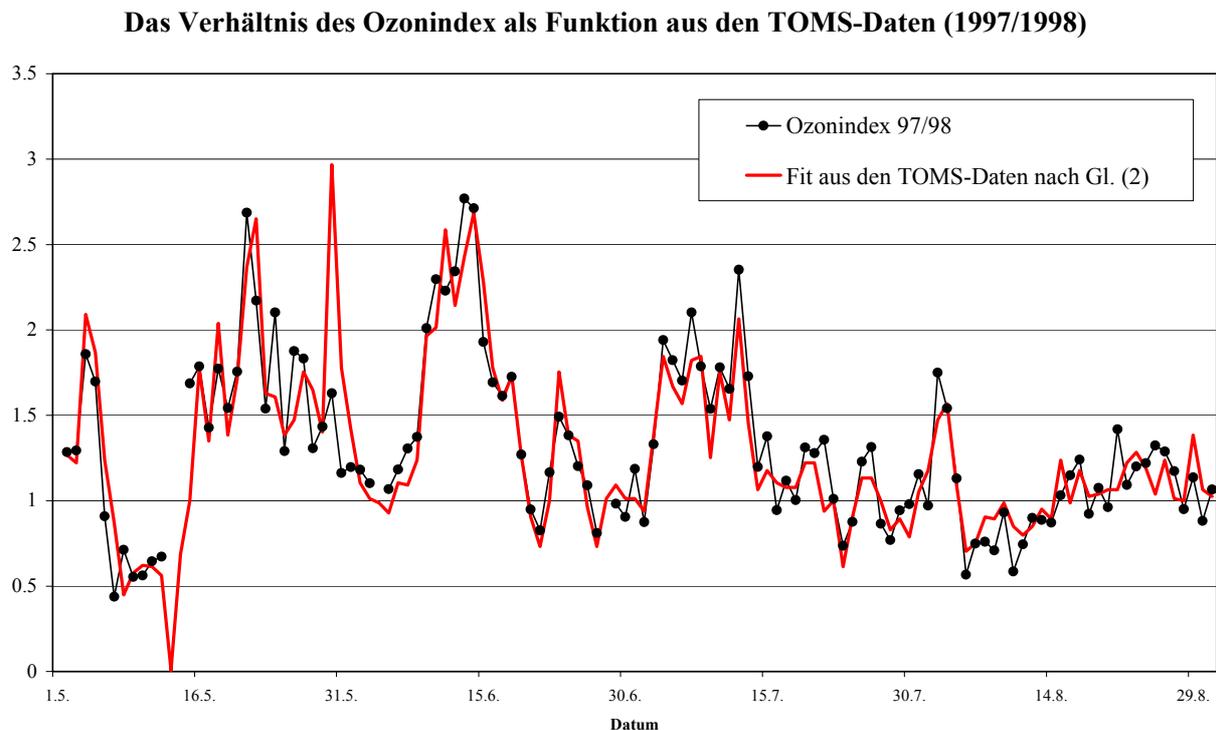


Abb. 16 b)

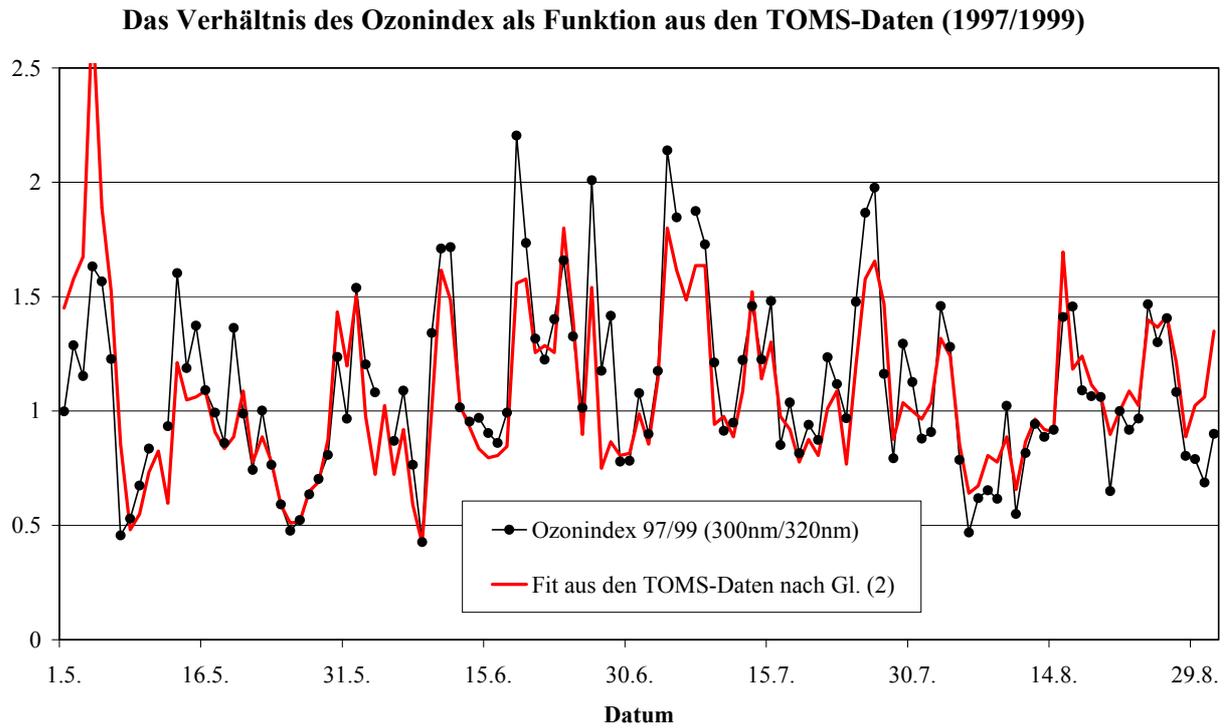
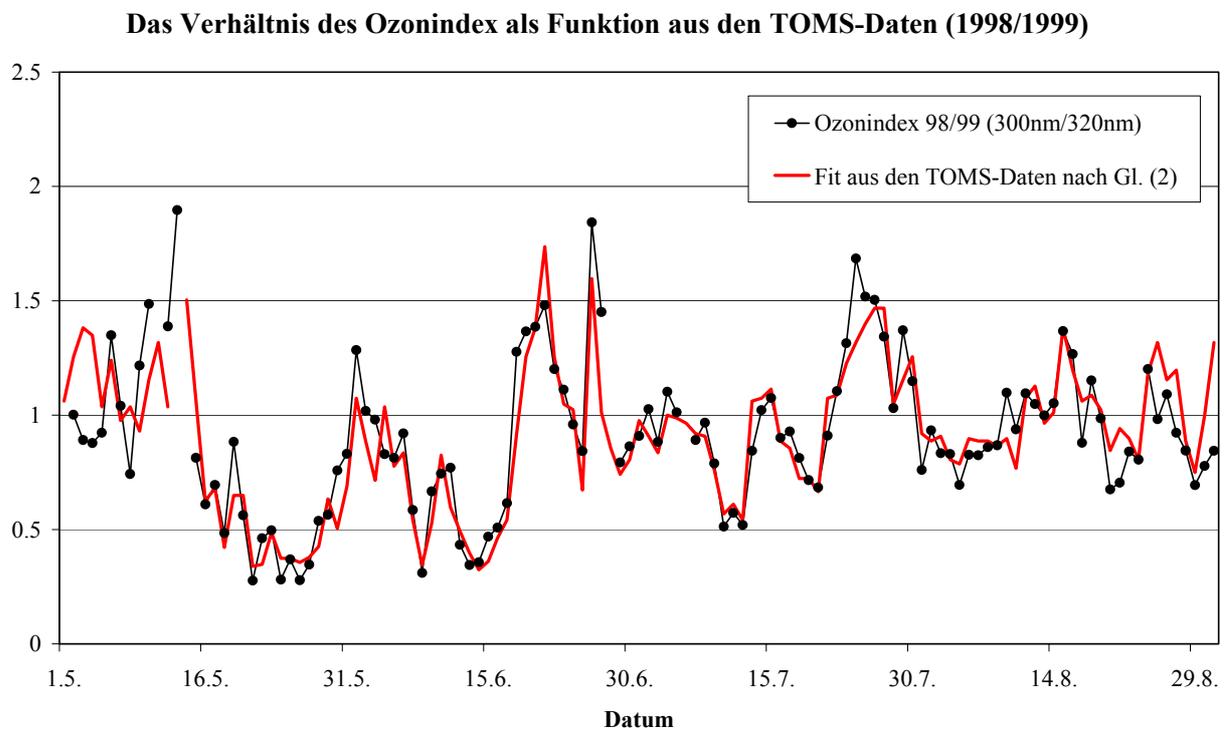


Abb. 16 c)



Die Abbildungen zeigen das Ergebnis der an die Meßdaten von 1997 und 1998 gefitteten Funktion zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Ozon-Variabilität und UV-B Response in Übertragung auf die Daten von 1999, die nicht in den Fit mit einbezogen wurden.

4. UV-Strahlungstransferrechnungen zum Einfluß von Bodenalbedo und Wolken

Die Modellierung des UV-Strahlungstransfers durch die Atmosphäre bildet eine wichtige Ergänzung zur spektral aufgelösten Messung der solaren UV-Strahlung. Sie dient dem Verständnis der gemessenen Daten im Hinblick auf die kausale Beziehung zwischen relevanten atmosphärischen Parametern (wie Aerosole, Wolken, Ozon und weiterer Spurengase) oder z.B. der Bodenalbedo und der am Boden ankommenden UV-Strahlung. Dadurch wird die Auswirkung künftiger Veränderungen in der Atmosphäre (z.B. der Ozonschicht) auf das UV-Klima am Boden vorhersagbar. Für den wolkenlosen Himmel kann der UV-Strahlungsfluß am Boden oder in beliebiger Höhe heute schon in guter Übereinstimmung mit den Meßdaten modelliert werden.

Mittlerweile stehen verschiedene leistungsfähige Programmpakete für Strahlungstransfer-Rechnungen zur Verfügung. Für die vorliegenden Arbeiten wurde das eindimensionale Strahlungstransfer-Modell *libRadtran* von Arve Kylling und Bernhard Mayer [KYL] verwendet. Es basiert auf einer numerischen Lösung der Strahlungstransfer Gleichung nach dem von Stamnes et al. [STA88] eingeführten Discrete-Ordinate Algorithmus oder wahlweise auf dem Zweistrom-Ansatz nach Kylling et al.. Es ermöglicht eine flexible Eingabe quasi aller den Strahlungsfluß beeinflussenden Parameter z.B. aus Messungen (vertikale Profile aller relevanten Spurengase, Wolken, Bodenalbedo etc.). Der Einfluß von Aerosolen wird nach dem Aerosol-Modell von Shettle et al. berücksichtigt [SHE89]. Das Programm wird laufend ergänzt und bleibt damit auf dem aktuellen Stand der Modellentwicklung. Das Programm wird laufend ergänzt und bleibt damit auf dem aktuellen Stand der Modellentwicklung.

Da zur Beschreibung einer variablen inhomogenen Bewölkung sehr viel aufwendigere 3-dimensionale Modelle notwendig sind, handelt es sich bei den im folgenden beschriebenen Wolkenszenarios immer um eine geschlossene homogene Bedeckung. Diese Einschränkung ist für die hier im Blickpunkt stehende Fragestellung unproblematisch und entspricht außerdem gerade in den Polargebieten den tatsächlichen Wetterbedingungen häufig recht gut.

Im Modell wird eine homogene Wolkendecke durch ein Höhenprofil bezüglich des Gehalts an flüssigem Wasser in $[g/m^3]$ und des effektiven Tröpfchenradius in Micron parametrisiert. Daraus lassen sich die optischen Eigenschaften der Wolke nach Hu und Stamnes berechnen [HU93], deren Ansatz auf einer exakten Behandlung der Mie-Streuung in der Wolke basiert. Zusätzlich kann die optische Dicke der gesamten Wolkenschicht bei Bedarf skaliert werden.

4.1. Simulation von Spektren unter Einbeziehung gemessener Input-Parameter

Für den wolkenlosen Himmel kann der UV-Strahlungsfluß am Boden oder in beliebiger Höhe heute schon in guter Übereinstimmung mit den Meßdaten modelliert werden. Als Input für die Modellierung stehen an der NDSC-Station Ny-Ålesund zahlreiche Messungen atmosphärischer Parameter zur Verfügung: Ozon-Profile, die mittels Aufstiegen von Ozonsonden gemessen werden, Säulendichten bzw. Profile anderer Spurengase aus FTIR-Messungen (HNO_3 , NO_2 , etc.), Aerosol-Daten aus LIDAR-Messungen, Messungen der Globalstrahlung sowie Messungen der Bodenalbedo und Informationen über die Bewölkung. Abb. 17 zeigt die Einbindung eines per Ozonsonde an der NDSC-Station gemessenen Ozonprofils vom 2. Mai 1996 in die Modellatmosphäre für die

Strahlungstransfer-Rechnungen. Der 2. Mai 1996 war ein sehr klarer und wolkenloser Tag, an dem Ozonsonden-Daten vorliegen. Die Höhenauflösung der Modellatmosphäre ist dabei nicht vorgegeben sondern frei wählbar. Zusätzlich kann das Gesamttozon noch auf den genauen Meßwert skaliert werden. In Abb. 18 ist das modellierte UV-B Spektrum im Vergleich mit dem gemessenen Spektrum für den Sonnenhöchststand dieses Tage (11:12 UTC) dargestellt.

Abb. 17

Ozon Profil: NDSC-Station Ny-Ålesund, 2. Mai 1996

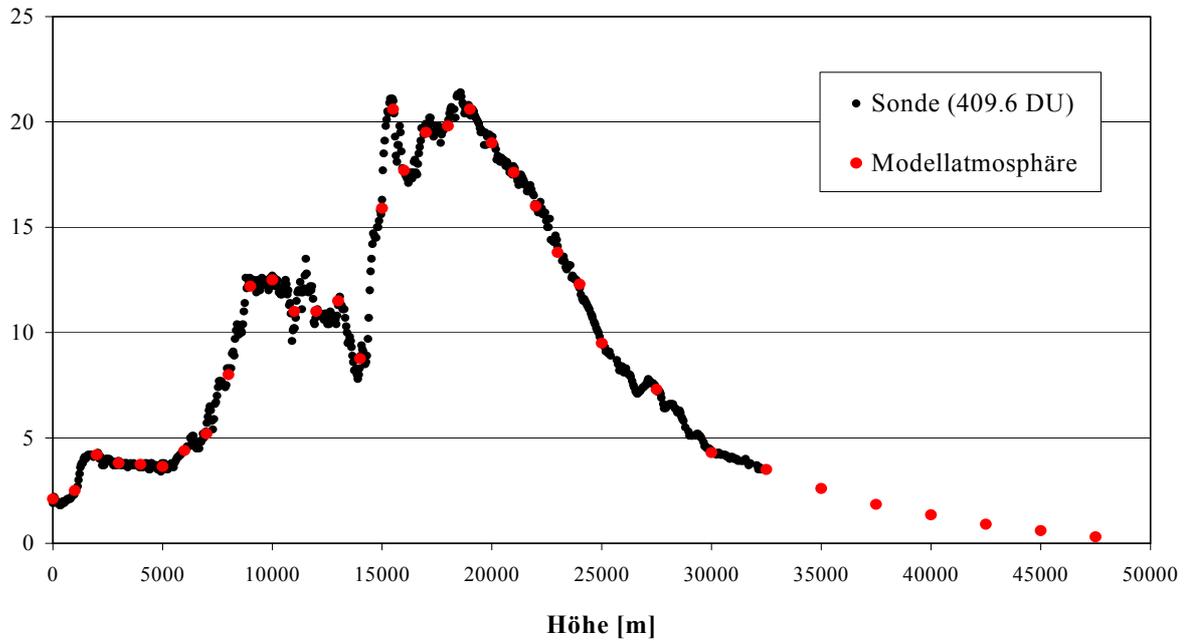
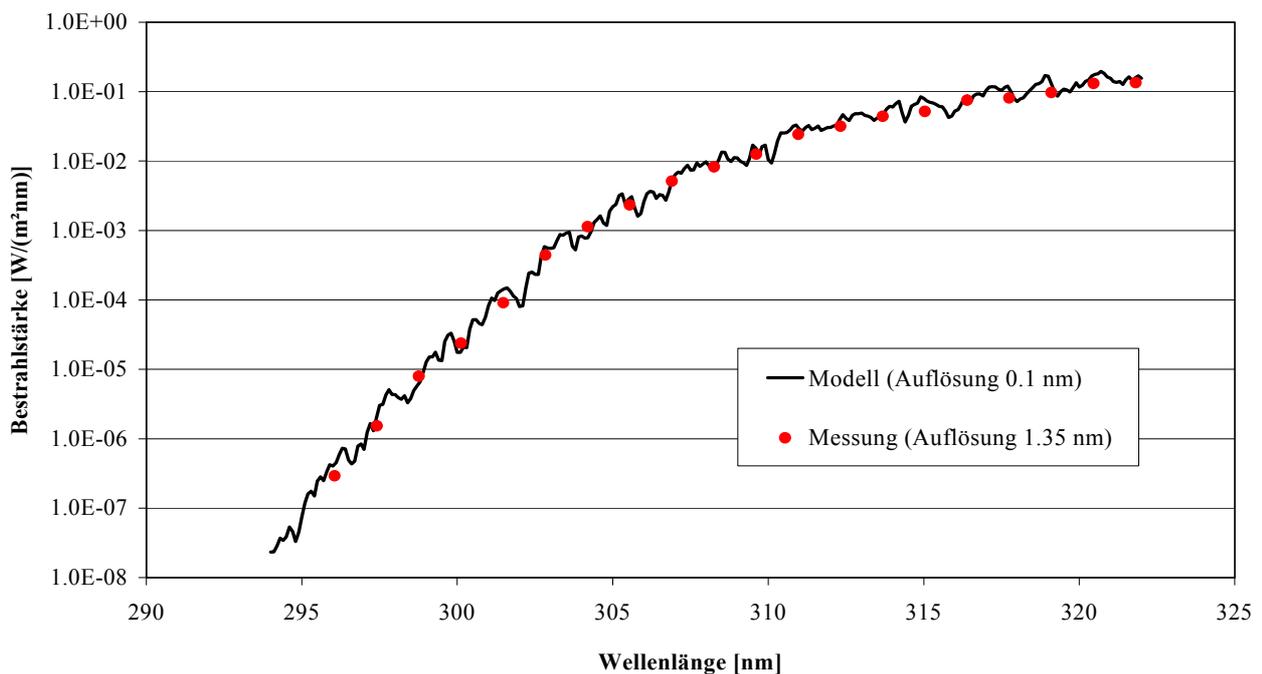


Abb. 18

Vergleich: Messung - Modellierung (Ny-Ålesund, 2.5.96, 11:12 UTC)



4.1. Der Einfluß von Albedo und Wolken auf UV-Tagesdosen

Zur Modellierung der Wechselwirkung von Bodenalbedo und Wolken im Hinblick auf den UV-Strahlungstransfer wurden verschiedene Wolkenszenarios mit der Bodenalbedo einer schneefreien (0.1) bzw. schneebedeckten (0.8) Landschaft kombiniert. Die in Abb. 19 dargestellten Spektren wurden für den jeweiligen Wert der Bodenalbedo einmal für einen wolkenlosen Himmel und einmal für eine geschlossene Wolkendecke berechnet. Bei der Wolkendecke handelt es sich um eine 1 km dicke Wolkenschicht zwischen 1 und 2 km Höhe. Der Gehalt an flüssigem Wasser wurde mit 0.3 g/m^3 und der effektive Tröpfchenradius mit 10 Micron angesetzt. Alle Rechnungen erfolgten für eine Sonnenhöhe von 25° , ein für Spitzbergen typisches Ozonprofil (siehe letzter Bericht), skaliert auf 300 DU Gesamt Ozon und schwache maritime Aerosol-Bedingungen.

Abb. 19

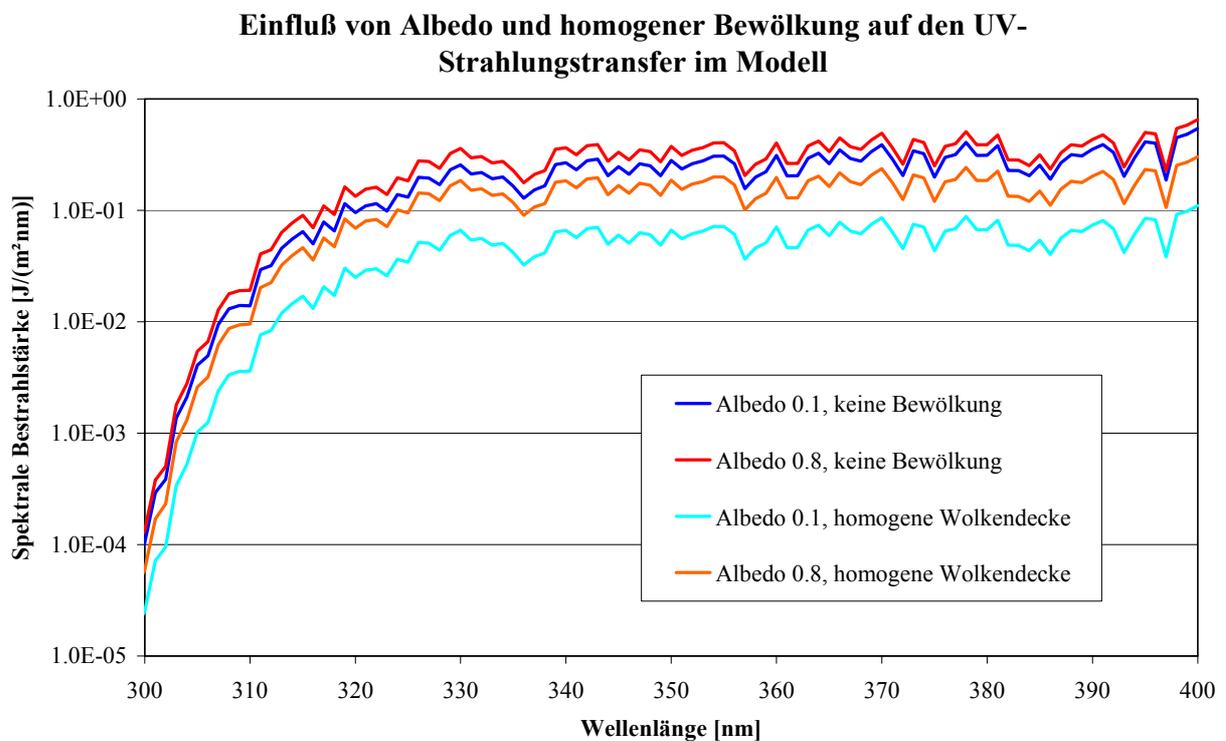
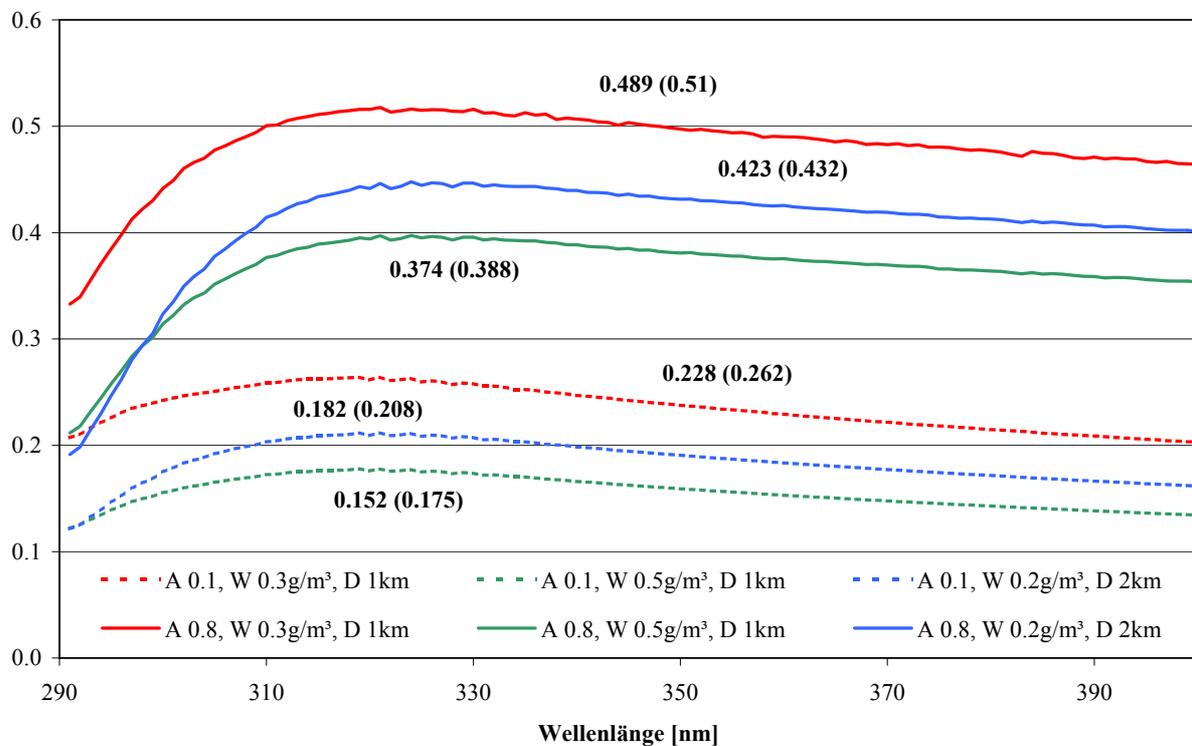


Abb. 19 macht deutlich, wie der abschwächende Einfluß der Bewölkung quantitativ durch die Bodenalbedo beeinflusst wird. Die Abschwächung der spektralen Bestrahlstärke am schneefreien Boden (Albedo 0.1) wird durch die hohe Albedo einer geschlossenen Schneedecke stark reduziert. In Abb. 20 ist die Abschwächung durch die Wolkenschicht - das Verhältnis der mit und der ohne Bewölkung berechneten spektralen Bestrahlstärke - für drei verschiedene Wolkenszenarios dargestellt. Die Wolkenschichten unterscheiden sich dabei im Gehalt an flüssigem Wasser (0.2 , 0.3 bzw. 0.5 g/m^3) und in der Dicke (1 bzw. 2 km). Die Wolkenuntergrenze liegt jeweils bei 1000 m, und die anderen Parameter (Ozon, Aerosol, Sonnenstand) sind wie bei den Rechnungen zu Abb. 19 festgelegt.

Die Form der Kurven in Abb. 20 können physikalisch durch den dominanten Einfluß der Rayleigh-Streuung oberhalb von 320 nm und die Dominanz der Ozonabsorption unterhalb von 320 nm erklärt werden [KYL97] [SEC96]. Die Abschwächung der integrierten Bestrahlstärke durch die Wolke ist bei einer Bodenalbedo von 0.1 etwas mehr als doppelt so stark wie bei einer Bodenalbedo von 0.8. Die Trennung in die Bereiche 290 - 320 nm und 320 - 400 nm zeigt sowohl für die UV-A als auch für die UV-B Strahlung das gleiche Verhalten. Dieser große durch die Albedo bedingte Unterschied im Effekt der Bewölkung liefert den Grund für die unterschiedliche Streuung der Tagesdosen in Abb. 10 und 11 bzw. Abb. 13 in Abhängigkeit von der Schneebedeckung am Meßstandort.

Abb. 20

Spektrale Bestrahlstärke am Boden: Abschwächung durch homogene Wolkenbedeckung für unterschiedliche Albedo- und Wolkenzenarios



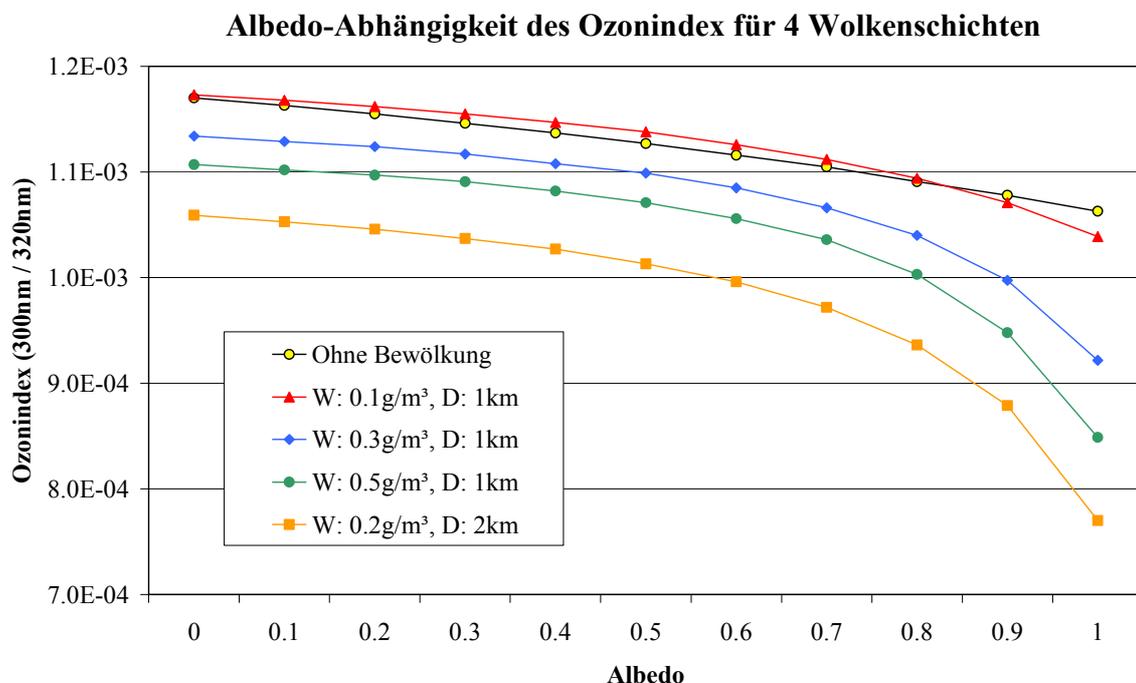
A: Albedo, W: Flüssigwasser-Gehalt der Wolke, D: Dicke der Wolkenschicht

Die Zahlen geben die Verhältnisse bewölkter / unbewölkter Fall der über den gesamten Bereich integrierten Bestrahlstärken wieder bzw. in Klammern von 290 - 320 nm. Die Ergebnisse für den Bereich von 320 - 400 nm sind quasi identisch mit dem gesamten Bereich, da der Anteil des UV-B am UV-Integral nur etwa 1% beträgt.

4.3. Der Einfluß der Bodenalbedo auf den Ozonindex bei Wolkenbedeckung

Im UV-A Bereich gilt die Ähnlichkeit des Albedo-Effekts auch für den spektralen Verlauf Bestrahlstärke, und die Wellenlängenabhängigkeit ist vergleichsweise gering. Im UV-B weicht die Form der Kurven in Abb. 20 jedoch stärker voneinander ab. Bei hoher Albedo zeigt sich unterhalb von 310 nm eine vergleichsweise starke Wellenlängenabhängigkeit des Einflusses der Bewölkung, die je nach Wolkenzenario unterschiedlich ausfällt. Dieser Unterschied ist für die Berechnung von integralen Größen wie der Tagesdosis nicht von Bedeutung, da aufgrund der steilen Absorptionskante des Ozon im Bereich unterhalb 310 nm nur noch sehr wenig Licht am Boden ankommt. Bei der Betrachtung des Ozonindex, also des Verhältnisses der spektralen Bestrahlstärken bei 300 nm und 320 nm, fällt dieses Verhalten jedoch ins Gewicht.

Abb. 21



Im vorangegangenen Zwischenbericht wurde über Rechnungen zur Abhängigkeit des Ozonindex von der Bodenalbedo im Clear-Sky Szenario berichtet. Aus den obigen Rechnungen kann nun der Einfluß der Albedo im bewölkten Fall untersucht werden. In Abb. 21 sind Modellrechnungen zum Verlauf des Ozonindex in Abhängigkeit von der Bodenalbedo für vier verschiedene Wolkenschichten sowie den wolkenlosen Himmel dargestellt (Sonnenhöhe 25°, Gesamtozon 300 DU und schwache maritime Aerosol-Bedingungen). Zum einen erkennt man eine Abnahme des Ozonindex bei zunehmender Albedo, die für höhere Albedo-Werte stärker wird. Dies gilt um so mehr, je dicker und dichter die Wolke ist. Außerdem erkennt man eine Abhängigkeit des Ozonindex von der Bewölkung. Der Grund dafür liegt im Einfluß des troposphärischen Ozons insbesondere des Ozons in und unterhalb der Wolke. Die Verlängerung des optischen Weges durch Mie-Streuung in der Wolke führt zu einer stärkeren Absorption

der kurzwelligigen Strahlung [MAY98] und damit zu einer Erniedrigung des Ozonindex. Die Quantität dieses Effekts hängt ganz wesentlich von der Konzentration des Ozons in und unterhalb der Wolke ab. Für die von anthropogener Luftverschmutzung weitgehend verschonte Troposphäre in den Polargebieten ist diese jedoch gering. So zeigt sich für die Breite der in den Rechnungen betrachteten Wolkenszenarios eine Bandbreite im Ozonindex von knapp 10% für eine Albedo von 0.1 und knapp 15% für eine Albedo von 0.8. Die Zunahme ist darauf zurückzuführen, daß in Falle hoher Albedo zusätzlich zur Verlängerung des optischen Weges durch Mie-Streuung in der Wolke noch die Verlängerung durch Reflexion zwischen Boden und Wolke kommt.

Mit diesen Rechnungen läßt sich also der Fehler in der Annahme der Wolkenunabhängigkeit des Ozonindex, der bei der Auswertung der Meßdaten in Kapitel 3 gemacht wird, abschätzen. Er liegt im schneefreien Fall bei maximal 10% und bei geschlossener Schneedecke bei maximal 15%. Dabei können die betrachteten Wolken mit einer Absorption von bis zu größer 80% (siehe Abb. 20) schon als optisch sehr dicht angesehen werden. Dickere Wolken, bei denen der Effekt stärker ausfallen würde sind sehr selten. Betrachtet man die Auswertung der UV-Messungen im Hinblick auf den Vergleich mit den TOMS-Daten, so ist diese Größenordnung für die Abhängigkeit des Ozonindex von der Bewölkung konsistent mit anderen Fehlerquellen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Durchgeführte Arbeiten gemäß den im Antrag in Aussicht gestellten Schwerpunkten

Phase A

- Kontinuierliche UV-B Messungen wurden in Ny-Ålesund am 1. Mai 1997 aufgenommen.
- Es erfolgte eine erfolgreiche Teilnahme am deutschen UV-Spektralradiometervergleich in Garmisch-Partenkirchen im August 1998. Das Meßgerät wurde im Anschluß an diesen Vergleich weiter verbessert.
- Das nicht scannende UV-Spektralradiometer des AWI kommt ohne bewegliche Teile aus und zeigt daher eine sehr gute Langzeitstabilität bzgl. der Wellenlängeneinstellung. Es traten keine Verschiebungen während der Meßperioden von ca. 7 Monaten auf. Die absolute Kalibrierung bzgl. der Bestrahlstärke erfolgte 2 mal jährlich, jeweils vor dem Auf- bzw. nach dem Abbau des Gerätes auf Spitzbergen. Alle gefundenen Abweichungen lagen unter 5%.
- Ein zweites Spektralradiometer zur Messung des UV-A Bereichs wurde gebaut und in den Jahren 1998 und 1999 in Ny-Ålesund eingesetzt. Da aufgrund des 32 kanaligen Detektors die NDSC-Spezifikationen insbesondere bzgl. der Auflösung nicht erreicht werden konnten wurde ein neuer Ansatz für die UV-A Messungen gemacht. Dabei wird als Detektor ein 256 kanaliges Photodiodenarray eingesetzt. UV-A und UV-B Gerät wurden sodann in ein gemeinsames Gehäuse integriert.
- Die gemessenen UV-Spektren wurden sowohl unter Berücksichtigung des Gesamtzons aus den Ozonsondierungen an der NDSC-Station Ny-Ålesund als auch im Vergleich mit den Satelliten Messungen von TOMS interpretiert. Über den Berichtszeitraum konnte eine Antikorrelation zwischen Gesamtzoon und UV-B am Boden nachgewiesen werden. Außerdem konnten durch den Vergleich der verschiedenen Jahre die im Gesamtzoon beobachteten Änderungen quantitativ auf den Response im UV-B übertragen werden.

Phase B

- Im März 2000 wurden die kontinuierlichen Messungen in Ny-Ålesund mit dem neu entwickelten kombinierten UV-A/B Spektralradiometer aufgenommen, welches die Anforderungen des NDSC erfüllt.
- Eine Vergleichskampagne in der Arktis ist im Berichtszeitraum nicht mehr zustande gekommen. Es wurden einige Messungen im Rahmen der ECUV Konferenz in Helsinki (1998) durchgeführt, die aber aus zeitlichen Gründen nicht mit dem FMI (Finnish Meteorology Institute) koordiniert werden konnten.
- Seit März 2000 werden die UV-Messungen mit dem kombinierten UV-A/B Spektralradiometer durchgeführt, das die NDSC Spezifikationen erfüllt. Parallel dazu wurden während des gesamten Förderungszeitraumes an der NDSC Station des AWI in Ny-Ålesund Ozonsondierungen, FTIR-Messungen von Spurengasen, Messungen von Aerosolen sowie Wolkenbeobachtungen durchgeführt.
- In prozeßaufklärungsorientierten Studien am Standort Ny-Ålesund wurde vor allem der Einfluß des Ozons, der Bewölkung und der saisonal stark variierenden Bodenalbedo auf den Strahlungsfluß am Boden untersucht.

- Die Untersuchung der dabei eine Rolle spielenden Prozesse erfolgte mit Hilfe eindimensionaler Strahlungstransferrechnungen mit dem Programm Libradtran [KYL].
- Zur Qualitätssicherung der Daten wurden drei Bausteine kombiniert. Zum einen wurde die Software zur Datenaufnahme im Laufe der drei Jahre immer weiter entwickelt. Wichtige Parameter wie die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit werden ständig überwacht und protokolliert. Zum zweiten wurde ein umfangreiches Software Paket zur Qualitätssicherung und zum Post-Processing der Daten entwickelt. Damit werden alle Spektren automatisch überprüft, bzgl. des Einflusses der Spaltfunktion des Spektrometers korrigiert und aussagekräftige Kenngrößen berechnet (z.B. Ozonindex, Wellenlängenintegrale und Tagesdosen). Zum dritten wurden auch die Modellrechnungen in die Qualitätssicherung mit einbezogen. Unter anderem zeigte der direkte Vergleich zwischen Modell und Messung in wolkenlosen Situationen eine sehr gute Übereinstimmung.

Die erzielten Ergebnisse der Arbeiten im Projektzeitraum lassen sich in die folgenden drei Bereiche einteilen:

Verbesserung der Meßtechnik

Im nationalen UV-Spektralradiometer Vergleich in Garmisch Partenkirchen (August 1997) konnte das am AWI entwickelte UV-B Spektralradiometer seine hohe Daten Qualität unter Beweis stellen. Der Einsatz eines 32-kanaligen Detektors, der erstmals die simultane Erfassung des gesamten UV-B Bereichs ermöglichte, erwies sich als gangbarer Weg in der UV-Messung. In den anschließenden drei Jahren der Projektarbeit wurde das Gerät in Auswertung der Ergebnisse der Vergleichskampagne optimiert. Auch die Meßtechnik im UV-A wurde weiterentwickelt und im letzten Schritt in das UV-B Meßgerät integriert. Damit steht seit Anfang 2000 ein kombiniertes UV-A/B Spektralradiometer mit einer sehr hohen Zeitauflösung von bis zu einem Spektrum pro Sekunde zur Verfügung, welches an die NDSC Spezifikationen angepaßt ist.

Datenaufnahme am Standort Ny-Ålesund

Im Projektzeitraum von 1997 - 2000 wurde die spektrale UV-Strahlung von 280 bis 322 nm mit einer Auflösung von 1.35 nm kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich wurde die UV-A Strahlung bis 400 nm ab März 1998 mit einer Auflösung von 2.65 nm und ab März 2000 mit einer Auflösung von 0.6 nm bis in den sichtbaren Bereich hinein bis 470 nm erfaßt. Neben den UV-Daten werden an der NDSC-Station Ny-Ålesund zahlreiche Messungen atmosphärischer Parameter durchgeführt: Ozon-Profile, die mittels Aufstiegen von Ozonsonden gemessen werden, Säulendichten bzw. Profile anderer Spurengase aus FTIR-Messungen (HNO₃, NO₂, etc.), Aerosol-Daten aus LIDAR-Messungen, Messungen der Globalstrahlung sowie Messungen der Bodenalbedo und Informationen über die Bewölkung.

Auswertung der Daten und Strahlungstransferrechnungen

Für die routinemäßige Aufbereitung der Spektren wurde im Förderzeitraum ein Software Paket entwickelt, welches die Tagesdateien der i.A. 5 Minuten Mittelwerte automatisch über einen frei wählbaren Zeitraum bearbeitet. Dies umfaßt die Qualitätskontrolle, die Entfaltung der Spektren mit der Spaltfunktion des Spektrometers und die Berechnung verschiedener

Kenngrößen vom Ozonindex über Tagesdosen bis hin zu integralen Bestrahlstärken, die mit beliebigen biologischen oder chemischen Wirkungsfunktionen gewichtet werden können. Die so aufbereiteten Daten stehen dann auch Arbeitsgruppen anderer Disziplinen zur Verfügung, um z.B. Wirkungen auf biologische Systeme [HAN00] [HER99] oder photochemische Vorgänge in der Troposphäre zu untersuchen.

Ein Schwerpunkt der Datenanalyse lag auf dem Einfluß der am Meßstandort saisonal stark variierenden Bodenalbedo im Zusammenspiel mit Wolken [GRO01]. Hier konnte in Strahlungstransfer-Rechnungen eine deutliche Zunahme des Strahlungsflusses am Boden durch Schneebedeckung gezeigt werden, die in bewölkten Situationen durch die mehrfache Reflexion zwischen Schneeoberfläche und Wolkenuntergrenze am stärksten ist. Dadurch wird der die Strahlungsintensität reduzierende Effekt von Wolken über Schnee abgeschwächt, was im Jahresgang der gemessenen Tagesdosen sichtbar wird.

Der zweite Schwerpunkt der Datenauswertung lag auf dem Zusammenhang zwischen UV-B Strahlung und Ozonsäule. Analog zum Dobson Verfahren konnte mit Hilfe des als Quotient aus der Bestrahlstärke bei 300 nm / 320 nm definierten Ozonindex die Antikorrelation zwischen Gesamtozon und kurzwelligem UV-Licht am Boden nachgewiesen werden. In den Vergleich wurden sowohl Daten von Ozonsondenaufstiegen an der NDSC-Station in Ny-Ålesund als auch die täglich zur Verfügung stehenden Satellitenmessungen von TOMS einbezogen. Aus dem Vergleich der Meßdaten der drei aufeinanderfolgenden Jahre im Förderzeitraum konnte schließlich eine quantitative Beziehung zwischen Änderungen im Gesamtozon und den dadurch bedingten Änderungen im UV-B abgeleitet werden. Im Rahmen der Weiterentwicklung der Meßgerät wurde dieser quantitative Zusammenhang in Form einer 'online' Ozonberechnung in die neue Software zur Datenaufnahme integriert. Aus jedem Spektrum wird unter Einbeziehung des Sonnenstandes (über die Parameter Uhrzeit und Ortskoordinaten) der aktuelle Ozonwert berechnet. Im Fall von schnellen Änderungen des Gesamtozons ist somit eine gezielte Untersuchung mittels Ozonsondierung an den Stationen möglich geworden.

Ausblick

Die im Rahmen dieses Projektes begonnenen Langzeitmessungen in Ny-Ålesund werden vom Alfred-Wegener-Institut weitergeführt. Angestrebt wird eine kontinuierliche Meßreihe von mindestens 10 Jahren. Der noch ausstehende Vergleich des kombinierten UV-A/B Spektralradiometers mit einem Referenz Gerät des NDSC soll im kommenden Jahr erfolgen. Ab Januar 2001 wird auch auf der deutschen Neumayer Station in der Antarktis ein neues kombiniertes UV-A/B Spektralradiometer des AWI in Betrieb genommen. Bisher erfolgten dort nur Messungen der UV-B Strahlung.

6. Teilnahme an Tagungen und Messen, Veröffentlichungen

Poster und Vorträge

- Ch. Groß et al., *A Multichannel UV-B Spectroradiometer*, Vortrag auf dem ersten Treffen des ‘Thematic Network for Ultraviolet Measurements’, 2./3. März 1998, Espoo, Finnland.
- Ch. Groß et al., *UV-Radiation Measurements at Koldewey-Station*, Vortrag auf dem NySMAC-Seminar in Ravello (Italien), 5./6. März 1998.
- H. Tüg et al., *UV-B Radiation Measurements over Northern and Southern Atlantic*, Posterpräsentation auf der Tagung der European Physical Society in Nizza, 20. – 24. April 1998.
- Ch. Groß et al., *UV-B Messungen auf der NDSC-Station in Ny-Ålesund (Spitsbergen)*, Posterpräsentation auf dem OFP-Statusseminar, 23./24. Juni 1998, Bonn
- European Conference on Atmospheric UV-Radiation, 29. 6. bis 2.7. 1998, Helsinki.
Vortrag: *Spectral resolved UV-B measurements at the NDSC-Station Ny-Ålesund and comparison with ozone sonde data*. Ch. Groß et al.
Poster: *UV-B measurements along a meridional transect from the northern to the southern hemisphere*. Ch. Groß et al.
Poster: *Design, construction and testing of a multichannel UV-B spectroradiometer with high time-resolution*. Ch. Groß et al.
- Ch. Groß et al., *UV-B Spektralradiometrie in den Polargebieten*, Posterpräsentation auf der Deutschen Meteorologen Tagung, 14.-18. September 1998, Leipzig.
- DPG Frühjahrstagung, 15. - 19. März 1999, Heidelberg, Poster: *UV Spektralradiometrie in den Polargebieten*, Ch. Groß, H. Tüg, T. Hanken und O. Schrems
- EGS XXIV General Assembly, 19. – 23. April 1999, Den Haag, Poster: *UV Radiative Transfer at the NDSC-Station Ny-Ålesund (Spitsbergen): Spectral resolved Measurements and Model Calculations*, Ch. Groß, H. Tüg, und O. Schrems
- EASIZ Meeting, Juli 1999, Bremerhaven, Poster: *Solar Ultraviolet Radiation on Growth and Mycosporine-Like Amino Acids Content of the Antarctic Diatom Thalassiosira sp.*, M. Hernando, J.I. Carreto, M.O. Carginan, G. Ferreyra und Ch. Groß
- 3. Meeting UV-Network, Teddington, 8. - 10. September 1999, Poster: *Simulation of Solar UV Radiation at Ground for Biological Effects on the Marine Ecosystem*, H. Tüg und Ch. Groß
- Vortrag am Instituto Antartico Argentino, 15.10.99, *Trend measurements for investigation of causes and consequences of increasing UV irradiation in high latitudes*, Ch. Groß
- Second International Symposium on Environmental Research in the Arctic and Fith Ny-Ålesund Scientific Seminar, NIPR Tokyo, 23. - 25. Februar 2000, Vortrag: *Three Years Spectral Resolved UV Measurements at Koldewey-Station*, Ch. Groß et al.
- DPG-Frühjahrstagung Bremen, 21. - 24. März 2000, Poster: *Drei Jahre spektrale UV-B Messungen an der deutschen Antarktisstation*, Ch. Groß et al.
- EGS XXV General Assembly, Nice, 24. - 29. April 2000, Vortrag: *3 Years spectral resolved UV-B Measurements in the Arctic and Antarctic (1997 - 1999)*, Ch. Groß et al.

- Western Pacific Geophysics Meeting, June 27-30, 2000, Tokyo. Poster: *Spectral UV-B Measurements at NDSC Sites in the Arctic (Ny-Ålesund) and Antarctica (Neumayer Station)*, Groß, Ch., Tüg, H. and Schrems, O.
- Quadrennial Ozone Symposium, July 3-8, 2000, Sapporo (Japan). Poster: *UV-B Radiative Transfer and Total Ozone*. Groß, Ch., Tüg, H. and Schrems, O.
- 4. Meeting UV-Network, Borås (Schweden), 8. - 10. September 1999, Poster: *A multi-channel UV-A/B spectroradiometer with high time resolution*, Ch. Groß, T. Hanken, H. Tüg und O. Schrems.
- EGS XXVI General Assembly, Nice, 25. - 30. March 2001, Poster: *A multichannel UV-A/B Spectroradiometer with high time resolution*, Ch. Groß, H. Tüg and O. Schrems, Vortrag: *Satellite estimation of surface UV flux in the presence of clouds over snow covered areas*, Coldewey, M., Weber, M., Rozanov, V.V., Burrows, J.P., Groß, C., and Schrems, O.

Veröffentlichungen

- Ch. Groß et al., *UV-Radiation Measurements at Koldewey-Station*, Extended Abstract erschienen in: *The Arctic And Global Change*, Multidisciplinary approach and international efforts at Ny-Ålesund, Svalbard. Proceedings from the Fourth Ny-Ålesund Seminar, Ravello, Italy, 5-6 March 1998.
- Ch. Groß, Beitrag in G. Seckmeyer et al., *The 1997 Status of Solar UV Spectroradiometry in Germany: Results from the National Intercomparison of UV Spectroradiometers*, Schriftenreihe des Fraunhofer Instituts für Atmosphärische Umweltforschung, Garmisch-Partenkirchen, 1998, S. 146 - 149.
- Hanelt D., Tüg H., Bischof K., Groß C., Lippert H., Sawall T., Karsten U., and Wiencke C., *Light regime in an Arctic fjord: a baseline study related to algal growth and stratospheric ozone depletion*, submitted to Journal of Marine Systems.
- V. Dethlefsen, H. von Westernhagen, H. Tüg, P.D. Hansen, and H. Dizer, *Influence of Solar UV-B on Pelagic Fish Embryos: Osmolarity, Mortality and Viable Hatch*, Helgoland Marine Research, accepted.
- Hernando M., Carreto J.I., Carginan M.O., Ferreyra G.A. and, Groß C., *Effects of solar radiation on growth and mycosporine-like amino acids content in an Antarctic diatom*, submitted to Polar Biology 1999, accepted.
- Groß, C., Tüg, H. and Schrems, O., *Spectral UV-B Measurements at NDSC Sites in the Arctic (Ny-Ålesund) and Antarctica (Neumayer Station)*, Eos. Trans. AGU, **81** (22), Western Pacific Geophysics Meet. Suppl., A31A-08, 2000.
- Groß C. , Tüg, H., and Schrems O., *Three years spectral resolved UV-Measurements at Koldewey Station (1997 - 1999)*, Memoirs of National Institute of Polar Research, Spec. Issue, **54**, 2001, in press.

- Groß, C., Krins, A., and Seidlitz, H.K., *Transmittance of UV filters used in solar radiation simulators*, UV NEWS, The official newsletter of the Thematic Network for Ultraviolet Measurements, Issue 6, November 2000, Seite BA-3 f.

Literatur

- [DEG98] Degünther, M., Meerkötter, R., Abold, A. and Seckmeyer G. (1998): *Case study on the influence of inhomogeneous surface albedo on UV irradiance*. Geophys. Res. Lett. **25**, 3587-3590
- [GRO01] Groß C., Tüg, H., and Schrems O., *Three years spectral resolved UV-Measurements at Koldewey Station (1997 - 1999)*, Memoirs of National Institute of Polar Research, Spec. Issue, **54**, 2001, in press.
- [HAN00] Hanelt D., Tüg H., Bischof K., Groß C., Lippert H., Sawall T., Karsten U., and Wiencke C., *Light regime in an Arctic fjord: a baseline study related to algal growth and stratospheric ozone depletion*, submitted to Journal of Marine Systems.
- [HER99] Hernando M., Carreto J.I., Carginan M.O., Ferreyra G.A. and, Groß C., *Effects of solar radiation on growth and mycosporine-like amino acids content in an Antarctic diatom*, submitted to Polar Biology 1999, accepted.
- [HU93] Y.X. Hu, and K. Stamnes, *An accurate parametrization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models*, J. Climate **6**, S. 728 (1993)
- [KOE97] König-Langlo, G. and Marx, B., (1997): *The Meteorological Information System at the Alfred Wegener Institute*. In: Climate and Environmental Database Systems by Lautenschläger, M. and Reinke, M. Published by Kluwer Academic Publisher, USA, Norwell
- [KYL] A. Kylling, *Libradtran, a program for calculation of diffuse and direct UV and visible fluxes and intensities at any altitude*.
- [KYL97] A. Kylling, A. Abold, and G. Seckmeyer, *Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range: Physical interpretation*, Geophys. Res. Lett. **24**, No. 4, S. 397 (1997)
- [LAN99] J. Langer, *Measurements of Arctic stratospheric ozone: Comparison of ozone-measurements at Ny-Ålesund, Spitsbergen, in 1997 and 1998*. Ber. Polarforsch., **322**, ISSN 0176 - 5027, S. 197 f. (1999).
- [MAY98] B. Mayer, A. Kylling, S. Madronich, and G. Seckmeyer, *Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: Experimental evidence and theoretical explanation*, J. Geophys. Res. **103**, No. D23, S. 31241(1998)

- [REN00] A. Renaud, J. Staehlin, C. Fröhlich, R. Philipona, and A. Heimo, *Influence of snow and clouds on erythemal UV radiation: Analysis of Swiss measurements and comparison with models*. J. Geophys. Res., **D105**, 4961-4969.
- [SEC96] G. Seckmeyer, R. Erb, and A. Abold, *Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range*, Geophys. Res. Lett. **23**, No. 20, S. 2753 (1996)
- [SEC98] G. Seckmeyer, B. Mayer, and G. Bernhard, *The 1997 Status of Solar UV spectroradiometry in Germany: Results from the National Intercomparison of Spectroradiometers, Garmisch-Partenkirchen, August 1997*. Shaker Verlag, Aachen, Germany.
- [SHE89] Shettle, E.P., Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies. AGARD Conference Proceedings No. 454.
- [STA88] Stamnes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W. and Jayaweera, K., *Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media*. Applied Optics, **27**, 2502-2509, (1988).

Anhang A

Reprint des AWI-Beitrags zum Bericht des UV-Spektralradiometervergleichs in Garmisch-Partenkirchen (aus [SEC98])

Instrumental requirements

The development of our spectrophotometric system was initiated by special demands concerning the research in polar regions. Due to the seasonally occurring ozone depletion in Antarctica and more recently also in the Arctic, these regions became of increasing interest concerning harmful UVB irradiance on organisms in the water column (e.g. phytoplankton, macroalgae) and causal connections between irradiation at the ground and atmospheric parameters like ozone, aerosols, clouds and trace gases.

Therefore a suitable spectroradiometric system was needed for operation under unfavourable climatic and logistic conditions in high latitudes. Two versions were needed: One for atmospheric research under field conditions and one in a pressure housing to operate in the water column down to 100 m. The main requirements for such an instrument were:

- Insensitivity towards rough transportation and handling in connection with ship expeditions and under-water measurements.
- Compact design and easy handling.
- Full temperature stabilization and waterproofness.
- Stability up to one year without calibration and other maintenance work due to the lack of laboratory equipment and trained personnel.
- Fast measurements and data collection to get the whole spectrum under rapidly changing cloud conditions and in wavy sea water.
- High data quality for trend measurements relating to the NDSC specifications.

Technical solutions

As a commercial scanning spectroradiometer could not fulfill these requirements, we developed a non-scanning multi-channel device to measure the whole UVB range simultaneously.

The monochromator is based on a Bentham DM 150 with 1200 l/mm gratings and an 8 mm center slit to pass the whole UVB range of 40 nm. As the gratings need not to be turned during operation like in scanning spectrometers, the system is of long-term wavelength stability. No mechanical or optical part is moved during a whole observing period.

The detector is based on a two-stage microchannel plate photomultiplier tube (MCP-PMT) operating in a single photon counting mode. With a quantum efficiency of about 20% an incoming photon creates an electron at the photocathode, which is multiplied in the micro channels by a voltage of about 2200 V. The occurring electron cloud hits one of the 32 anodes corresponding to the position on which the photoelectron was created at the photocathode. Each anode has its own charge amplifier, discriminator and counter. Poisson statistic applied to the single photon detection of the spectrum is of advantage for low light level at the short wavelength end while dead-time correction is needed for high light levels around 320 nm due to the pulse-width. Dark-current is about 0.2 cts/s per channel and a magnitude lower than for a cooled blue-sensitive photomultiplier.

A complete UVB spectrum is registered each second. During continuous field operation normally spectra over 5 minutes are integrated or averaged. The complete system including power supply, high voltage unit, measurement of temperature and humidity, heater and cooling unit is placed in a waterproof and HF-shielded housing of 62 x 52 x 48 cm³ in size.

Discussion of results of instrument I

At the intercomparison instrument I was the only non-scanning system. Unfortunately the second self-developed instrument C, which combined serial and parallel mode by using a diode array, could not participate due to technical problems. The intercomparison between a single-channel scanner and a static multi-channel device is not straightforward, especially under fast varying atmospheric conditions like clouds or high airmass. Scanner measure different wavelengths at different times, while a multi-channel system measures the whole spectrum at the same time.

Synchronization To avoid large errors at the intercomparison due to synchronization problems between both instrumental systems we had to make significant changes in our software for the data acquisition and data reduction. During the first three blind days it was arranged to measure the UV range between 285 and 410 nm in 17 minutes to get each 10 nm interval in 80 seconds. Using our complete spectrum, which is measured each second to pick out only one adequate channel would mean to give up one of the main advantages of our system to get a synchronization, which even in this case would not give a perfect time fit to the scanning systems.

In view of the majority of scanners we had to find a compromise: A complete spectrum was taken in the normal operation mode averaged each 80 seconds to pick out the corresponding 10 nm interval measured by the scanners during the same time, so that the agreement in time was $\Gamma 40$ s. This confined precision of temporal agreement becomes obvious in Fig. 48. For periods with broken clouds (see Fig. 1) the ratio between our instrument and instrument B looks rather noisy compared to the morning of August 7, when the sky was cloudless. This means, that a significant part of the *noise* in the comparison is an artefact due to different instrumental systems.

Slitfunction The physical understanding of the slitfunction for our multichannel spectrometer differs from the one of a scanning system. The reason is, that the shape of the

function is influenced by common straylight *and* crosstalk between neighbored channels. There is also a small gap of 50 μm between the 450 μm wide anodes of the array, which means, that about 10% of the spectrum keeps undetected. For these reasons the algorithms used for the scanners in the intercomparison cannot simply be applied to the array spectroradiometer.

The effects of straylight and crosstalk can be separated and measured. In a first step a laser line is adjusted to one detector channel. The signal of all other 31 channels then is due to the combination of straylight and crosstalk and gives the *slitfunction* due to both effects. In a second step an adjustable small center slit is used as in the scanning double monochromator, which cuts down the straylight but keeps the crosstalk almost unaffected. The increased amount of straylight due to the 8 mm center slit is acceptable, because the dynamic range of the solar spectrum is cut down with a filter by about three magnitudes. With knowledge of the *slitfunction* of both effects we were able to correct our spectra. Unfortunately a red HeNe laser must be used for this procedure because a UV-laser was not available. As a consequence, the grating position had to be changed while the linear dispersion in the red differs slightly from that in the UV. When using a HeCd laser during the intercomparison with keeping all adjustments unchanged, it turned out, that our results were overcorrected below 297 nm. At low sun elevation there is no deviation down to 10^{-3} mW, but at noon deviation occurs at 10^{-1} mW, which is almost the irradiance at 297 nm for high sun elevation. Using the correct laser measurement with the HeCd laser from IFU, the overcorrection below 297 nm disappears. As a consequence we ordered a HeCd laser.

Wavelength accuracy, wavelength stability Wavelength scale adjustment and stability are checked with the mercury line 296.73 nm placed to the anode gap between channel 12 and 13, so that both channels show exactly the same signal level. The uncertainty is about 0.01 nm and lower than given by one mechanical step when using the scanning mode of the same spectroradiometer. With a resolution of 1.35 nm the 450 μm wide anode itself would give a much lower wavelength accuracy compared to the 50 μm wide gap. The dispersion function is measured in a similar procedure using additional lines. Wavelength stability is not a serious problem compared with scanning spectroradiometers, because no mechanical part is moved during the whole observing run. Stability checks of the wavelength scale can be done at any time with a mercury light on top of the input optics. The housing of the spectroradiometer is completely closed, stabilized to 1°C while the relative humidity is kept down below 10% with P_2O_5 as a drying agent.

Missing UV-A data

Initially common interest was focused on the UVB range from 280 to 320 nm relating to the ozone depletion. But for a better understanding of radiation transfer processes with regard to aerosols, the UVA range also became important and was included into the specifications as a standard for the measurement of atmospheric UV. For a scanning spectroradiometer this wavelength extension can easily be realised by varying in input parameters. But for our array spectrometer optics and detector were fixed to the UVB range of about 40 nm considering the number of 32 channels and required spectral resolution.

In view of the intercomparison we modified a second UVB instrument by changing the gratings (600 instead of 1200 l/mm) and adjusting the grating position to cover the range 320 to 400 nm with about 3 nm resolution keeping everything else unchanged. Unfortunately we run out of time and made an error in the calibration procedure. During the campaign it turned out, that the overlapping range for both instruments from 320 to 323 nm did not agree. Therefore we cancelled our UVA data. The error could be eliminated in the meantime, so that both instruments agree within 1% in the overlapping region.

Anhang B

Abstracts von Tagungsbeiträgen

European Conference on Atmospheric UV-Radiation, 29.6. - 2.7. 1998, Helsinki

UV-B MEASUREMENTS ALONG A MERIDIONAL CUT FROM THE NORTHERN TO THE SOUTHERN HEMISPHERE

Groß Ch., Tüg H., Hanken T., Seiler T., and Schrems O.

A new developed non-scanning multichannel UV-B spectroradiometer [1], which is installed at Koldewey-Station (Spitsbergen) [2] and at Neumayer-Station (Antarctica), was also boarded on expeditions with the research vessel 'Polarstern'. The crossing from Bremerhaven to Cape Town in September / October 1997 (ANT XV/1) was additionally equipped with daily ozone sonde launches. Besides the spectral resolved measurements, health related erythema weighted UV dose measurements with the ELUV 14 dosimeter were also performed on this crossing [3]. The dosimeters were calibrated with the spectroradiometer data at a clear sky day. Therefore the spectra were weighted with the ELUV 14 response function, and integrated over wavelength and time. The comparison shows a very good stability of the measurements over the day, and under all weather conditions.

The global spectral data were collected the whole day averaged over five minutes. In the morning and at noon one spectrum was measured concerning only irradiance close to the zenith. Beside the doses the ozone-index called ratio between irradiation at 300 nm and 320 nm was used for comparison with the daily ozone sonde data. The interpretation of the spectra in relation to ozone is aided by modelling calculations using the program uvspec. Uvspec is a program for calculation of diffuse as well as direct UV and visible fluxes and intensities at any altitude [4].

[1] Ch. Groß et al., 'A multichannel UV-B spectroradiometer', poster presentation at this conference.

[2] Ch. Groß et al., 'Spectral resolved UV-B measurements at Koldewey-Station in comparison with ozone sonde data', oral presentation at this conference.

[3] S. El Naggar et al., 'An electronic personal dosimeter (ELUV-14) for outdoor UV-B dosimetry ', poster presentation at this conference.

[4] A. Kylling, program uvspec is available via anonymous ftp to ftp.geofysikk.uio.no, cd pub/outgoing/arveky

European Conference on Atmospheric UV-Radiation, 29.6. - 2.7. 1998, Helsinki

A VERY FAST AND ROBUST MULTICHANNEL UV-B SPECTRORADIOMETER

Groß Ch., Tüg H., and Hanken T.

One of the major objects of UV measurements is to detect long-term trends in UV irradiance. The most interesting areas corresponding to ozone depletion are Antarctica and of course the region around the northern pole. Long-term field measurements under these extreme climatical and logistical conditions could not be realized simply by using a commercial spectrophotometric laboratory system. It seemed to be necessary to develop a specialized instrument for this intended use. One of the most important features of the instrument should be a stable operation in field for a period of about one year, without intensive manpower for service necessary. Furthermore it should be preferably insensitive towards rough transport, unfavorable weather conditions, and motion during operation, e.g. on ship or under water. Latter because we were interested not only in atmospheric UV-B measurements but also in the irradiation under water.

For this purpose we built a non-scanning spectroradiometer based on a Bentham DM 150 double monochromator with a multichannel detector system. We run our double monochromator with a comparatively broad center slit to enable the detection of the whole UV-B range at a time. Therefore we use a multichannel detector to detect the spectrum at 32 wavelengths simultaneously. The detector is based on a low-resistance microchannel-plate photomultiplier tube with 32 channels working in a single photon counting mode. In consequence of the fixed gratings, our spectroradiometer is less sensitive toward transport by ship and plane, and shows a better wavelength stability as scanning systems. The latter means, that there is no further calibration necessary for about one year.

Because we get the whole UV-B spectrum at one time, we can also measure under rapidly changing clouds. Particularly this is important for comparison of the spectra to model calculations of the radiative transfer including cloud processes. In addition we built a version of the instrument in a pressure-stabilized housing for under water measurements of UV-B irradiation concerning biological questions.

Since march 1996 the system is installed in Ny-Ålesund (Spitsbergen) [1], at Neumayer-Station Antarctica), and on the institutes research vessel 'Polarstern' [2]. In August '97 the instrument participated in the german spectroradiometer intercomparison IC97 in Garmisch-Partenkirchen.

[1] Ch. Groß et al., 'Spectral resolved UV-B measurements at Koldewey-Station in comparison with ozone sonde data', oral presentation at this conference.

[2] Ch. Groß et al., 'UV-B measurements along a meridional cut from the northern to the southern hemisphere', poster presentation at this conference.

European Conference on Atmospheric UV-Radiation, 29.6. - 2.7. 1998, Helsinki

SPECTRAL RESOLVED UV-B RADIATION MEASUREMENTS AT KOLDEWEY-STATION IN COMPARISON WITH OZONE SONDE DATA

Groß Ch., Tüg H., Hanken T., and Schrems O.

For different questions in polar research, we developed a non-scanning system for spectral resolved measurements in the UV-B range [1]. Since march 1996 our multichannel UV-B spectroradiometer (280 nm - 323 nm) is installed at Koldewey-Station (Ny-Ålesund, Spitsbergen) and at Neumayer-Station (Antarctica) as well as used on expeditions with the institutes research vessel 'Polarstern' [2]. Installation at Koldewey-Station means the instrument is built up in early polar spring (beginning of march), and brought back to our laboratory for recalibration after final sunset (late October). Besides the collection of UV-B data, we perform regularly ozone sonde launches to get the vertical ozone distribution.

Now we are able for the first time, to present comparable measurements of UV-B irradiation and ozone sonde launches at Koldewey-Station for two years. To extract the influence of ozone on the UV-B irradiation at ground level, one needs to eliminate the effects of clouds and other atmospheric parameters. For this we use the ratio of the wavelength pair 300 nm / 20 nm of the global irradiation. This is owing to the fact that irradiation at 300 nm is strongly and irradiation at 320 nm is only slightly effected by ozone. This ratio is called ozone-index in he following. Because of the weak wavelength dependence of aerosol and cloud effects in the considered wavelength range, the ozone-index is suitable to describe the influence of the total zone on the UV-B spectrum. The effects of changing sun elevation during one day and during he year, are considered by airmass correction of the ozone-index. The comparison of the airmass corrected ozone-index and the total ozone amount shows the correlation between ozone variation and UV-B response.

For further research, especially evaluation of the effects of aerosol, we built a modified version of the spectroradiometer to measure in the UV-A range (320 nm to 400 nm). The UV-A device is additionally installed at Koldewey since march 1998 to get the spectra over the total UV range.

- [1] Ch. Groß et al., 'A multichannel UV-B spectroradiometer', poster presentation at this conference.
- [2] Ch. Groß et al., 'UV-B measurements along a meridional cut from the northern to the southern hemisphere', poster presentation at this conference.

**3rd Meeting of the Thematic Network for Ultraviolet Measurements, Teddington,
8. - 10. September 1999,**

**SIMULATION OF SOLAR UV RADIATION AT GROUND FOR BIOLOGICAL
EFFECTS ON THE MARINE ECOSYSTEM**

H. Tüg and Ch. Groß

Penetration of the harmful UV irradiation in the earth's atmosphere is mainly inhibited by the ozone layer. At wavelengths below 315nm (UVB: 280 - 315nm) absorption of the ozone increases so steep, that one speaks about an edge in the spectrum. Due to the fact, that for millions of years the share of the UVB in the sun's irradiation on ground is only about 1%, organisms are not adapted to higher values in the UV-B range by evolution. The ozone depletion observed in the last decades leads inevitably to a shift in the cut-off edge of the spectrum. Therefore certain effort is undertaken to estimate the possible damages of flora, fauna, and man.

Research in field is restricted by changing atmospheric conditions like sun elevation, clouds, aerosol etc. For research on the marine ecosystem additionally the water column with changing optical properties plays an important role. Therefore we developed an instrument to simulate the sun's irradiation at ground including variable impact from clouds, Aerosol, Ozone, water column etc in the laboratory.

As light source we use a 400W metallogen lamp, the spectrum of which is adapted to the solar spectrum by adding some rare earth elements. The light of this lamp first passes a wavelengths independent absorber to simulate clouds. Behind it passes 3 liquid filters and a diffuser. These filters are of variable thickness and they contain solutions of copper sulfate, potassium nitrate, and potassium chromate. Due to the different absorption characteristics it's possible to simulate most natural irradiation situations by combination of varying concentrations of the solutions and thickness of the filter layers. Especially the copper sulfate is very suitable to simulate the cut-off edge of the solar spectrum by ozone absorption. For calibration the simulator's irradiance is measured with a spectroradiometer and compared with the sun's spectrum at well known atmospheric conditions.

With this instrument it's possible to make experiments under stable conditions for any period of time necessary and to change all parameters independently like ozone, clouds, aerosol or depth in water. The solar radiation simulator is used for research on phytoplankton, macroalgae and fish eggs.

Quadrennial Ozone Symposium 3. - 8. July 2000, Sapporo (Japan)

UV-B RADIATIVE TRANSFER AND TOTAL OZONE. THREE YEARS SPECTRAL RESOLVED MEASUREMENTS IN THE ARCTIC AND ANTARCTIC

For long-term field measurements in polar regions we built a non-scanning UV-B spectroradiometer. The instrument is based on a Bentham DM 150 double monochromator with a multichannel detector system. As detector we use a low-resistance microchannel plate photomultiplier tube with 32 channels working in a photon counting mode. By this we can record the whole spectral range of the instrument (280 - 322nm) every second. This high time resolution leads to the possibility to measure even under fast changing atmospheric conditions (inhomogeneous clouds). Since 1997 continuously spectral resolved UV-B spectra are recorded at Neumayer-Station (Antarctica, 70.65° S, 8.25° W) and at the NDSC-Station Ny-Ålesund (Spitsbergen, 78.9° N, 11.9° E). Beside the UV measurements ozone sonde soundings are performed on both stations at least once a week.

Due to the differences in the stability of the northern and southern polar vortex ozone depletion in spring is found only in some years at Spitsbergen but every year at Neumayer-Station. UV-B data are evaluated in consideration of total ozone data from ozone sonde soundings and TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) satellite data. To suppress the dominating influence of cloud variations on the UV radiative transfer, the ozone-index called ratio of the irradiation at two wavelengths (300nm / 320nm) is used. In consideration of the daily available TOMS data the expected anticorrelation of the ozone-index and the total ozone could be verified. For the observation period the comparison of changes in the ozone-index and total ozone for different years leads to a quantitative relation between the two measurands, the radiation amplification factor of total ozone.

Beside ozone, there is a distinctive seasonal variation in ground albedo and cloud cover at Spitsbergen, which is not found at Neumayer-Station. These parameters are determinative for UV Flux at ground. Comparison of both datasets regarding these points and analysis based on radiative transfer modelling will be presented.

4th Meeting of the Thematic Network for Ultraviolet Measurements, Borås (Schweden), 8. - 10. September 1999

A MULTICHANNEL UV-A/B SPECTRORADIOMETER WITH HIGH TIME RESOLUTION

Ch. Groß, T. Hanken, H. Tüg und O. Schrems.

One of the main objectives of UV measurements is to detect long-term trends in UV irradiance. The most interesting areas corresponding to ozone depletion are Antarctica and the region around the northern pole. For long-term field measurements of UV spectral irradiance under these extreme climatic and logistical conditions a specialised spectroradiometer was designed at the Alfred Wegener Institute. One of the most important features of the instrument is stable operation in field for a period of about one year without intensive manpower for service necessary.

For this purpose it was a reasonable approach to handle the technical challenging wavelength range between 290 and 320 nm and the longer wavelengths up to 400 nm separately. The solution below 320 nm was described on the poster presented at the first UV-Net Workshop in Helsinki 1998. It based on a Bentham DM 150 double monochromator with a low-resistance microchannel plate with 32 detection channels working in a photon counting mode. Using now an - in comparison to the instrument presented in 1998 - different grating, increased the resolution to 1 nm by increasing the lower wavelength limit from 280 to 290 nm.

The more recently developed UV-A device manages with a single monochromator in respect to the comparatively flat spectrum above 320 nm. As detector a photodiode array with 256 detection channels is used to enable a higher spectral resolution.

Both devices are integrated in one weatherproof and temperature stabilised housing with two independent entrance optics, each basing on a teflon cosine diffuser covered with a quartz dome. The software was completely new designed and works now under Windows 95/98 and NT providing several new features like integrals over wavelength or daily doses.

In consequence of the fixed gratings, our spectrometer is less sensitive towards transport by ship and plane. Due to the high time resolution up to 1 spectrum per second the instrument is suitable to measure under fast changing inhomogeneous cloud conditions. Particularly this is important in comparison of the spectra to 3d model calculations of the radiative transfer including cloud processes.

Since march 2000 the new combined UV-B/A system is installed on the NDSC-Station in Ny-Ålesund. The upgrade of the 'only UV-B measuring' instrument at Neumayer Station (Antarctica) is planned to be done in January 2001.

Anhang C

Preprint der Veröffentlichung 'Three years spectral resolved UV-Measurements at Koldewey Station (1997 - 1999)', Memoirs of National Institute of Polar Research, Spec. Issue, 54, 113-123, 2001

Three years spectral resolved UV-Measurements at Koldewey-Station
(1997 - 1999)

Christian Groß, Helmut Tüg, and Otto Schrems

Alfred Wegener Institute
Columbusstraße, 27568 Bremerhaven,
Germany

Abstract

In May 1997 long-term measurements of spectral resolved UV-B irradiation (wavelength range of the instrument 280 to 322 nm) at the NDSC-Station in Ny-Ålesund (Spitsbergen) were started using a self-developed very fast multichannel spectroradiometer. In March 1998 a multichannel UV-A spectroradiometer was installed at Ny-Ålesund to supplement the spectral range of the measurements from 318 to 400 nm. For the evaluation of the data with regard to changes in total ozone the ratio of the measured irradiation at two wavelengths (300 nm / 320 nm) has been used to minimize the influence of other atmospheric parameters like clouds or aerosols. This ratio, called ozone index, is compared with ozone sonde data as well as daily TOMS data of total ozone. This comparison shows a good anticorrelation between the irradiation at short wavelengths and total ozone. Apart from ozone, influences of clouds and varying ground albedo have been investigated. The evaluation of the UV-B Data has been supported by radiative transfer modeling.

1. Introduction

Since the discovery of the Antarctic ozone hole first noted by Chubachi (1984) and Farman et al. (1985), and more recently the seasonal ozone depletion in the northern high latitudes reported for example by Müller et al. (1997) and Rex et al. (1997), there is a strong interest in the changes of stratospheric ozone. A direct effect of ozone depletion is the increasing UV-B radiation reaching the Earth's surface. Comparison of UV data with total ozone were recently presented for mid latitude sites by Casale et al. (2000) or Krzyśin (2000). The scattering of UV-B radiation by aerosols and clouds plays also an important and complex role. A change in UV climate may possibly be detrimental to the biosphere (e.g. to marine life in the upper layers of the sea or to terrestrial vegetation) and to human (e.g. skin cancer).

One of the main objectives of UV measurements is the observation of long-term trends in UV irradiance. Among the most interesting geographical regions to study the changes in UV radiation are Antarctica and the Arctic due to the strong ozone depletion observed in the polar regions. Since 1997 the Alfred-Wegener-Institute records continuously UV-B in Antarctica (at the German Neumayer-Station and at the Argentinean Station Jubany on King George Island) as well as on Spitsbergen (NDSC-Station Ny-Ålesund).

2. The UV Spectroradiometers

For the best long-term stability of the instrument in remote areas like Spitsbergen it is advantageous to avoid any movable parts like rotatable gratings as essential in scanning spectroradiometric systems. For this reason we have designed a non-scanning spectroradiometer which is based on a Bentham DM 150 double monochromator with a multichannel detector system. The DM 150 is operated with a comparatively broad center slit to allow the simultaneous detection of the whole UV-B range at 32 wavelengths. A low-resistance microchannel plate photomultiplier tube (MCP-PMT) with 32 channels working in single photon counting mode is used as detector. Due to the fixed gratings, our spectroradiometer is less sensitive towards transport by ship or aircraft, and it does not require recalibration during the Arctic campaigns from March until October.

The spectral global irradiance is measured with a teflon cosine diffuser. However, the data presented in this work are not cosine corrected. The spectral range of the UV-B instrument is from 280 nm up to 322 nm which leads to a distance of 1.35 nm between two channels due to the 32 detection channels of the MCP-PMT. The simultaneous detection of the total wavelength range enables a comparatively high time resolution. A spectrum can be recorded every second. However, in the routine operation mode 5 minutes averages are stored by the computer. The whole system is mounted in a weatherproof housing and the temperature is

stabilized within 1°C. The entrance optics are covered by a quartz dome. Humidity inside the housing is kept below 20% by means of a drying agent (P₂O₅).

The spectroradiometer is calibrated in a laboratory in Bremerhaven prior installation at Spitsbergen and after its return. A 1000 W FEL quartz-halogen lamp is used which was calibrated by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). The main quality assurance is given by comparison of the absolute energy calibration before the campaign and after the instruments return. All changes found up to now in 3 years have been below 5% for all wavelengths. Apart from this absolute energy calibration we use a 200W quartz lamp from a slide projector with a very precise and stable power supply, to check energy calibration in field. Wavelength calibration is performed in the laboratory and checked again in field using a Penray mercury lamp.

A slightly modified instrument was built to measure the UV-A range. It is installed at Ny-Ålesund since March 1998, measuring from 318 nm up to 400 nm with the 32 detector channels corresponding to a distance of 2.65 nm between two channels. Beside this, the UV-A and UV-B instruments are quite similar, with identical recording and data storing modus.

Figure 1 shows the UV-A/B spectrum measured at Ny-Ålesund for March 20th 1998 at local noon. Results for our UV-B instrument, obtained during a German intercomparison of UV spectroradiometers in 1997 in Garmisch-Partenkirchen, are described in a report by Seckmeyer et al. (1998).

3. Daily UV-B irradiance

Figure 2 shows the daily UV-B irradiances integrated from 290 - 320 nm for the years 1997 - 1999. In 1997 the measurements began in May, whereas in the following years they restarted in March simultaneously with the polar sunrise. The figure shows the annual variation due to altering sun elevation with a maximum at midsummer with a large variability from day to day caused by fluctuating cloud conditions. A comparison of the three years also reflects the different weather situations. In 1998 there was a summer with a large amount of sunshine duration leading to 21 days with daily irradiance over 40 kJ/m². In 1997 only 10 days exceeded this value and in the summer of 1999, the value of 40 kJ/m² was exceeded only once.

Apart from these differences all datasets show a rather noisy distribution of daily irradiance due to the changes in attenuation by different cloud situations. This variation is low in spring before mid of May, high through the summer and starts to be low again in early (1998), mid (1997) or late (1999) September. This season dependent behavior of daily irradiance values is

caused by changes in the ground albedo which shows a large annual variation around Spitsbergen. During winter and early spring the whole island and the frozen Kongsfjord, where the measuring site is located, is covered by snow leading to an albedo between 0.8 and 0.9. In late spring, when sea ice and snow are melting, the albedo decreases to about 0.1. Degünther et al. (1998) have recently shown that the ground albedo up to 50 km around the measuring site affects the UV radiation at ground. For this reason, melting of snow is a rather slow process in lowering the average albedo around the measuring site. In September a snow cover builds up again attended by a sudden increase of ground albedo.

Due to the high reflectance of the snow covered surface, the upward radiative flux on the ground is enhanced, compared to the snow free case. In the presence of clouds this upward flux is reflected downwards again. If clouds are absent the upward flux is scattered down again only by Rayleigh scattering. The multiple reflection between snow and cloud cover enhances irradiance on the ground stronger than Rayleigh scattering only, this effect is recently evaluated for a measuring site in the Alps by Renaud et al. (2000). Thus the attenuating effect of clouds is partly compensated by this multiple reflection and daily irradiances in Figure 2. are smoothed during the spring and autumn, when the measuring site is snow covered. The influences of ground albedo and cloud cover on the UV irradiance are evaluated by radiative transfer modeling in chapter 6.

4. Comparison of the UV-B data with total ozone columns

Apart from ozone, radiative transfer is influenced by several other atmospheric parameters like aerosols, clouds, etc.. To extract changes in the spectra which are due to varying total ozone values from other effects, we use the ratio of the spectral irradiance measured at two wavelengths $I(300\text{ nm}) / I(320\text{ nm})$. This ratio is called ozone index in the following. This method is the principle of a Dobson photometer. In the wavelength range 300 to 320 nm the influences of aerosols and clouds have only a very weak dependence on wavelength.

Seckmeyer et al. (1996) showed that cloud transmittance is not independent from wavelength, but they found only a weak decrease in the transmittance in the UV range of about 10% from 300 to 400 nm. This decrease is almost linear and therefore the effect from 300 to 320 nm is only about 2%. Kylling et al. (1997) explain this wavelength dependence as an upward scattering of photons from the cloud particles, which are then downscattered by the wavelength dependent Rayleigh scattering. Nevertheless, Mayer et al. (1998) showed that an extensive optical path enhancement of the photons in very thick clouds occurs by Mie scattering. This enhancement leads to an additional strong wavelength dependent absorption of the shortwave radiation by ozone in the cloud, which could cause large errors in the results of algorithms for total ozone determination. These errors increase with an increasing amount of tropospheric ozone, particularly ozone in the cloud, and increasing solar altitude, because

then the path through the stratospheric ozone layer reaches the minimum and the absorption in the cloud becomes more important in relation to stratospheric absorption. Because on Spitsbergen solar elevation angle does not exceed 35° and air pollution is low there, tropospheric ozone is not a serious problem in data interpretation.

For a comparison of UV-B data with total ozone columns, we use ozone sonde data available for Ny-Ålesund, see for example König-Langlo (1997). But for a day by day comparison sonde data are too rare. Thus we use satellite data from the TOMS instrument (Total Ozone Mapping Spectrometer). There are several ground based measurements of ozone performed at Ny-Ålesund by FTIR, DOAS, Differential Absorption LIDAR and millimeter-wave observations. An extensive comparison of all ozone data available in Ny-Ålesund is given by Langer (1999), pointing out several limitations for every system. The TOMS satellite data available showed a very stable behavior in this comparison (Langer 1999, p. 197) and seemed to be suitable for relating with our 3 years of UV-B data.

Figure 3 shows the ozone index calculated from the 1998 daily UV spectra. These data are compared with total ozone data from TOMS and ozone sonde soundings. All UV spectra were measured at the same solar elevation angle of 30° (i.e. airmass 2.0), because ozone absorption depends on the optical path length through the ozone layer. This airmass is reached at 79° North between May 17th and July 29th only, therefore the comparison is restricted to this period. The figure shows a good anticorrelation between total ozone and the ozone index. However, one has to consider that there are some principle error sources in the comparison of ground based and satellite data. At first, there is only a finite coincidence in the time of the daily measurements and second the satellite records an average value over a footprint of $40 \times 40 \text{ km}^2$. Keeping this in mind, the remaining discrepancy between ozone sonde and TOMS total ozone data within 10% is quite reasonable.

For 1997 and 1999 the comparison of UV-B and ozone data looks similar to Figure 3. More interesting is the actual change in UV-B at the ground due to changes in the total ozone. We compare the ratios of the ozone index and the total ozone day by day for two years using average values around noon ($\pm 1\text{h}$) to extend the period of comparison. This also weakens the possible error sources in the comparison with satellite measurements due to the footprint of the satellite. In Figure 4 the ratios 1997/1998 are shown for the period from May to August, the solar elevation angle cancels down in the quotient. One can realize that small changes in the amount of total ozone cause large responses in the shortwave UV-B radiation at the Earth's surface. The picture is the same, when the 1999 data are included. In order to have a more quantitative comparison, we tried to find a functional correlation between the change in total ozone and in the ozone index. Assuming a simple Lambert-Beer law (1) to describe wavelength dependent attenuation of UV radiation by ozone we find equation (2) fitting the

ratio of ozone indices as a function of TOMS data ratio. The parameter ΔB (0.0125 DU^{-1}) was fitted to the data of 97/98. This result quantifies the UV-B response to ozone variations: A 10 DU change in total ozone leads to a change of 12% in the ozone index.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-B_\lambda [O_3]) \quad (1)$$

$$O_3 \text{ Index}(97/98) = \exp(-\Delta B \Delta O_3) \quad (2)$$

$$\text{mit: } \Delta O_3 = [O_3]_{(97)} - [O_3]_{(98)} \quad \text{und} \quad \Delta B = B_{300\text{nm}} - B_{320\text{nm}}$$

Figure 5 shows the result of the fit in comparison with the ratio of the measured ozone indices (1997/1998). Despite some outliers the fit matches within 20%, which is quite reasonable concerning discussed error sources. At some days the deviation is larger as for example at May 30th 1998. The reason is a large spatial gradient in the amount of total ozone for these days. At May 30th TOMS measured 430 DU at Koldewey-Station (78.93° N , 11.95° E) but 402 DU only 0.1° further north (79.03° N , 11.95° E) which corresponds to a distance of just 11 km. A reduction of the total ozone value from 430 DU to 402 DU leads to a reduction of function (2) from 2.97 to 2.09. This fits much better to the measured ratio of 1.63. This shows that the comparison of ground based UV measurements and TOMS data for some days are difficult, but considering the whole measuring period such extreme conditions are rather unusual.

We have been able to verify the relation between changes in total ozone and UV radiation on the basis of the 1999 data. Figure 6 shows the ratios 97/99 and 98/99 of the ozone indices in comparison with the fit. Although only the 97/98 data have been used for the fitting procedure it describes the ratios to 1999 as well.

5. Effects of clouds and ground albedo by UV radiative transfer modeling

The radiative transfer program Libradtran developed by Kylling et al. (1998) was applied to study the effects of clouds and ground albedo on the UV irradiance on the ground. Libradtran is based on a numerical solution of the 1 dimensional radiative transfer equation using the discrete-ordinate algorithm introduced by Stamnes et al. (1988) or optional the two-stream radiative transfer solver. Due to the 1 dimensional description all cloud scenarios studied in the following are homogeneous cloud layers. Parameters to define these cloud covers are the altitude of the lower and upper cloud boundary, the liquid water content and the effective droplet radius. In this parameterization the optical properties of the cloud are calculated as described by Hu and Stamnes (1993). Aerosols are taken into account by employing the aerosol model of Shettle et al. (1989).

For modeling of the interaction between cloud cover and ground albedo concerning UV radiative transfer we studied different cloud scenarios combined with the ground albedo of a snow covered (0.8) and a snow free (0.1) landscape. Figure 7 shows the modeling results for both albedo cases in a clear sky scenario and with a homogeneous cloud cover (with a lower / upper cloud boundary of 1 km / 2 km, a liquid water content of 0.3 g/m³, and an effective droplet radius of 10 micron). All calculations were done for 25° solar altitude, a total ozone value of 300 DU, and moderate maritime type aerosol conditions.

The figure shows that the cloud cover leads to a reduction of the spectral irradiance at ground which is much larger in the snow free case. The reason for this behavior is the occurrence of multiple reflection between the snow surface and the cloud as discussed in section 2. Table 1 gives quantitative results for the integrated irradiances (UV-A and UV-B) assuming different cloud scenarios. The reduction of the irradiance in snow free situations is more than twice as much as in the snow covered case. This gives the explanation for the obvious increase of noise in the daily UV irradiance during the melting of the snow in late spring and noise reduction with the first snowfalls in late summer shown in Figure 2. The smoothing is not dependent on the weather condition of each single day. It is a more statistical statement in consequence of shifting up the - due to clouds - lower daily irradiance values of the ensemble in relation to the high values (sunny days).

6. Conclusions

During the first three years of our monitoring program the instrument proved to be very stable and to work reliable under the extreme climatic conditions at Spitsbergen. Comparing the data from different years, the results show that the dominant influences are weather conditions and ground albedo. Due to the strong effects of clouds and the steep increase of intensity towards the long wavelengths, which are only little affected by ozone absorption, the influence of total ozone on radiative transfer is not visible in comparison to the measured integrated irradiance. The only visible effects are on the shape of the spectrum, represented by the ozone index. The data show an amplification of the 300 nm radiation at the surface by 12% for every 10 DU ozone loss with respect to 320 nm. Regarding a trend in UV radiation on the ground, as a result from all possible effects, it can be revealed that a longer period of observations is still needed before reliable statements can be made.

Acknowledgements. We gratefully acknowledge the help of the AWI staff involved in the accumulation of the data, in particular the personnel at Koldewey-Station (1997 - 1999): Thomas Seiler, Dirk Römermann, Thomas Schmitt, Tine Weinzierl, Nicole Spelten, and Christian Wille. We also acknowledge funding by the German ministry for Science,

Education, Research and Technology (BMBF, grant #01 L09701/3). This paper is Alfred Wegener Institute contribution #1789.

References

- Casale, G.R., Meloni, D., Miano, S., Palmieri, S., Siani, A.M., and Cappellani, F. (2000): Solar UV-B irradiance and total ozone in Italy: Fluctuations and trends. *J. Geophys. Res.*, D105, 4895-4901
- Chubachi, S. (1984): Preliminary results of ozone observations at Syowa station from February 1982 to January 1983. *Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue Jpn.*, 34, 13-19
- Degünther, M., Meerkötter, R., Abold, A. and Seckmeyer G. (1998): Case study on the influence of inhomogeneous surface albedo on UV irradiance. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3587-3590
- Farman, J.C., Gardiner, B.D., and Shanklin, J.D. (1985): Large losses of ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x / NO_x interaction. *Nature*, 315, 207-210
- Hu, X.Y. and Stamnes, K. (1993): An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models. *J. Climate*, 6, 728-742
- König-Langlo, G. and Marx, B., (1997): The Meteorological Information System at the Alfred Wegener Institute. In: *Climate and Environmental Database Systems* by Lautenschläger, M. and Reinke, M. Published by Kluwer Academic Publisher, USA, Norwell
- Krzyścin, J.W. (2000): Total ozone influence on the surface UV-B radiation in the late spring-summer 1963-1997: An analysis of multiple timescales. *J. Geophys. Res.*, D105, 4993-5000
- Kylling, A. and Mayer, B (1998). Libradtran is a program for calculation of diffuse and direct UV and visible fluxes and intensities at any altitude. Available from <http://www.uio.no/~arveky/libRadtran.html>.
- Kylling, A., Albold, A. and Seckmeyer, G. (1997): Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV range: Physical interpretation. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 397-400.
- Langer, J. (1999) Measurements of Arctic stratospheric ozone: Comparison of ozone-measurements at Ny-Ålesund, Spitsbergen, in 1997 and 1998. *Ber. Polarforsch.*, 322, ISSN 0176 - 5027.

- Mayer, B., Kylling, A., Madronich, S. and Seckmeyer, G. (1998): Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: Experimental evidence and theoretical explanation. *J. Geophys. Res.*, D103, 31241-31254.
- Müller, R., Crutzen, P.J., Grooß, J.U., Brühl, C., Russell, J.M., Gernandt, H., McKenna, D.S. and Tuck, A.F. (1997): Severe chemical ozone loss in the Arctic during The winter of 1995-96. *Nature*, 389, 709-712.
- Renaud, A., Staehlin, J., Fröhlich, C., Philipona, R., and Heimo, A. (2000): Influence of snow and clouds on erythemal UV radiation: Analysis of Swiss measurements and comparison with models. *J. Geophys. Res.*, D105, 4961-4969.
- Rex, M., Harris, N.R.P., von der Gathen, P., Lehmann, R., Braathen, G.O., Reimer, E., Beck, A., Chipperfield, M.P., Alfier, R., Allaart, M., O'Connor, F., Dier, H., Dorokhov, V., Fast, H., Gil, M., Kyrö, E., Litynska, Z., Mikkelsen, I.S., Molyneux, M.G., Nakane, H., Notholt, J., Rummukainen, M., Viatte, P., and Wenger, J. (1997): Prolonged stratospheric ozone loss in the 1995-96 Arctic winter. *Nature*, 389, 835-838.
- Seckmeyer, G., Erb, R. and Albold, A. (1996): Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV range. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2753-2555.
- Seckmeyer, G., Mayer, B. and Bernhard, G. (1997): The 1997 Status of Solar UV spectroradiometry in Germany: Results from the National Intercomparison of Spectroradiometers, Garmisch-Partenkirchen, August 1997. Shaker Verlag, Aachen, Germany.
- Shettle, E.P. (1989): Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies. AGARD Conference Proceedings No. 454.
- Stamnes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W. and Jayaweera, K. (1988): Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Applied Optics*, 27, 2502-2509.

Table 1

Integrated UV-A / UV-B irradiance at ground for 25° solar elevation in different ground albedo and cloud scenarios divided by clear sky values

| Cloud 1 | Cloud 2 | Cloud 3 |
|---------|---------|---------|
|---------|---------|---------|

| | | | |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| Ground Albedo 0.8 | 0.510 / 0.489 | 0.432 / 0.423 | 0.388 / 0.374 |
| Ground Albedo 0.1 | 0.228 / 0.262 | 0.208 / 0.182 | 0.175 / 0.152 |

Cloud 1: liquid water content 0.3 g/m³, lower / upper boundary 1 km / 2 km

Cloud 2: liquid water content 0.5 g/m³, lower / upper boundary 1 km / 2 km

Cloud 3: liquid water content 0.2 g/m³, lower / upper boundary 1 km / 3 km

Effective droplet radius for all clouds: 10 microns

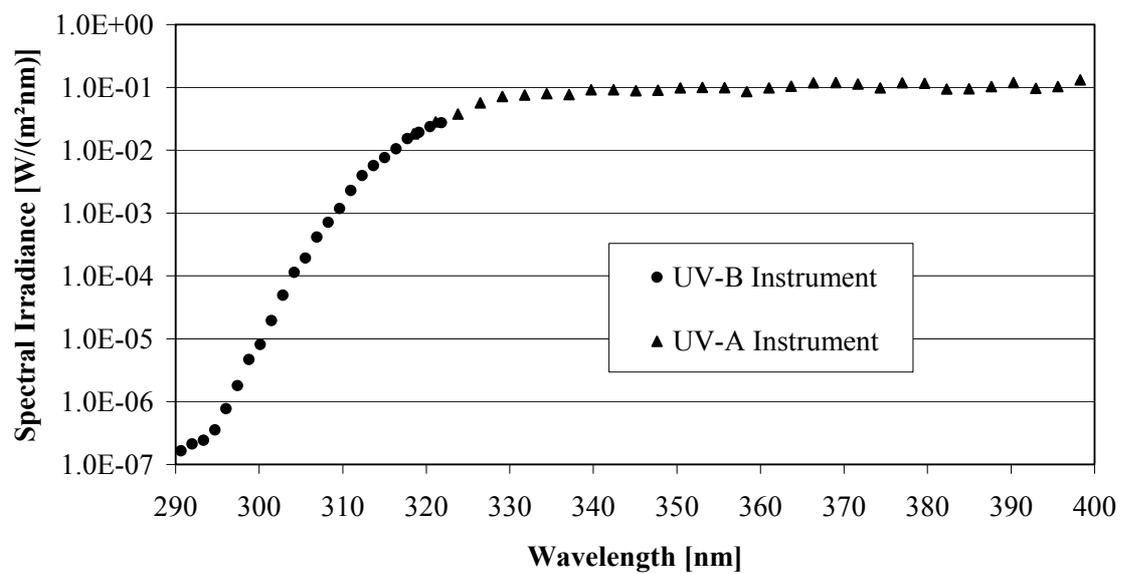
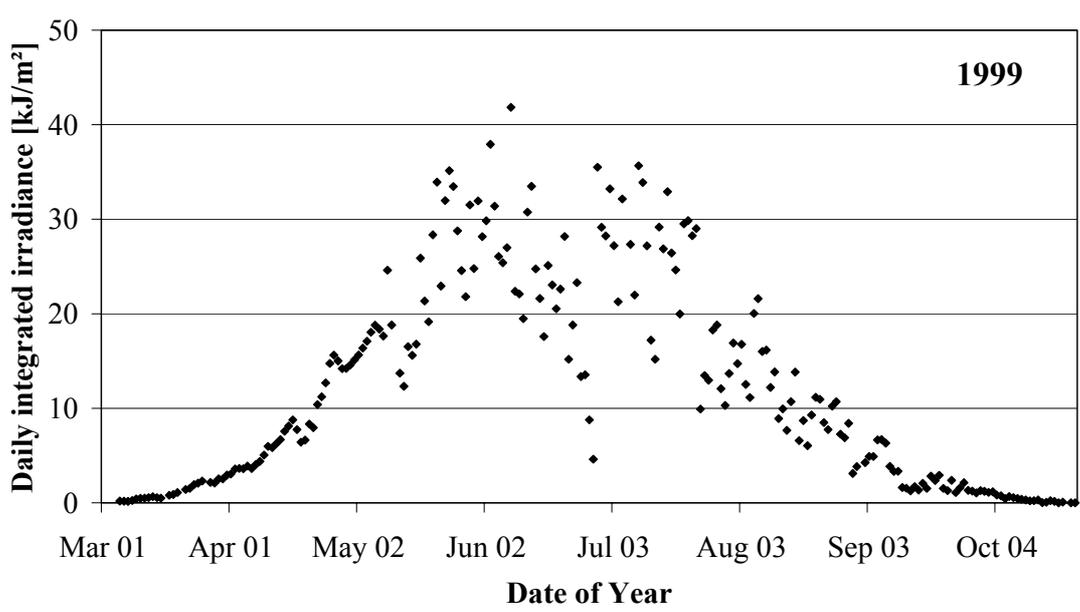
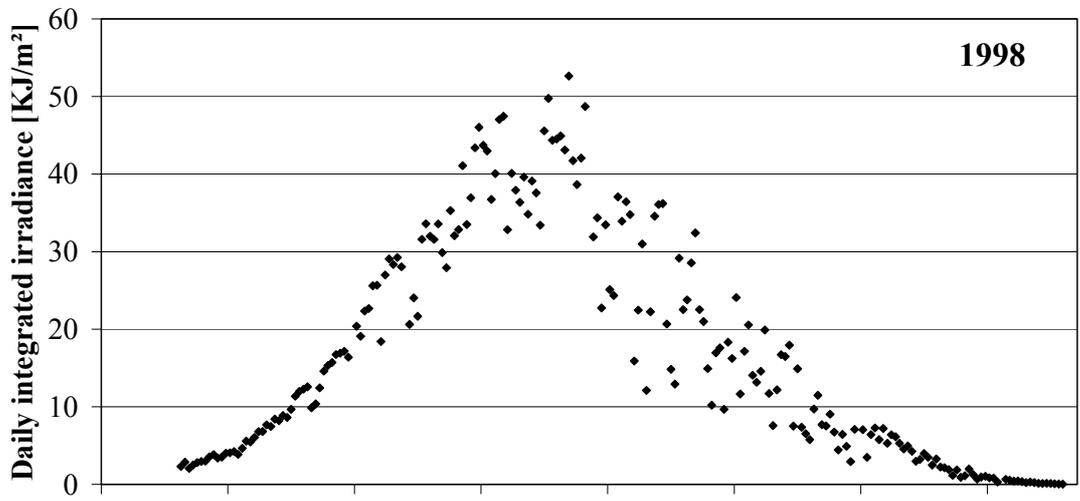
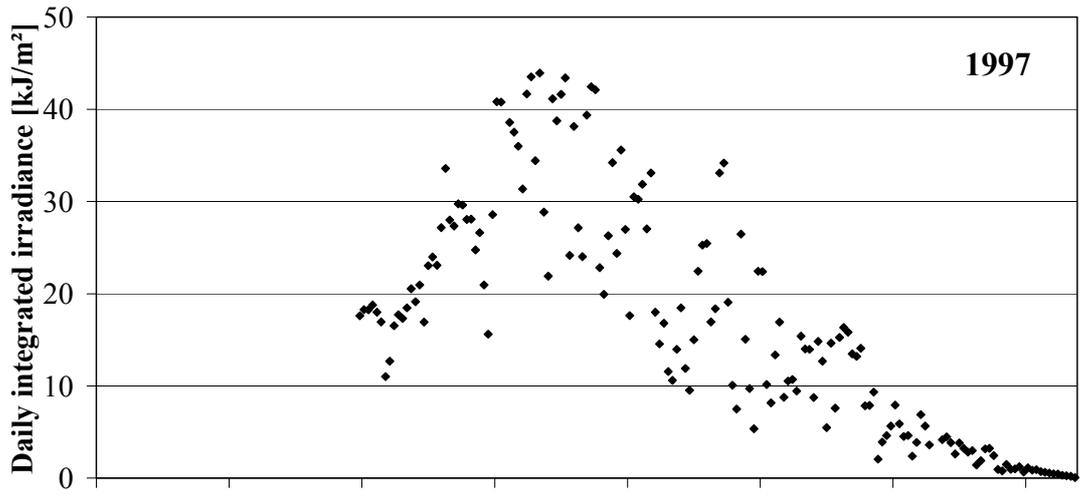


Fig. 1. UV-B/A spectrum measured at Koldewey-Station at March 20th 1998, 12.05 UTC.

Next page:

Fig. 2. Daily UV-B irradiances (280 - 320 nm) at Koldewey-Station.



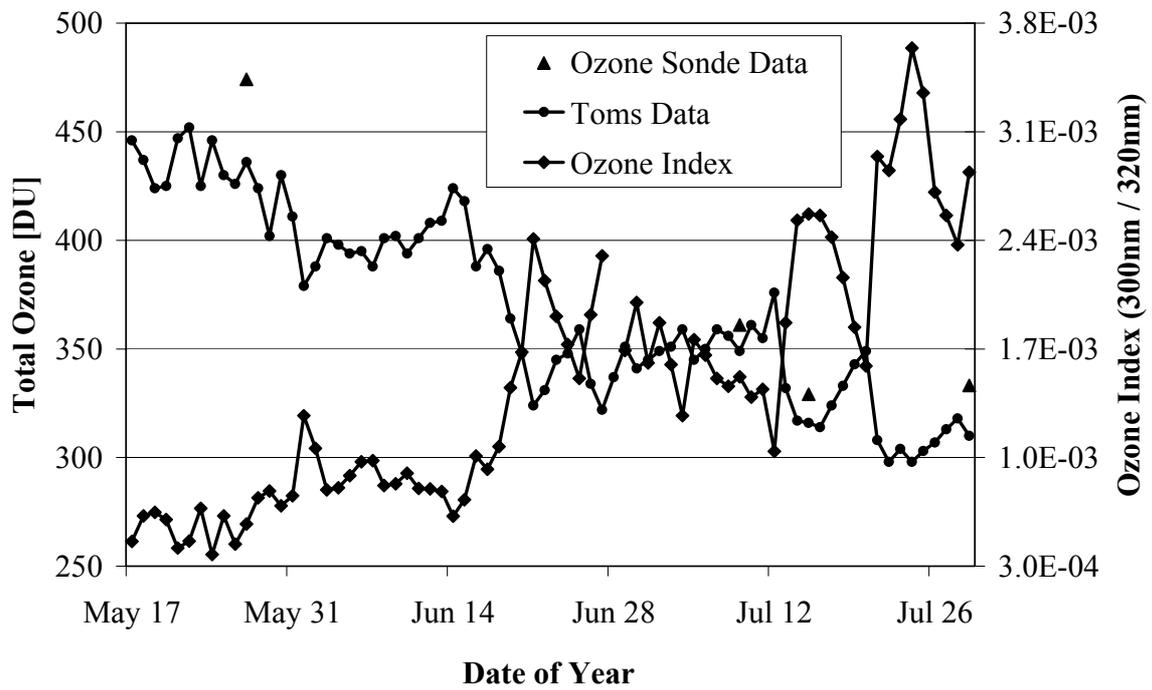


Fig. 3. Comparison of total ozone and ozone index at air mass 2.0 (Koldewey-Station 1998).

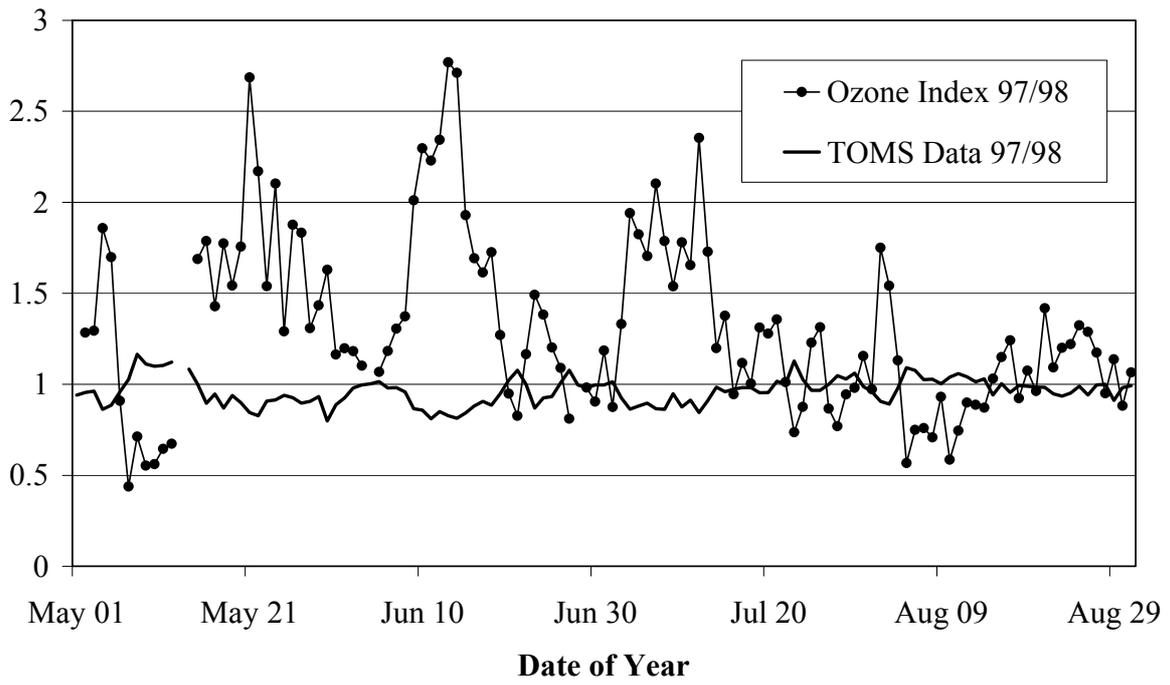


Fig. 4. Comparison of the ratios (1997/1998) of total ozone and ozone indices.

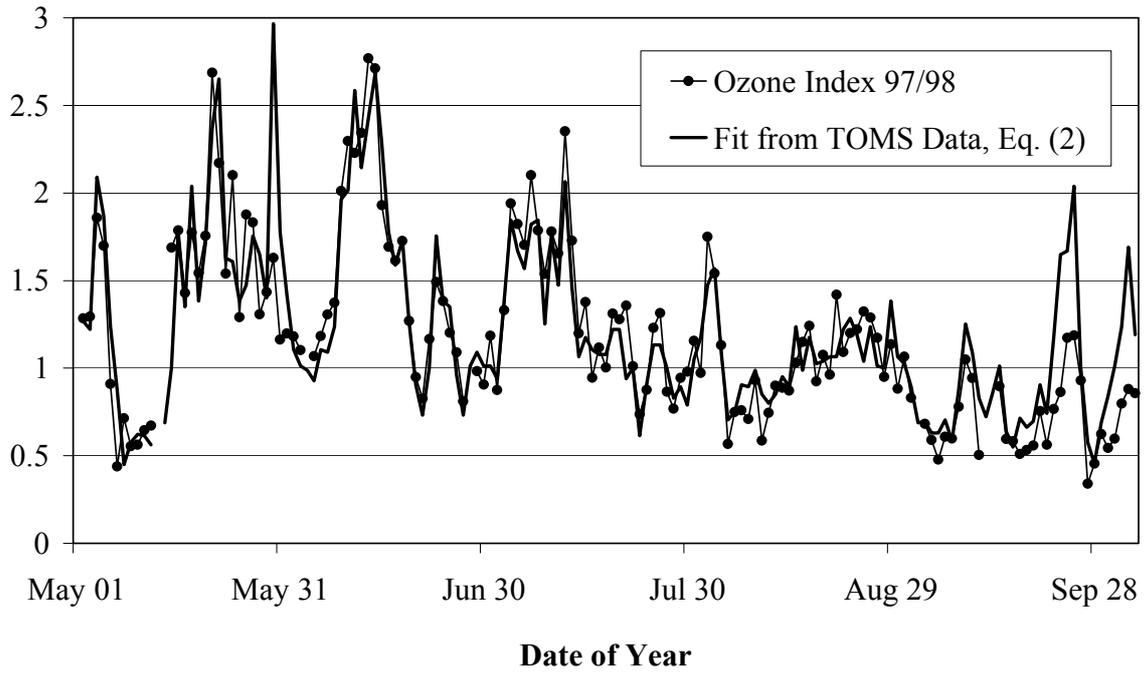


Fig. 5. The ratios of the ozone indices (1997/ 1998) as function of TOMS total ozone data.

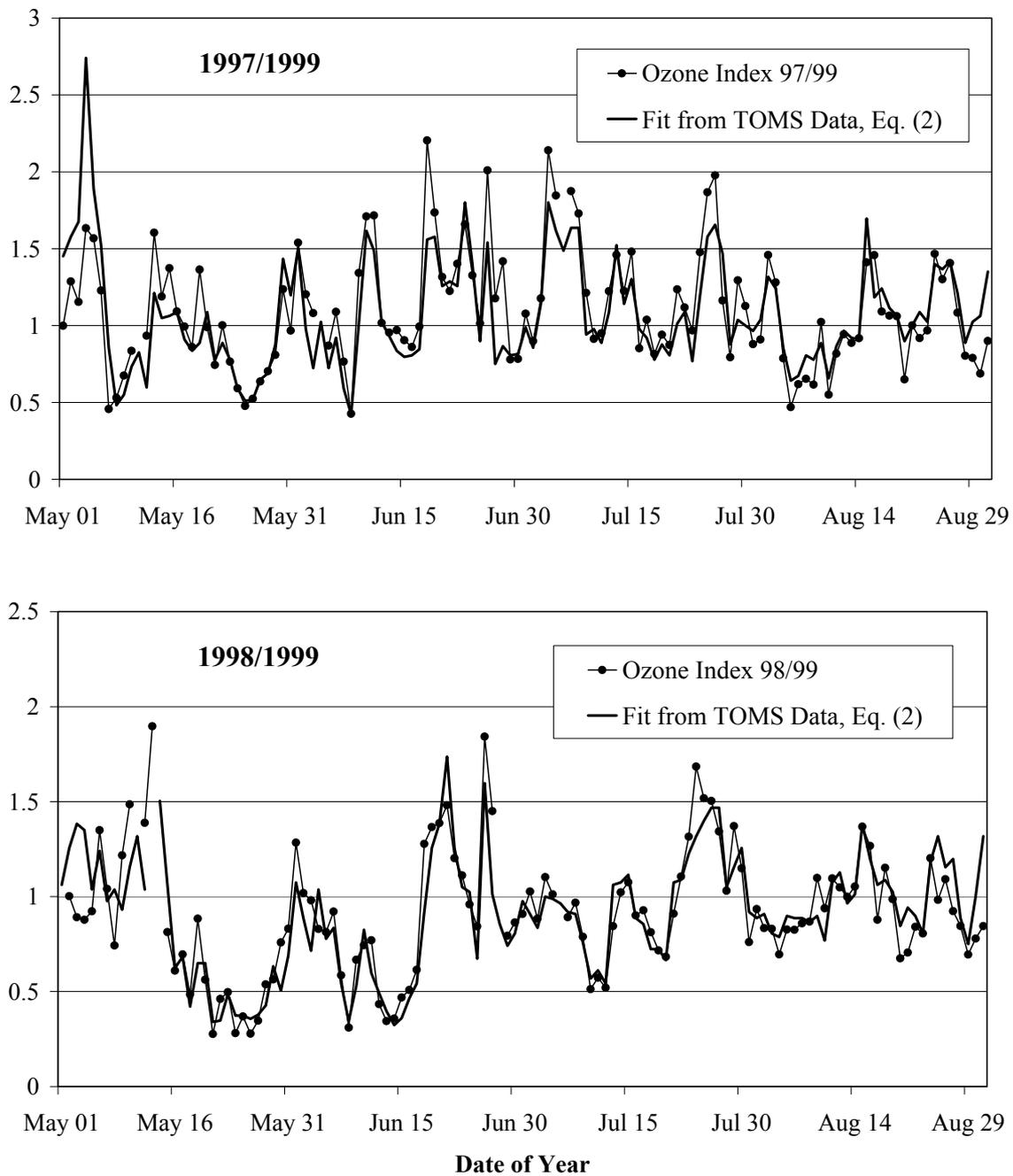


Fig. 6. The ratios of the ozone indices as function of TOMS data regarding to the 1999 data which were not included in the fitting procedure (eqn. (2)).

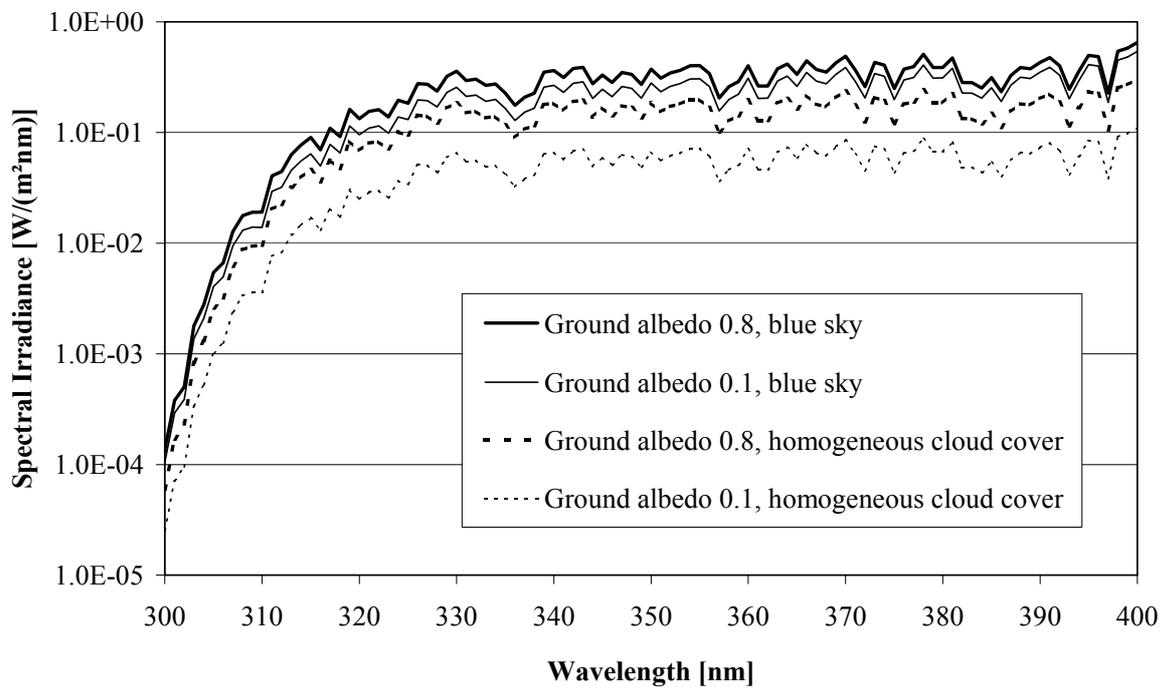


Fig. 7. Influence of ground albedo and clouds on UV irradiation at ground. The homogeneous cloud layer is determined through a lower boundary at 1 km, an upper boundary at 2 km, a liquid water content of $0.3 \text{ g}/\text{m}^3$, and an effective droplet radius of 10 microns. All calculations were carried out at 25° solar altitude, 300 DU and moderate maritime type aerosol conditions.