

# DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

## Homogenisierung von Radiosondentemperaturzeitreihen in der Antarktis mit ERA-Interim Daten

angestrebter akademischer Grad

**Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)**

Verfasserin: Sabine Radanovics  
Matrikel-Nummer: 0201205  
Studienrichtung: A415 (Meteorologie)  
Betreuer: Ao.Univ.Prof.Mag.Dr. Leopold Haimberger

Wien, im Februar 2010



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Abstract</b>  | <b>6</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2 Daten</b>   | <b>9</b>  |
| 2.1 Radiosondendaten . . . . .   | 9         |
| 2.2 Reanalysedaten: ERA-Interim und ERA-40 . . . . .                                       | 9         |
| 2.3 Satellitendaten . . . . .  | 12        |
| 2.3.1 GPS Radiookkultationsdaten . . . . .   | 12        |
| 2.3.2 MSU Daten . . . . .  | 13        |
| <b>3 Methoden</b>  | <b>17</b> |
| 3.1 Homogenisierungsmethoden . . . . .   | 17        |
| 3.1.1 Vergleichsexperimente . . . . .  | 18        |
| 3.1.2 Physikalisch begründete Methode von Luers und Eskridge . . . . .                     | 18        |
| 3.1.3 Methoden mit Rangsummentests . . . . .   | 19        |
| 3.1.4 Methode von Lanzante, Klein und Seidel (LKS) . . . . .                               | 20        |
| 3.1.5 First Difference Methode . . . . .   | 20        |
| 3.1.6 Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing Climate (RATPAC) . . . . . | 21        |
| 3.1.7 HadAT . . . . .  | 21        |
| 3.1.8 Iterative Universal Kriging (IUK) . . . . .  | 23        |
| 3.1.9 RAOBCORE . . . . .   | 24        |
| 3.1.10 RICH . . . . .  | 27        |
| 3.2 Vergleiche . . . . .   | 27        |
| 3.2.1 Vergleiche von homogenisierten Radiosondentemperaturdatensätzen . . . . .            | 27        |
| 3.2.2 Vergleich MSU - Radiosonden . . . . .  | 28        |
| 3.2.3 Vergleich GPS Radiookkultationsdaten - Radiosonden . . . . .                         | 29        |
| 3.2.4 Vergleich GPS RO - MSU . . . . .   | 30        |

## *Inhaltsverzeichnis*

|  |            |
|--|------------|
| <b>4 Trends</b>  | <b>32</b>  |
| 4.1 Vorbetrachtungen . . . . .                             | 32         |
| 4.2 Radiosondentemperaturtrends in der Literatur . . . . . | 34         |
| 4.2.1 Trends in der Stratosphäre . . . . .                 | 36         |
| 4.2.2 Trends in der Troposphäre . . . . .                  | 40         |
| <b>5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis</b>           | <b>44</b>  |
| 5.1 Amundsen/Scott . . . . .                               | 50         |
| 5.2 Syowa . . . . .  | 56         |
| 5.3 Mawson . . . . .                                       | 62         |
| 5.4 Davis . . . . .  | 66         |
| 5.5 Wilkes/Casey . . . . .                                 | 69         |
| 5.6 Mc Murdo . . . . .                                     | 75         |
| 5.7 Novolazarevskaya . . . . .                             | 78         |
| 5.8 Mirnyy . . . . .                                       | 84         |
| 5.9 Halley Bay . . . . .                                   | 90         |
| 5.10 Neumayer . . . . .                                    | 94         |
| 5.11 Bellingshausen . . . . .                              | 98         |
| 5.12 Vice Commodore Mario Luis Olezza . . . . .            | 101        |
| 5.13 Dumont . . . . .                                      | 103        |
| 5.14 Vostok 2 . . . . .                                    | 106        |
| 5.15 Leningradskaya . . . . .                              | 110        |
| 5.16 Molodezhnaya . . . . .                                | 112        |
| 5.17 S.A.N.A.E. Station . . . . .                          | 116        |
| 5.18 Islas Orcadas . . . . .                               | 118        |
| 5.19 Argentine Island . . . . .                            | 120        |
| <b>6 Zusammenfassung der Ergebnisse</b>                    | <b>123</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                                | <b>130</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                               | <b>137</b> |
| <b>Danksagung</b>  | <b>139</b> |

# Zusammenfassung

Das am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien entwickelte Verfahren zur Homogenisierung von Radiosondentemperaturzeitreihen RAOB-CORE (Radiosonde Observation Correction using Reanalysis) (Haimberger, 2005; Haimberger and Andrae, 2006; Haimberger, 2007; Haimberger et al., 2008) hat bisher Zeitreihen der Differenz zwischen Beobachtungen und Backgroundvorhersagen aus ERA-40 Reanalysen (sogenannte Innovationsstatistiken) zum Auffinden und Korrigieren von Brüchen verwendet. Am wenigsten zufriedenstellend hat das in der Antarktis funktioniert, da in ERA-40 in den letzten Jahren die Brewer-Dobson Zirkulation zu stark ausgeprägt war, was zu vertikal inkonsistenten Temperaturtrends in den Polargebieten und besonders in der Antarktis geführt hat. In ERA-40 sind die Jahresgänge der Innovationen in der Antarktis groß und es treten größere Inhomogenitäten durch Änderungen bei den Satellitendaten auf als im globalen Mittel. Mittlerweile sind mit ERA-Interim neue Reanalysen verfügbar, die diesbezüglich deutlich besser und daher zumindest ab 1989 eine bessere Referenz zur Homogenisierung sind. ERA-Interim Innovationen haben in der Antarktis viel kleinere Jahresgänge als ERA-40 Innovationen und die vertikale Struktur der Temperaturtrends der ERA-Interim Daten und der damit homogenisierten Radiosondendaten ist plausibler als in ERA-40.

Die Methode zur Berechnung der Bruchgrößen wurde verbessert und mit der ursprünglichen Methode verglichen. Brüche in antarktischen Radiosondentemperaturzeitreihen werden nur noch korrigiert, wenn mindestens fünf umliegende, ebenfalls antarktische Stationen als Referenz zur Berechnung der Bruchgröße zur Verfügung stehen. Ohne Nachbarstationen sind die Sprünge vor 1989 praktisch nicht korrigierbar, da der Background bei ERA-40, der vor 1989 weiterhin verwendet wird, in der Antarktis größere Inhomogenitäten durch Änderungen bei den Satellitendaten hat. Die Auswirkungen von Verbesserungen in der Korrekturberechnung für antarktische Stationen und von ERA-Interim Innovationen auf die Homogenisierung von antarktischen Radiosondentemperaturzeitreihen wurde untersucht. Mit den neuen Korrekturen passen die Zeitreihen besser zum Mittel über alle antarktischen Stationen. Die räumliche Homogenität der Radiosondentemperaturtrends wird verbessert. Einige Brüche können nicht mehr korrigiert werden, da es zu wenig Daten von umliegenden Stationen gibt. Der Einfluss der Methode zur Berechnung der Bruchgrößen ist vor 1989 deutlich größer als danach wo ERA-Interim Daten verfügbar sind.

# Abstract

RAOBCORE (Radiosonde Observation Correction using Reanalysis) is a method to homogenize radiosonde temperature time series and was developed at the Institute for Meteorology and Geophysics at the University of Vienna by Leopold Haimberger (Haimberger, 2005; Haimberger and Andrae, 2006; Haimberger, 2007; Haimberger et al., 2008). RAOBCORE uses differences between the observations and the background forecast from ERA-40 reanalyses (so-called innovations) to find and correct artificial breaks. This worked insufficiently in the Antarctic, because there is a too strong Brewer-Dobson circulation in ERA-40 during the last years, which led to vertically inconsistent temperature trends in the polar regions, especially in the Antarctic. There is a very strong annual cycle in the ERA-40 innovations for antarctic radiosonde stations and the inhomogeneities in the background forecast caused by changes in the available satellite data are larger than in the global mean. Meanwhile the new ERA-Interim reanalysis is available and it is much more homogenous in the Antarctic region and therefore a better reference for homogenizing radiosonde data since 1989. The annual cycle is much smaller in ERA-Interim than in ERA-40 innovations and the vertical structure of the temperature trends is more realistic.

In a new RAOBCORE version the break size estimation for antarctic stations is improved and compared to the original method. Breaks in antarctic radiosonde temperature time series are only corrected if at least five surrounding antarctic stations are available as a reference for calculating the break size. Breaks prior to 1989 are practically not correctable without neighbour stations, because ERA-40 innovations are still used until 1989 and the background forecast has large inhomogeneities due to changes in satellite data. The effect of the improvement in the correction calculation for antarctic stations and using ERA-Interim innovations on homogenization of the antarctic radiosonde temperature time series was investigated.

With the new corrections the time series correspond much better to the Antarctic mean and the spatial homogeneity of radiosonde temperature trends is improved. Some breaks are not correctable any more, because there is not enough data from surrounding stations. The break size calculation method has more influence for breaks prior to 1989 than in the ERA-Interim period.

# 1 Einleitung

Zeitreihen von meteorologischen Messdaten, wie zum Beispiel Radiosondendaten weisen oft Inhomogenitäten/Brüche auf, da diese Daten ursprünglich erhoben wurden um den aktuellen Zustand der Atmosphäre zu messen und weder als Klimabeobachtungen noch als Referenzmessungen noch zur Beobachtung von Änderungen in der Stratosphäre gedacht waren (Ramaswamy et al., 2001; Thorne et al., 2005a; Randel et al., 2009). Mit der Zeit entstehen jedoch längere Datenreihen, die man gerne als Klimazeitreihen betrachten würde, in denen, wenn sie homogen sind, laut Definition von Conrad und Pollak (1950), Änderungen nur durch Änderungen des Wetters oder des Klimas hervorgerufen werden. Karl et al. (1995) haben aufgrund dieser Erfahrungen zehn Prinzipien für Langzeitklimabeobachtungen vorgeschlagen, die auch eine regelmäßige Homogenitätsprüfung der Klimadaten beinhalten.

Brüche in Radiosondenzeitreihen können durch eine Änderung des systematischen Fehlers entstehen, wobei die systematischen Fehler bei Radiosondentemperaturen Strahlungsfehler, Fehler durch die Reaktionszeit des Sensors, Fehler durch mangelnde Belüftung des Sensors, Fehler des Drucksensors oder Fehler durch eine zu kurze Schnur zwischen Ballon und Gerät sein können. Eine Änderung des systematischen Fehlers gibt es, wenn zum Beispiel ein neuer Messgerätetyp benutzt wird oder sich der Stationsstandort, der Ballontyp, die angewendeten Korrekturverfahren oder post processing Methoden ändern (Haimberger, 2005).

Betrachtet man Trends, weil man Klimaänderungen untersuchen möchte, dann stören diese Inhomogenitäten, da sie die Trends verfälschen (Gaffen et al., 2000) und sogar größer als die Trends sein können (Elliott et al., 2002). Zum Beispiel zeigen unkorrigierte Radiosondendaten in der tropischen unteren Stratosphäre wesentlich stärkere negative Temperaturtrends als Satellitendaten (Randel and Wu, 2006) oder es lassen sich Trends der Temperaturdifferenzen zwischen Boden und Troposphäre weder durch Trends in der Klimavariabilität noch durch Klimamodellsimulationen erklären (Hegerl and Wallace, 2002). Satelliten-, Radiosonden- und Reanalysedaten stimmen überein, wenn es um Phänomene mit kurzen Zeitskalen (ENSO, Vulkanausbrüche) geht, bei Trends gibt es jedoch große Unterschiede (Thorne et al., 2005a). Um diese Effekte zu vermeiden ist es notwendig, die Zeitreihen zu homogenisieren, das heißt die künstlichen Sprünge zu entfernen. Auch um die Daten für Reanalysen nutzen zu können, müssen sie biaskorrigiert werden, da die Qualität der Reanalyse stark von der Qualität der Eingangsdaten abhängt (Andrae et al., 2004; Haimberger, 2005). Zu diesem Zweck gibt es verschiedene

## 1 Einleitung

Verfahren, auf die in Kapitel 3.1 näher eingegangen wird. Besonders wird auf das von Haimberger (2005, 2007) entwickelte Verfahren RAOBCORE (Kapitel 3.1.9) eingegangen.

Auf der Südhalbkugel ist die Stationsdichte nicht besonders hoch. Die extremen Umweltbedingungen in der Antarktis führen zu unregelmäßigen Messungen und damit unvollständigen oder kurzen Zeitreihen. Ballone, die nicht für sehr tiefe Temperaturen geeignet sind, platzen vorzeitig. Da die Ballone mit der Zeit besser wurden und dadurch häufiger sehr tiefe Temperaturen in der Stratosphäre gemessen werden konnten, kann sich das auch in stärkeren negativen Trends in der Stratosphäre auswirken (Christy et al., 2003). Gleichzeitig ist die Antarktis besonders interessant was Klimaänderungen betrifft, da die Klimamodelle aufgrund der Eis-Albedo Rückkopplung in den Polargebieten die stärksten Trends vorhersagen (Marshall, 2002). Umso wichtiger ist es, diese Daten zu homogenisieren.

Bisher wurden in RAOBCORE Innovationen der ERA-40 Reanalysen verwendet, die jedoch in der Antarktis große Sprünge aufweisen, die nicht in erster Linie auf die Datenqualität der Radiosonden zurückzuführen sind, sondern auf Probleme mit der Assimilation von Satellitendaten in den Polargebieten (Andrae et al., 2004). Die ERA-40 Daten weisen in der Antarktis vertikal inkonsistente Trends auf, da in den letzten Jahren eine zu starke Brewer-Dobson Zirkulation modelliert wurde (Uppala et al., 2005). Die neueren ERA-Interim Reanalysen sehen vielversprechend aus was die vertikale Konsistenz der Trends betrifft, reichen aber nur bis 1989 zurück.

In dem Zeitraum, in dem sie verfügbar sind, werden für diese Arbeit ERA-Interim Reanalysen verwendet, für länger zurückliegende Zeiträume ERA-40. Die Probleme der Homogenisierung von Radiosondendaten in der Antarktis sollen detailliert beschrieben werden, was als Grundlage für eine Verbesserung der RAOBCORE Methode dienen soll. Durch Radiookkultationsdaten gibt es eine neue Möglichkeit zum Vergleich von Temperaturprofilen (Blaschek, 2009), sodass zumindest für die letzten Jahre ein eventueller Bias korrigiert werden kann, beziehungsweise die Möglichkeit eines Vergleichs mit bereits vorhandenen Biaskorrekturen besteht.

In Kapitel 2 werden die verwendeten Daten diskutiert, in Kapitel 3 werden verschiedene Homogenisierungsmethoden beschrieben, die bereits zum Homogenisieren von Radiosondentemperaturdaten verwendet worden sind. Anschließend wird auf Vergleiche zwischen verschiedenen Datensätzen eingegangen. Das 4. Kapitel widmet sich den Trends in der Stratosphäre und Troposphäre mit Hauptaugenmerk auf die Antarktis. Im 5. Kapitel werden die Zeitreihen, Brüche und Korrekturen von 19 antarktischen Zeitreihen diskutiert und in Kapitel 6 die Ergebnisse zusammengefasst.

## 2 Daten

### 2.1 Radiosondendaten

Neben den in den ECMWF Reanalysen verwendeten Radiosondendaten werden zusätzlich Daten aus dem IGRA (Integrated Global Radiosonde Archive) verwendet. Für die zusätzlichen Daten aus dem IGRA wurden „künstliche“ Innovationen durch bilineare Interpolation der Background Vorhersage zur Radiosondenstation berechnet (Haimberger, 2005). Metadaten mit Informationen über die verwendeten Instrumente oder Veränderungen in der Beobachtungspraxis werden aus dem CARDS (Comprehensive Aerological Reference Data Set) Datensatz genommen. Momentan gibt es in der Antarktis zwölf aktive Radiosondenstationen, von denen sich elf am Eisrand und eine am Südpol befinden. In dieser Arbeit wird auf 19 Stationen die südlich von 60° S liegen und für die RAOBCORE zwischen 1957 und 2006 Korrekturen berechnet näher eingegangen. Manche antarktische Radiosondenzeitreihen haben regelmäßig Datenlücken im Winter. Besonders in den Schichten oberhalb von 100 hPa gibt es in den frühen Jahren im Winter wenig Daten, da die Ballone bei sehr tiefen Temperaturen platzten (Randel and Wu, 1999).

### 2.2 Reanalysedaten: ERA-Interim und ERA-40

ERA-Interim ist die neue Reanalyse des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF). Sie wurde mit dem Jahr 1989 gestartet und wird als Climate Data Assimilation System weiter geführt, bis die nächste Reanalyse ERA-75/ERA-Extended fertig ist. Diese soll um das Jahr 1940 beginnen, wobei wiederentdeckte Daten und verbesserte Homogenisierungsmethoden verwendet werden sollen.

Eine Reanalyse ist im Prinzip gut geeignet um Klimaänderungen zu betrachten, da sie räumlich vollständige Information für verschiedene Parameter bietet, die in sich konsistent ist und nicht von Änderungen in der Modellphysik oder Auflösung beeinflusst ist. Was allerdings sehr wohl einen Einfluss hat, ist die Qualität und Quantität der Eingangsdaten (Santer et al., 2004).

Von einer Reanalyse, die für Klimabetrachtungen oder als Referenzzeitreihe zur Homogenisierung von Radiosondendaten verwendet wird, wird verlangt, dass sie selbst homogen ist, was nicht immer der Fall ist. Bei den ERA-40 Daten oder

## 2 Daten

anderen älteren Reanalysen ist zu beobachten, dass bei einer Änderung des Beobachtungssystems, zum Beispiel wenn neue Satellitenkanäle dazu kommen, Inhomogenitäten auftreten, wenn auch in deutlich geringerem Ausmaß als in den operationellen Analysen. In ERA-Interim soll dies durch die variationelle Biaskorrektur der Satellitendaten vermieden werden (Dee and Uppala, 2008; Simmons et al., 2007).

Damit die in die Reanalyse eingehenden Radiosondendaten homogen sind, wurden sie für ERA-Interim mit RAOBCORE (Abschnitt 3.1.9) korrigiert und zusätzlich mit einer sonnenwinkelabhängigen Korrektur für Stationsgruppen versehen um den Jahresgang des Strahlungsfehlers zu korrigieren (Haimberger and Andrae, 2006). In ERA-40 wurden die Radiosondendaten für die Biaskorrektur in 139 Gruppen geteilt. Für jede Gruppe wurden Korrekturen für vier verschiedene Sonnenwinkelklassen aufgrund von Statistiken der Innovationen über mindestens zwölf Monate berechnet. Die Biaskorrektur wurde erst 1980, also ein Jahr nach Beginn der Assimilation von Satellitendaten begonnen und wurde mehrmals aktualisiert. Die antarktischen Stationen wurden aufgrund von Unsicherheiten des Modells in diesem Gebiet nicht korrigiert (Andrae et al., 2004).

Die wichtigsten Verbesserungen in ERA-Interim gegenüber ERA-40 sind:

- verbesserte Datenassimilation durch 12-stündige 4D-Var statt 6-stündige 3D-Var
- erhöhte horizontale Auflösung T255 statt T159, beide Modelle haben 60 Schichten
- neue Feuchteanalysemethode
- bessere Modellphysik
- verbesserte Datenqualitätskontrolle
- variationelle Biaskorrektur für Satellitendaten
- mit RAOBCORE korrigierte Radiosondendaten
- mehr assimilierte Satellitendaten zum Beispiel ERS Wellenhöhendaten, GOME Ozonprofile, CHAMP und COSMIC GPS Radiookkultationsdaten
- verbessertes Strahlungstransfermodell
- biaskorrigierter Bodendruck von SYNOP und SHIP Stationen (Simmons et al., 2007; Uppala, 2006).

## 2.2 Reanalysedaten: ERA-Interim und ERA-40

Die wichtigsten Verbesserungen zeigen sich in der Vorhersagbarkeit auf der Südhalbkugel, im globalen Wasserhaushalt und in der Brewer-Dobson Zirkulation, die in ERA-40 zu stark ausgeprägt war. Dadurch ist in ERA-40 der Ozontransport im Winter zu stark ausgeprägt (Uppala, 2006; Uppala et al., 2005). Die Temperaturen in der unteren Stratosphäre in der Antarktis sind in den ersten Jahren zu tief und später gibt es unrealistische vertikale Strukturen in der Temperatur in der Antarktis und damit auch in den Trends (Uppala et al., 2005). Betrachtet man zonal gemittelte Temperaturtrends, so sieht man, dass die Trends aus ERA-Interim Daten in der Antarktis vertikal deutlich homogener sind als die ERA-40 Daten (Abbildungen 2.1 und 2.2).

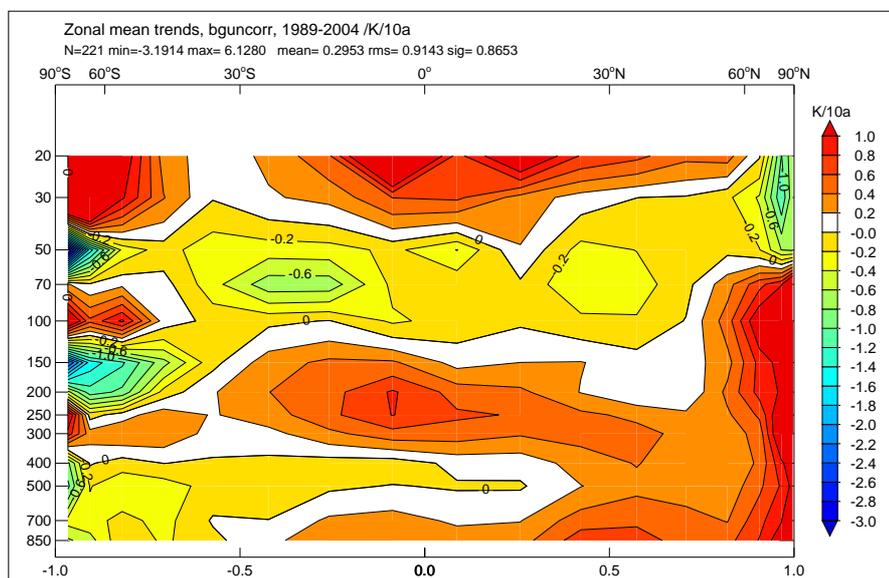


Abbildung 2.1: Zonal gemittelte Temperaturtrends der ERA-40 Backgroundvorhersage 1989-2004.

Die Vorhersagequalität von ERA-Interim gemessen mit der Anomaliekorrelation in 500 hPa ist über den gesamten Zeitraum ähnlich der Qualität der operationellen Vorhersagen um das Jahr 2002 (Dee and Uppala, 2009).

Da die ERA-Interim Daten nur bis 1989 zurück gehen, aber auch ältere Daten homogenisiert werden sollen, werden für diese Zeit ERA-40 Daten verwendet, die mit zwei Überlappungsjahren mit ERA-Interim Daten korrigiert werden um eine Inhomogenität durch den Wechsel zwischen den zwei Datensätzen zu vermeiden.

## 2 Daten

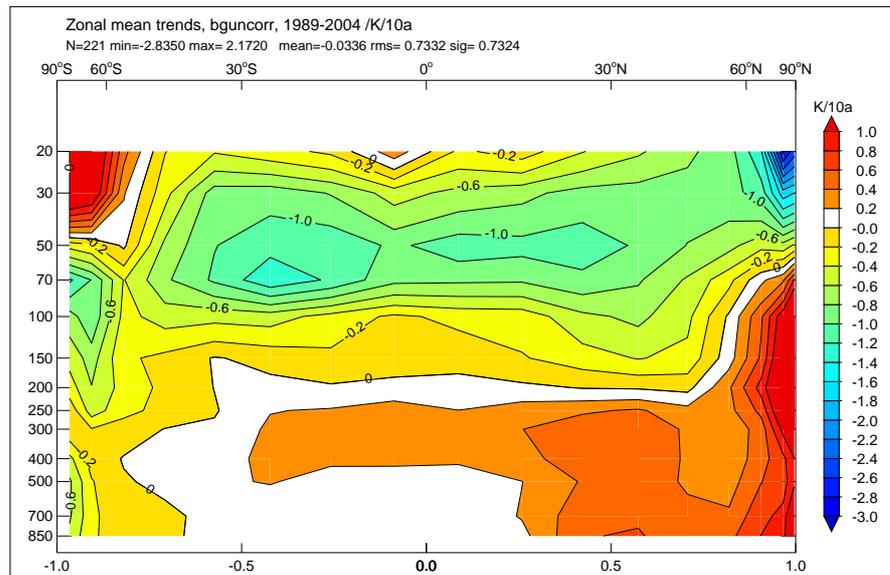


Abbildung 2.2: Zonal gemittelte Temperaturtrends der ERA-Interim Backgroundvorhersage 1989-2004.

## 2.3 Satellitendaten

Beim Vergleich von Radiosondendaten mit Satellitendaten tritt das Problem der Vergleichbarkeit von Punktmessungen mit Flächen- oder Volumenmessungen beziehungsweise von Temperatur- mit Radianz- oder Brechungswinkelmessungen auf. Dazu kommt, dass die Radiosondenstationen nicht gleichmäßig über die Erde verteilt sind. Gerade auf der Südhalbkugel gibt es nur wenige Radiosondenstationen.

### 2.3.1 GPS Radiookkultationsdaten

Bei der GPS Radiookkultationsdaten werden zwei Satelliten benutzt. Einer davon ist ein GPS Navigationssatellit und der andere ein Satellit, der in einem niedrigen Orbit die Erde umkreist (Low Earth Orbit, LEO). Der GPS Satellit sendet zwei Funk-signale mit zwei verschiedenen Wellenlängen aus, die der LEO Satellit empfängt. Wenn ein Satellit aus Sicht des anderen hinter der Erde auf- oder untergeht spricht man von Okkultation. Das Funk-signal passiert dann auf seinem Weg die Atmosphäre und wird dort gebrochen. Durch die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Atmosphäre entsteht eine Phasenverschiebung gegenüber dem theoretischen Signal im Vakuum, das aus der Position der Satelliten berechnet wird. Die Phasenverschiebung im betrachteten Wellenlängenbereich wird von der trockenen Luft, vom Wasserdampf, von Hydrometeoren und von Aerosolen verursacht, wobei die trockene Luft den größten Anteil ausmacht (Blaschek, 2009).

Aus der Phasenverschiebung wird der Brechungswinkel und aus dem Brechungswinkel das Brechungsindexprofil bestimmt. Der Brechungsindex hängt von Temperatur, Wasserdampf und Flüssigwasser in der Atmosphäre sowie von der Elektronendichte in der Ionosphäre ab. Der Anteil der Elektronendichte kann aus der Differenz der beiden Wellenlängen bestimmt werden, da nur dieser Anteil im betrachteten Wellenlängenbereich wellenlängenabhängig ist, der Flüssigwassergehalt wird konstant angenommen. Es bleiben damit die Abhängigkeit von Temperatur und Wasserdampf übrig. Bei einem „dry-retrieval“, wird auch der Wasserdampf vernachlässigt, was dort sehr gut funktioniert, wo wenig Wasserdampf in der Atmosphäre ist, in der Troposphäre aber nicht mehr zulässig ist. Bei einem „wet-retrieval“ wird mit Schätzwerten für den Wasserdampfgehalt iterativ eine Lösung gesucht. Umgekehrt kann in der unteren Troposphäre der Wasserdampf mit Schätzwerten für die Temperatur berechnet werden (Blaschek, 2009). In der Praxis werden in numerischen Modellen Brechungswinkelprofile assimiliert, wobei der Beobachtungsoperator den Brechungswinkel im Modellzustand simuliert (Blaschek, 2009).

Am ECMWF wurden Studien über die Auswirkungen der COSMIC Daten auf die Vorhersagegüte gemacht, wobei positive Auswirkungen auf die Vorhersagen der Stratosphärentemperaturen auf der Südhalbkugel gefunden wurden (Anthes et al., 2008). Da Radiookkultationsmessungen sich auf eine absolute Zeitmessung zurückführen lassen, und diese sehr genau ist, eignen sich GPS RO Messungen auch für Klimabeobachtungen (Anthes et al., 2008). Es gibt allerdings noch keine langen Zeitreihen (ab 2001).

### 2.3.2 MSU Daten

Die MSU (Microwave Sounding Unit) beziehungsweise AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) Instrumente messen die von der Erdatmosphäre emittierte Mikrowellenstrahlung in der Nähe des 60 GHz Sauerstoffabsorptionsbandes. Messinstrumente dieser Art waren ab 1979 auf vielen verschiedenen Satelliten der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) montiert. Um die Daten von verschiedenen Satelliten in einen Datensatz zusammenzufassen, müssen systematische Unterschiede zwischen den Daten von verschiedenen Satelliten korrigiert werden. Korrekturen sind für die „Local Equator Crossing Time“ (LECT), für die temperaturabhängigen Fehler in der Kalibrierung und die Änderung der Höhe des Orbits nötig. Die NOAA Satelliten sinken in drei bis vier Jahren um etwa sieben km, vor allem dann, wenn die Sonnenaktivität hoch ist (Christy et al., 2003, 2000; Vinnikov and Grody, 2003; Mears et al., 2003). Beim Einbeziehen der neueren AMSU Messungen ist eine zusätzliche Korrektur nötig, da die AMSU Instrumente in anderen Frequenzen messen und daher auch geringfügig andere Gewichtsfunktionen haben, wobei die größten Unterschiede im Jahresgang und in den Polargebieten

## 2 Daten

bei „stratospheric warmings“ zu finden sind (Mears and Wentz, 2009).

Die Daten wurden von verschiedenen Gruppen mit verschiedenen Methoden aufbereitet. Ein Datensatz stammt vom Earth System Science Center der University of Alabama in Huntsville (UAH) (Christy et al., 2003), ein anderer von Remote Sensing Systems (RSS) (Mears et al., 2003; Mears and Wentz, 2009).

### UAH

Für den UAH Datensatz wurde zuerst eine Korrektur für die Änderung der Höhe des Orbits gemacht. Dazu wurde mit einem Strahlungsmodell, dem Temperaturprofil, der Höhe des Satelliten und dem Blickwinkel des Satelliten der Effekt des Absinkens berechnet (Christy et al., 2000). Für die TLT und TMT wird eine nicht-lineare Korrektur für die LECT gemacht (Christy et al., 2003, 2000). Als nächstes wird eine Korrektur für die Änderung der Temperatur des „warm target“ gemacht, die neben der Temperatur des Weltalls (2,7 K) zum kalibrieren verwendet wird. Zum Schluss werden die Zeitreihen der verschiedenen Satelliten zusammengehängt und eine einfache Biaskorrektur für die Differenzen zwischen den Satelliten gemacht (Christy et al., 2000).

### RSS

Mit Hilfe von Klimatologien aus NCEP-Reanalysen wurden die Beobachtungen im RSS Datensatz für die verschiedenen Winkel so angepasst, als wären sie alle im Nadir gemessen worden. Dadurch werden gleich alle Änderungen durch die Höhenänderung des Satelliten und Winkeländerungen korrigiert. Zusätzlich wird für die MSU Instrumente eine Korrektur für das Schlingern des Instruments gemacht und für die AMSU Instrumente eine empirische Korrektur für jeden Beobachtungswinkel (Mears and Wentz, 2009). Die Beobachtungen werden mit Hilfe eines Klimamodells so korrigiert, als hätte die Messung zur Mittagszeit stattgefunden um die Änderung der LECT zu korrigieren. Diese Korrektur betrifft vor allem die tieferen Schichten, in denen die Bodenemissionen eine größere Rolle spielen. In einem Gleichungssystem für die Differenzen zwischen den Satelliten werden Faktoren für die monatlichen „brightness-“ und „warm target“ Temperaturen auf einem 2,5x2,5 Grad Gitter und den Bias zwischen den Satelliten berechnet, wobei die Faktoren für den Bias breitenabhängig, jene für die Brightnesstemperatur breiten- und jahreszeitabhängig sind. Ein Bias wird gleich 0 gesetzt, um das System mit Singulärwertzerlegung lösen zu können (Mears and Wentz, 2009). Besonders heikel ist der Faktor für die Temperatur von NOAA9 (Mears et al., 2003). Dort, wo trotz all dieser Korrekturfaktoren noch größere Unterschiede zwischen den Satelliten auftreten, werden die fragwürdigen Daten entfernt. Um die komplette Zeitreihe zu erzeugen, wird in den Monaten in denen mehr als ein Satellit gemessen hat, der

Mittelwert genommen. Um die MSU mit den AMSU Daten zu kombinieren, wurden orts- und jahreszeitabhängige Differenzen gebildet, und diese von den AMSU Daten abgezogen (Mears and Wentz, 2009).

Die größten Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen ergeben sich zwischen 1985 und 1987 zu der Zeit als NOAA9 aktiv war. Die Unterschiede entstehen in erster Linie dadurch, dass beim UAH Datensatz ein Mindestzeitraum definiert wurde, über den zwei Satelliten gleichzeitig messen müssen, um die Überlappungsperiode für die Berechnung der Faktoren für die „warm target“ Temperaturen zu verwenden und beim RSS Datensatz alle Monatsmittelwerte, die es von mindestens zwei verschiedenen Satelliten gibt, verwendet wurden. Die größten Differenzen bei den TLT Trends gibt es auf der Südhalbkugel (Mears et al., 2003). Auch die unterschiedliche Behandlung der „warm target“ Temperatur und des Tagesgangs spielen eine Rolle (Santer et al., 2003). RSS stimmt besser mit Klimamodellen und der Erwärmung aus Bodenbeobachtungen überein (Santer et al., 2003).

Es werden MSU Zeitreihen für drei verschiedene Schichten für Vergleiche verwendet:

- TLS - Temperature Lower Stratosphere hat eine Gewichtsfunktion, sodass 90% der Emissionen aus einer Schicht zwischen 150 hPa und 20 hPa kommen, mit einem Maximum bei 90 hPa. Bei dieser Schicht ist keine Bodeninformation nötig.
- TMT - Temperature Middle Troposphere hat eine Gewichtsfunktion, sodass 90% der Emissionen aus einer Schicht unterhalb von 120 hPa kommen, wobei der Hauptanteil im Bereich von 850 hPa bis 300 hPa liegt (Christy et al., 2003; Tavolato, 2006). Hier ist schon Bodeninformation dabei. Um mit Radiosondendaten vergleichen zu können, braucht man daher auch Bodendaten. Tavolato (2006) hat dazu zwei verschiedene Datensätze verwendet: ECMWF Temperaturanalysen aus ERA-40 beziehungsweise ab 2001 operationelle Analysen und HadCRUT3. Die ERA-40 Daten sind Modelldaten und daher auf einem Gitter verfügbar, die HadCRUT3 Daten sind Beobachtungsdaten, die auf ein Gitter interpoliert wurden. Allerdings sind sie nur dort vorhanden, wo es in der Gitterbox zumindest eine Messstation gibt. In der Antarktis beruhen die HadCRUT3 Bodendaten also meistens nur auf der Messung der Bodenstation bei der jeweiligen Radiosondenstation. Die Bodeninformation muss je nach Oberfläche unterschiedlich gewichtet werden. Über Wasser haben die Bodendaten das geringste Gewicht 8%, etwas mehr Gewicht haben sie über Land 12% und am meisten über Eis 25% (Tavolato, 2006).
- TLT - Temperature Low Troposphere hat eine Gewichtsfunktion, sodass 90% der Emissionen aus einer Schicht unterhalb von 400 hPa kommen (Christy

## *2 Daten*

et al., 2003). In dieser Schicht haben die Bodendaten bereits sehr große Gewichte, die auch stark vom Untergrund abhängen. Das hat zur Folge, dass bei den MSU Daten Probleme am Eisrand auftreten und daher schwer vergleichbar mit antarktischen Radiosondendaten sind, wo sich viele Stationen in der Nähe des Eisrands befinden.

# 3 Methoden

## 3.1 Homogenisierungsmethoden

Es gibt verschiedene Methoden Zeitreihen zu homogenisieren. Es gibt die Möglichkeit nur die Zeitreihe selbst zu verwenden, was aber problematisch ist, da man ohne Wissen über reale Klimaänderungen und natürliche Variabilität unnatürliche Änderungen schwer herausfiltern kann. Meist werden deshalb zusätzlich zumindest Metadaten oder Referenzzeitreihen zum Beispiel von Nachbarstationen verwendet (Peterson et al., 1998). Gaffen et al. (2000) haben gefunden, dass das Entfernen von sprunghaften Änderungen in den Radiosondenzeitreihen mit rein statistischen Methoden auch die Trends entfernt, und daraus geschlossen, dass die klimatologischen Trends nicht linear sind, sondern stufenförmig, und dass man diese mit rein statistischen Homogenisierungsmethoden mit entfernt und daher zusätzlich Metadateninformation oder Information über die natürliche Variabilität beim Homogenisieren verwendet werden sollte. Um eine gute Homogenisierung zu machen, ist es daher wichtig eine gute Referenzzeitreihe zu haben oder zu konstruieren, die das regionale Klima wiedergibt und selbst möglichst homogen ist (Peterson et al., 1998; McCarthy et al., 2008). Viele Homogenitätstests funktionieren mit Differenzzeitreihen zwischen der zu testenden Station und einer Referenzzeitreihe (für Niederschlag werden eher Quotienten verwendet). Manchmal werden auch Differenzzeitreihen zum Vorjahr betrachtet, da eine Instrumentenänderung in dieser Zeitreihe nur die Werte eines Jahres betrifft, während in der originalen Zeitreihe alle darauf folgenden Werte betroffen sind (Peterson et al., 1998).

RAOBCORE verwendet Innovationszeitreihen aus Reanalysedaten, die eine Differenzzeitreihe zwischen der zu testenden Radiosondentemperatur und der Backgroundvorhersage des assimilierenden Modells sind.

Um die Homogenität zu testen gibt es subjektive Methoden, wie zum Beispiel das Betrachten von Plots kumulativer Summen einer zu testenden Station gegen die einer Nachbarstation oder objektive Methoden, meist statistische Methoden, wie zum Beispiel die Potter Methode, Standard Normal Homogenitätstest (Alexandersson and Moberg, 1997), Caussinus-Mestre Technique (Caussinus and Mestre, 2004), Regressionsmodelle (Vincent, 1998) oder Rang Summen Tests (Peterson et al., 1998). Das verwendete Zeitintervall um die Korrekturen zu berechnen ist ebenfalls ein wichtiger Punkt bei der Homogenisierung (Haimberger, 2007; McCar-

### 3 Methoden

thy et al., 2008). Die Temperaturdifferenzen zwischen zwei verschiedenen Radiosondentypen können auch einen Jahresgang haben (Durre et al., 2002).

Laut Thorne et al. (2005a) ist es wichtig, dass verschiedene Arbeitsgruppen unabhängig von einander mit verschiedenen Methoden versuchen Klimadatensätze aus den vorhandenen Beobachtungsdaten zu erzeugen, um durch Vergleich dieser Datensätze die Unsicherheit abschätzen zu können, die durch die Wahl der Methode entsteht. Für die Zukunft wäre es wichtig ein Netzwerk für Referenzmessungen zu betreiben um einen Standard zu haben, mit dem die anderen Messungen korrigiert werden können (Karl et al., 1995).

Hier sollen neben RAOBCORE noch einige andere Methoden vorgestellt werden, die zur Homogenisierung von Radiosondentemperaturdatensätzen verwendet worden sind.

#### 3.1.1 Vergleichsexperimente

Bei Radiosondenvergleichsexperimenten werden mehrere Radiosonden am gleichen Ballon hängend zu verschiedenen Tageszeiten gestartet um die Unterschiede zwischen verschiedenen Instrumententypen bei verschiedenen Sonnenwinkeln zu quantifizieren und diese Differenzen wo entsprechende Metadaten vorhanden sind für Korrekturen zu verwenden. Das wäre eine gute Idee, wenn es vollständige und genaue Metadaten zu allen Stationen und eine internationale Referenzradiosonde gäbe. Allerdings gibt es für viele Stationen keine oder nur unvollständige Metadaten, wodurch eine Korrektur, die sich ausschließlich auf die Dokumentation der Stationen stützt problematisch ist (Sherwood et al., 2005). Selbst wenn Radiosondenwechsel dokumentiert sind müssen die Radiosondentypen, die vor und nach dem Wechsel verwendet wurden, bei einem Vergleichsexperiment verglichen worden sein (Sperka, 2007). Die bei Vergleichsexperimenten ermittelten Differenzen sind mit großen statistischen Unsicherheiten behaftet, da nur eine kleine Anzahl von Aufstiegen pro Sonnenwinkelbereich gemacht wird (Sperka, 2007). Elliott et al. (2002) haben bei ihrer Untersuchung über den Wechsel von VIZ zu Vaisala Sonden an verschiedenen amerikanischen Stationen festgestellt, dass die Differenzen zwischen den verschiedenen Gerätetypen von der Region und der Jahreszeit abhängen. Es können nur Inhomogenitäten durch Radiosondentypänderungen korrigiert werden, Inhomogenitäten durch andere Änderungen können nicht berücksichtigt werden.

#### 3.1.2 Physikalisch begründete Methode von Luers und Eskridge

Bei der physikalisch begründeten Methode von Luers und Eskridge werden nur Strahlungsfehler und Fehler aufgrund der Reaktionszeit des Temperatursensors

korrigiert, andere Ursachen für Inhomogenitäten wie zum Beispiel eine Änderung der Beobachtungszeit, des Standortes, des Ballons oder der Länge der Ballonschnur werden nicht berücksichtigt. Es wird ein numerisches Modell verwendet um die Wärmebilanz des Sensors zu simulieren. Die vom Sensor gemeldete Temperatur wird dann durch eine vom Modell vorhergesagte Temperatur ersetzt. Als Eingangsdaten braucht dieses Modell die geometrischen und thermischen Eigenschaften des Sensors, die gemessenen Temperatur- und Feuchteprofile, die Startzeit, die Aufstiegs geschwindigkeit, die Position, die Albedo, Menge und vertikale Verteilung von Wolken und Aerosol und welche Strahlungskorrektur bereits von der Bodenstation der Radiosonde mit vom Hersteller bereitgestellten Korrektur tabellen oder Software gemacht worden ist (Durre et al., 2002). Diese lange Liste an benötigten Daten stellt eine Schwachstelle der Methode dar. Wenn die Informationen nicht verfügbar sind, müssen Annahmen darüber gemacht werden. Dafür kommt die Methode ohne Statistik und Satellitendaten aus (Durre et al., 2002). Durre et al. (2002) zeigen in ihrem Vergleich mit Satellitendaten, dass wesentliche Inhomogenitäten durch die Methode von Luers und Eskridge nicht korrigiert werden.

#### 3.1.3 Methoden mit Rangsummentests

Gaffen et al. (2000) hat dort wo bei einer Station ein Radiosondenwechsel dokumentiert ist, den Wilcoxon signed-rank test (Lanzante, 1996) angewandt um herauszufinden, ob es einen signifikanten Sprung in der Zeitreihe gibt. Wenn der gleiche Radiosondenwechsel an mehreren Stationen auftritt, werden diese gemeinsam betrachtet. Wird an mehr als der Hälfte der betrachteten Druckniveaus ein signifikanter Sprung gefunden, so wird eine Korrektur gemacht und zwar in der Größe der Differenz zwischen dem Median der monatlichen Temperaturanomalien fünf Jahre vor und nach dem Sprung, wobei die sechs Monate um den Sprung herum ausgelassen werden, um Unsicherheiten bei der Dokumentation zu berücksichtigen. Die vertikale Konsistenz der Korrekturen wird nicht berücksichtigt (Gaffen et al., 2000).

Eine ähnliche Methode mit Rangsummentest hat Marshall (2002) auf vier antarktische Stationen (Mawson, Davis, Casey und Halley Bay) angewandt, hat damit allerdings nur in den Zeitserien für das höchste betrachtete Niveau (100 hPa) jeweils einen signifikanten Bruch Anfang der 80er Jahre gefunden, der aber mit der starken Abkühlung im Frühling durch die Abnahme des stratosphärischen Ozons zu tun hatte. Daraus könnte man nun schließen, dass die Zeitserien homogen sind, was angesichts von mindestens fünf dokumentierten Radiosondenwechsel pro Station eher unwahrscheinlich ist oder man kann sich fragen, wie gut die Methode ist und ob Peterson et al. (1998) nicht recht hat, wenn er meint, dass es problematisch sei nur die Stationszeitreihen alleine ohne Metadaten und Referenzzeitreihen zu verwenden.

#### 3.1.4 Methode von Lanzante, Klein und Seidel (LKS)

Lanzante et al. (2003a) haben einen viel verwendeten homogenisierten Radiosondentemperaturdatensatz mit 87 Stationen von 1958 bis 1997 erzeugt, der allerdings den Nachteil hat, dass die Methode nicht automatisiert wurde und der Datensatz daher nicht ohne großen Aufwand auf dem neuesten Stand gehalten werden kann.

Zuerst werden aus den Daten Monatsmittel auf sechzehn Standarddruckflächen gebildet. Statt dem arithmetischen Mittel wird der „biweight mean“ (Lanzante, 1996) und zum Auffinden von Brüchen der Wilcoxon signed-rank test (Lanzante, 1996) verwendet. Neben den ursprünglichen Temperaturzeitreihen werden auch geglättete Zeitreihen, Differenzzeitreihen zwischen 00:00 UTC- und 12:00 UTC Aufstiegen, die vertikale Struktur und manchmal auch Zeitreihen von umliegenden Stationen betrachtet. Weiters werden fallweise Zeitserien des Southern Oscillation Index und Daten von Vulkanausbrüchen verwendet.

Um die Größe der Korrekturen zu berechnen werden zwei verschiedene Methoden verwendet. Bei der ersten Methode wird die Differenz der Mittelwerte vor und nach dem Bruch als Korrektur genommen, bei der zweiten Methode wird die Zeitserie in einem Druckniveau so korrigiert, dass die größtmögliche Ähnlichkeit zu stark korrelierten Referenzniveaus entsteht. Daten, die als nicht korrigierbar betrachtet werden, werden gelöscht (Lanzante et al., 2003a).

Für etwa die Hälfte der gefundenen Brüche gibt es keine passenden Metadateneinträge (Free et al., 2005).

Die Korrekturen führen zu größerer Erwärmung in der Troposphäre und 10% weniger Abkühlung in der Stratosphäre verglichen mit den unkorrigierten Daten und die Trendprofile in den Tropen werden den theoretischen Erwartungen ähnlicher (Lanzante et al., 2003b). Lanzante et al. (2003b) haben für die antarktischen Stationen verglichen mit Stationen aus anderen Regionen sehr wenige Korrekturen gemacht.

#### 3.1.5 First Difference Methode

Bei der First Difference Methode werden Differenzzeitreihen von Monatsmitteln, zum Beispiel die Jännertemperatur dieses Jahres minus der Jännertemperatur des letzten Jahres, betrachtet. In solchen Differenzzeitserien ist von einem künstlichen Sprung nur ein Jahr betroffen. Lässt man dieses Jahr weg und kombiniert die Differenzzeitserien eines Gebietes, so bekommt man eine homogene Zeitserie ohne die Größe der Sprünge explizit berechnen zu müssen. Die Nachteile sind, dass zusätzliche zufällige Fehler erzeugt werden können, dass man Metadaten braucht um zu wissen, welche Daten ausgelassen werden müssen, dass es Probleme gibt, wenn in einer Region alle oder fast alle Stationen zur gleichen Zeit Sprünge haben und dass man keine einzelnen Zeitreihen homogenisieren kann, sondern nur über

größere Gebiete gemittelte Zeitreihen bekommt (Free et al., 2004).

#### 3.1.6 Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing Climate (RATPAC)

Für RATPAC-B werden die Zeitserien von Lanzante, Klein und Seidel (LKS (Lanzante et al., 2003a) oder Abschnitt 3.1.4) mit Daten aus der IGRA Datenbank bis 2004 verlängert, ohne für diese Zeit Korrekturen zu machen. Es werden nur die monatlichen Differenzen zwischen IGRA und LKS der Jahre 1996 bis 1997 zu den IGRA Daten addiert um eine zusätzliche Inhomogenität 1997 zu vermeiden (Free et al., 2005).

Für RATPAC-A werden die LKS Zeitserien ebenfalls mit den Daten aus dem IGRA Archiv verlängert, allerdings werden diese ab 1996 mit der First Difference Methode homogenisiert. Dazu werden jeweils sechs Monate Daten vor und nach einem Metadaten Eintrag entfernt, wobei zu bemerken ist, dass es nur für 38 der 85 verwendeten Stationen Metadateninformation nach 1995 gab und für 29 Stationen Daten aufgrund von Metadateninformation entfernt wurden (Free et al., 2005).

Für RATPAC-lite werden 47 Stationen aus dem RATPAC-B Datensatz ausgewählt, bei denen der Trend (1979-2005) der Differenzzeitreihe zwischen MSU und Radiosondenzeitreihe nicht größer als 0,3 K pro Dekade ist (Randel et al., 2009).

#### 3.1.7 HadAT

Für den HadAT Datensatz (Thorne et al., 2005b) werden für die Homogenisierung qualitätskontrollierte Nachbarstationen verwendet. Dabei wird angenommen, dass zumindest ein Teil der Stationen keine großen Inhomogenitäten enthält und dass die vorhandenen Inhomogenitäten zufällig verteilt sind was Größe, Vorzeichen und Zeitpunkt betrifft und damit durch die Mittelung über mehrere Stationen reduziert werden.

Aus den NCEP Reanalysen werden für alle Gitterboxen in denen sich Radiosondenstationen befinden Korrelationen gebildet und für jede Box ein zusammenhängendes Gebiet festgelegt, in dem die Korrelation größer als  $\frac{1}{e}$  für die jährlichen Anomalien der Schichtdicke der Troposphäre und Stratosphäre ist, wobei die Form des Gebietes keine Rolle spielt. Für jede Station werden alle GUAN und LKS Stationen in dem Gebiet gesucht und aus ihnen ein mit der Korrelation gewichtetes Mittel gebildet und als Referenzzeitreihe verwendet. Stationen, bei denen die Korrelation mit der Referenzzeitreihe deutlich niedriger ist als erwartet, werden nicht weiter verwendet. Der so qualitätskontrollierte Datensatz wird als HadAT0 bezeichnet.

Nach dem gleichen Prinzip werden saisonale Referenzzeitreihen aus den HadAT0

### 3 Methoden

Zeitreihen für alle neun betrachteten Druckniveaus gebildet. Für jedes Niveau werden Differenzzeitreihen zwischen der betrachteten Stationszeitreihe und der Referenzzeitreihe gebildet. Mit dem nicht parametrischen Kolmogorov-Smirnov Test werden mögliche Bruchpunkte gesucht. Bei dem Test wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass die Daten fünfzehn Saisons vor und nach einem potenziellen Bruchpunkt aus der selben Grundgesamtheit stammen. Die Stellen, wo die Wahrscheinlichkeit kleiner als 10% ist, werden bei Plots eingefärbt und vom Autor die Stellen gesucht, wo die niedrigen Wahrscheinlichkeiten in mehreren Niveaus gleichzeitig auftreten. Um das exakte Datum zu definieren, werden Metadaten gesichtet und dann (subjektiv) entschieden, ob es genug Anhaltspunkte für einen Bruch gibt. Wenn das der Fall ist, wird mit Hilfe eines Bootstrap Verfahrens die Korrektur als Differenz der Mittelwerte vor und nach dem Bruchpunkt berechnet. Es werden 1000 zusätzliche Differenzzeitreihen erzeugt, wobei zufällig bis zu 40% der ursprünglichen Differenzzeitreihe weggelassen werden. Dadurch bekommt man eine Verteilung von Korrekturen, wobei diese mehr als ein Maximum hat, wenn sich fragwürdige Werte in dem betrachteten Abschnitt der Zeitserie befinden. Wenn das 5. und 95. Perzentil das gleiche Vorzeichen haben das heißt die Korrektur signifikant verschieden von Null ist und die Verteilung ungefähr einer Normalverteilung entspricht wird der Median als Korrektur genommen, sonst wird keine Korrektur gemacht.

Nachdem die ersten besonders signifikanten Brüche korrigiert wurden, werden die Referenz- und Differenzzeitreihen neu berechnet und die Prozedur insgesamt fünf Mal wiederholt. Am Ende werden noch Ausreißer entfernt. Im Durchschnitt werden pro 45-jähriger Zeitreihe sechs Brüche korrigiert. Für 70% gibt es keine Metadaten. Der entstandene Datensatz wird HadAT1 genannt. Aus den HadAT1 Stationen werden Referenzzeitreihen für weitere Stationen gebildet, die nach dem gleichen Prinzip homogenisiert werden. Der entstandene Datensatz HadAT2 enthält 676 Stationen (Thorne et al., 2005b).

McCarthy et al. (2008) haben die Methode automatisiert und Ensemble Experimente mit künstlichen aus Modelldaten generierten, und realen Daten gemacht, um zu schauen, wie gut die Methode funktioniert, die effektivsten Parameterwerte zu ermitteln und die Unsicherheit abzuschätzen. Das System findet einen großen Teil der Brüche, wobei die Erkennungsrate ohne Metadaten oder mit mehr Brüchen pro Zeitreihe merklich sinkt. Wenn die Brüche vorwiegend gleiche Vorzeichen haben, werden die Bruchgrößen unterschätzt. In diesem Fall werden die Fehler in den Trends zwar verkleinert aber nicht vollständig korrigiert. Kürzere Mitteilungintervalle für die Bruchgrößenbestimmung wirken sich, vor allem wenn es viele Brüche gibt, positiv aus (McCarthy et al., 2008). Weitere Tests von Tichner et al. (2009) haben ergeben, dass die Methode bei dichtem Stationsnetz, also zum Beispiel für die Aufstiege bei Tag auf der Nordhalbkugel, den systematischen

Fehler reduziert, aber nicht vollständig entfernt und dass die Möglichkeit den wahren Trend wieder herzustellen, von der Struktur der Fehler abhängt. Wenn es ein Netzwerk homogener Stationen gibt, die als Referenzzeitreihen verwendet werden können, funktioniert die Methode besser. Tests dieser Art gibt es für andere Methoden noch nicht, sind aber in Zukunft zumindest für RAOBCORE und RICH geplant.

#### 3.1.8 Iterative Universal Kriging (IUK)

Bei der IUK Methode wird ein statistisches Modell iterativ an die monatlichen Radiosondendaten angepasst, das sowohl natürliche Klimavariabilität als auch Stufenfunktionen für den Bias der Instrumente enthält (Santer et al., 2008; Sherwood et al., 2008). Sherwood (2007) meint, dass Homogenisierungsmethoden, die zuerst künstliche Sprünge entfernen und dann erst Trends berechnen dazu neigen neben den Sprüngen auch Teile des Trends zu entfernen und stellt mit dem Iterative Universal Kriging (IUK) eine Methode vor, bei der Sprünge und Trends gleichzeitig geschätzt werden. Um die natürliche Variabilität im Modell zu repräsentieren, werden Empirische Orthogonal Funktionen verwendet, die aus den Beobachtungsdaten gewonnen werden. Da diese von Artefakten in den Daten beeinflusst werden, werden die EOFs iterativ angepasst. Nach einigen Iterationen werden dann nicht mehr die Funktionen selbst sondern nur noch ihre Amplituden angepasst (Sherwood, 2007).

Um die Zeitpunkte der Sprünge zu finden, wird der nicht parametrische Mann-Wilcoxon-Whitney Test und eine „Two-Phase Regression“ verwendet (Sherwood, 2007; Sherwood et al., 2008). Um das finden falscher Sprünge zu vermeiden, werden ein „Signal to Noise“ Test und ein „Step vs. Trend“ Test verwendet, wobei das Verhältnis der durch den Sprung erklärten Varianz zu der durch Variabilität erklärten beziehungsweise zu der durch einen Trend erklärten Varianz betrachtet wird (Sherwood, 2007). Zuerst werden Sprünge in den 00:00-12:00 UTC Differenzzeitreihen jahreszeitabhängig korrigiert, und der Tagesgang empirisch entfernt. Dann werden mit den zwei genannten statistischen Tests Bruchpunkte gesucht, die nur berücksichtigt werden wenn sie über mindestens vier Schichten kohärent sind. Nachdem das Modell aufgrund der vorhandenen Daten angepasst wurde, werden fehlende Daten mit dem Modell modelliert und die Anpassung des Modells inklusive der modellierten Daten wiederholt (Sherwood et al., 2008). Bei dieser Methode werden keine Referenzzeitreihen oder Metadaten verwendet, 23% der entdeckten Brüche stimmen zeitlich mit dokumentierten Metadatenevents überein (Sherwood et al., 2008). Dieser Wert stimmt sehr gut mit anderen automatisierten, auf statistischen Tests basierenden Methoden überein. Ein Problem bei dieser Methode ist, dass die EOFs die längerfristige Variabilität (Jahrzehnte) nicht gut erfassen, und diese dann zu den Stufenfunktionen dazu kommt (Sher-

wood et al., 2008). Die räumliche Homogenität der Trends wird durch die Methode nicht verbessert, die zonalen Mittel jedoch schon (Sherwood et al., 2008).

### 3.1.9 RAOBCORE

RAOBCORE (RADiosonde OBServation COrrrection using REanalysis), (Haimberger, 2005, 2006a, 2007) ist eine am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien entwickelte automatisierte Homogenisierungsmethode, die Innovationen aus Reanalysen zum Auffinden und Korrigieren von Brüchen verwendet, wobei angenommen wird, dass die Zeitreihe der Innovationen stationär ist und dass dort wo sie das nicht ist, ein künstlicher Sprung entweder in den Beobachtungen oder in der Background Vorhersage sein muss (Haimberger, 2005). 00:00 UTC und 12:00 UTC Aufstiege werden getrennt auf sechzehn Standarddruckflächen homogenisiert. Alle Aufstiege zwischen 21:00 und 03:00 UTC werden zu einer Zeitreihe der 00:00 UTC Aufstiege zusammengefasst, alle Aufstiege zwischen 09:00 und 15:00 UTC zu einer der 12:00 UTC Aufstiege. Bisher wurden für RAOBCORE ERA-40 Innovationen verwendet. Die ERA-40 Backgroundvorhersagen weisen allerdings vor allem in der antarktischen Stratosphäre unrealistisch starke und vertikal inhomogene Trends auf, was sich negativ auf die Qualität der Homogenisierung in der Antarktis auswirkt. Es konnte bereits gezeigt werden (Simmons et al., 2007), dass ERA-Interim in den Polargebieten homogenere Vertikalprofile der Trends hat als ERA-40 (siehe auch Abbildungen 2.1 und 2.2). Deshalb soll nun ein Radiosonden-temperaturdatensatz erstellt werden, der bis 1989 mit ERA-Interim- und davor mit ERA-40 Innovationen korrigiert ist. Um einen Sprung in der Referenzzeitreihe zu vermeiden, werden die ERA-40 Innovationen mit den mittleren Differenzen aus zwei Überlappungsjahren an die ERA-Interim Innovationen angepasst.

Zuerst werden in RAOBCORE Differenzzeitreihen zwischen dem 00:00 UTC und dem 12:00 UTC Aufstieg in der Stratosphäre (zwischen 20 hPa und 200 hPa) betrachtet. Lanzante et al. (2003a), Sherwood et al. (2005) und Randel and Wu (2006) haben gefunden, dass diese Differenzen gut geeignet sind um Radiosondenwechsel zu lokalisieren. Wenn der eine Aufstieg am Tag und der andere in der Nacht ist, und es ändert sich der systematische Strahlungsfehler, dann hat die Differenzzeitreihe einen Sprung. Die Voraussetzung, dass ein Aufstieg am Tag und einer in der Nacht sein sollte, wird problematischer je weiter die Station in Polnähe oder in der Nähe von 90° Ost oder West liegt. Aus den Differenzzeitreihen benachbarter Druckniveaus wird ein mit dem Logarithmus des Drucks gewichtetes Mittel gebildet und darauf eine Variante des Standard Normal Homogeneity Tests (SNHT) (Alexandersson and Moberg, 1997) angewandt und die Testgröße  $T_k$  berechnet.

$$T_k = \frac{\left[ \frac{N}{2} (\mu_{1k} - \mu)^2 + \frac{N}{2} (\mu_{2k} - \mu)^2 \right]}{\sigma_k} \quad (3.1)$$

Dabei ist  $k$  der gerade betrachtete Punkt der Zeitreihe,  $\mu$  der Mittelwert im betrachteten Intervall der Länge  $N$  (sechzehn Jahre),  $\mu_{1k}$  der Mittelwert vor dem Punkt  $k$ ,  $\mu_{2k}$  der Mittelwert nach dem Punkt  $k$  und  $\sigma_k$  die Standardabweichung. Dabei wird darauf geachtet, dass Werte zu verschiedenen Jahreszeiten in den Mittelwerten vor und nach dem Punkt  $k$  in gleichem Ausmaß vertreten sind (equal sampling SNHT). Anschließend wird für jeden Zeitpunkt  $k$  das Maximum der Testgröße  $T_k$  aus allen nun berechneten Teststatistikzeitserien für die Mittel zweier benachbarter Druckniveaus gesucht.

$$T_{kmax} = \max(T_k) \quad (3.2)$$

Als nächstes werden die Zeitreihen der Innovationen betrachtet. Die Innovationen sind ein Produkt, das bei der Datenassimilation anfällt. Bei der Datenassimilation wird eine Kostenfunktion der Form

$$J(x) = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + (y - Hx)^T R^{-1} (y - Hx) \quad (3.3)$$

minimiert, wobei  $x$  der Zustandsvektor des Modells ist,  $x_b$  der Zustandsvektor der Background Vorhersage,  $y$  der Beobachtungsvektor,  $H$  der Beobachtungsoperator und  $B$  und  $R$  die Background- bzw. Beobachtungsfehlerkovarianzmatrix. Der Beobachtungsoperator ist im Fall von Radiosondentemperaturen nur eine lineare Interpolation des Modellzustands zum Beobachtungsort. Am Beginn des Minimierungsprozesses ist  $x = x_b$ , womit der erste Term Null ist. Die  $(y - Hx_b)$  werden als Innovationen bezeichnet (Haimberger, 2007). Die Innovationen haben sich als nützlich erwiesen um systematische Beobachtungsfehler zu finden (Haimberger, 2005). Mit den Innovationszeitreihen für 00:00 UTC und 12:00 UTC wird wie mit den Differenzzeitreihen zwischen dem 00:00 UTC und dem 12:00 UTC Aufstiegsverfahren. Es werden wieder gewichtete Mittel über benachbarte Schichten in der Stratosphäre gebildet und  $T_k$  beziehungsweise  $T_{kmax}$  berechnet.  $T_k$  und  $T_{kmax}$  werden auch für die troposphärischen Schichten zwischen 300 hPa und 850 hPa bestimmt (Haimberger, 2005, 2007).

Als nächstes werden Bruchwahrscheinlichkeiten berechnet, wobei die sich aus der Teststatistik ergebende Wahrscheinlichkeit mit vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten aufgrund von Metadateninformation aus dem CARDS Projekt kombiniert wird. Wenn ein Radiosondenwechsel dokumentiert ist, ist die a priori Wahrscheinlichkeit 0,96, bei geänderter Strahlungskorrektur 0,5 und dort wo keine Metadateninformation vorhanden ist 0,02. Wenn Radiosonden ihren Radiosondentyp melden und diese Information vorhanden ist, wird dort wo laut den Radiosondenmeldungen kein Wechsel stattgefunden hat die Wahrscheinlichkeit auf 0,01 gesetzt (Haimberger, 2007).

Wenn die fünf Wahrscheinlichkeitszeitreihen widersprüchliche Informationen bezüglich des Zeitpunktes eines Bruchs enthalten, dann bekommt die Zeitserie der

### 3 Methoden

Differenzen zwischen 00:00 UTC und 12:00 UTC Beobachtung das größte Gewicht (Haimberger, 2007).

Die Bruchgröße wird aus der Differenz der Mittelwerte der Innovationen vor und nach dem Bruch in den einzelnen Druckniveaus berechnet,  $(\mu_{k1} - \mu_{k2})$  wobei  $\mu_{k1}$  und  $\mu_{k2}$  Mittelwerte über acht Jahre sind, falls kein weiterer Bruchpunkt in diesem Zeitraum auftritt. Tritt ein weiterer Bruch auf, wird der Zeitraum für die Mittelbildung verkürzt. Es wird dabei darauf geachtet, dass der Jahresgang in beiden Mittelwerten gleich vorhanden ist (equal sampling) (Haimberger, 2005, 2007).

Zuerst werden nur die Zeitreihen von Radiosondenstationen homogenisiert, bei denen bekannt ist, dass sie mit guten Geräten arbeiten wie zum Beispiel von Vaisala oder Meisei. Danach werden die Zeitreihen aller anderen Radiosondenstationen homogenisiert, wobei nachdem in den 00:00 - 12:00 UTC Zeitreihen und den Innovationszeitreihen ein Bruch lokalisiert wurde noch eine Differenz zu einem Mittel aus umliegenden im ersten Schritt homogenisierten Radiosondentemperaturzeitreihen betrachtet wird, um zu sehen, ob der Bruch ein Problem der Radiosonde oder der Backgroundvorhersage ist. Wird in der Zeitreihe der Differenzen zwischen der betrachteten Zeitreihe und dem Mittel aus umliegenden Stationen kein signifikantes Maximum in der Teststatistik (Gleichung 3.1) gefunden, so wird keine Korrektur gemacht.

Um die Gefahr zu reduzieren, dass Inhomogenitäten in der Backgroundvorhersage zu falschen Korrekturen führen, wird bevor die Zeitreihen analysiert werden das mit der Radiosondendichte gewichtete globale Mittel der Innovationen von jeder Zeitreihe abgezogen. Dadurch wird die Anzahl der gefundenen Brüche leicht reduziert und die räumliche Konsistenz der Trends verbessert (Haimberger, 2005, 2007).

#### **Anpassung der Klimatologien**

Selbst nach der Homogenisierung kann es sein, dass Radiosondendaten noch immer einen Bias haben. Das ist dann der Fall, wenn auch die neuesten Daten einen Bias haben. Auch dafür wird von RAOBCORE eine Korrektur gemacht. Es wurden 342 Radiosondenstationen ausgewählt, die dafür bekannt sind, dass sie sehr gute Messgeräte verwenden, diese bilden eine Referenz für die Korrektur der anderen Stationen. Dabei wird ein gewichtetes Mittel der letzten acht Jahre aus den Innovationen der umliegenden Stationen in einem Umkreis von 3000 km gebildet und mit dem Mittel der betrachteten Station verglichen. Die Differenz dieser beiden Mittelwerte wird zur Korrektur der Klimatologie verwendet (Haimberger, 2007). Diese Korrektur kann natürlich nur für Stationen gemacht werden bei denen sich genügend Referenzstationen in 3000 km Umkreis befinden.

Sowohl die Trends als auch die Differenzen zwischen 00:00 UTC und 12:00 UTC

Beobachtung sind bei den mit RAOBCORE korrigierten Daten räumlich homogener als bei den unkorrigierten (Haimberger, 2006b). Etwa 30 Prozent der korrigierten Brüche korrelieren mit Metadaten (Haimberger, 2005). Ähnliche Werte erhalten auch Thorne et al. (2005b) für die HadAT Methode und Sherwood et al. (2008) für IUK.

### 3.1.10 RICH

RICH verwendet die mit RAOBCORE gefundenen Brüche in den Radiosondentemperaturzeitreihen, aber die Korrekturen werden nicht aus den Innovationen sondern aus gewichteten Temperaturanomaliedifferenzen zu umliegenden, im betrachteten Zeitraum homogenen, Stationen berechnet um eine Homogenisierungsmethode zu haben, bei der die Korrekturen, oder zumindest die Größe der Korrekturen unabhängig von Satellitendaten sind (Haimberger et al., 2008; Sperka, 2007). Als homogen werden dabei die Zeitserien ab drei Monate nach einem Bruch bis drei Monate vor dem nächsten Bruch angenommen. Es werden höchstens acht umliegende Stationen verwendet damit die Distanz zwischen den Stationen nicht zu groß wird. Die Temperaturanomalien der umliegenden Stationen werden mit dem Abstand gewichtet, wobei ein Abstand in meridionaler Richtung höher gewichtet wird als einer in zonaler Richtung (Haimberger et al., 2008).

In Regionen mit großer Radiosondendichte funktioniert die Methode sehr gut und liefert sehr ähnliche Ergebnisse wie RAOBCORE was die räumliche Konsistenz der Trends und auch die zonal gemittelten Trends betrifft. Auf der Südhalbkugel in den Extratropen, wo die Stationsdichte nicht sehr groß ist, sind die Ergebnisse deutlich schlechter (Haimberger et al., 2008). Dafür werden die RICH Korrekturen weniger von den Unsicherheiten in der Backgroundvorhersage beeinflusst als die RAOBCORE Korrekturen (Sperka, 2007).

## 3.2 Vergleiche

### 3.2.1 Vergleiche von homogenisierten Radiosondentemperaturdatensätzen

Es gibt einige Arbeiten, die verschiedene homogenisierte Radiosondentemperaturdatensätze oder Homogenisierungsmethoden verglichen haben. Zum Beispiel haben Gaffen et al. (2000) gefunden, dass statistische Methoden, die unterschiedliche Tests verwenden in der Lage sind die größten Brüche zu finden, wobei die Zeitpunkte übereinstimmen, die berechnete Bruchgröße jedoch oft unterschiedlich ist. Bei kleineren Brüchen sind sich die Methoden oft nicht einig.

### 3 Methoden

Free et al. (2002) haben verschiedene Homogenisierungsmethoden an Hand von zwölf ausgewählten Stationen verglichen, darunter die Methode von Luers und Eskridge (Abschnitt 3.1.2) und die von Lanzante, Klein und Seidel (Abschnitt 3.1.4). Obwohl alle Methoden die gleiche Metadatenbank verwendeten, gab es wenig Übereinstimmungen was die Zeitpunkte der Korrekturen betrifft und selbst dort, wo es Einigkeit über den Zeitpunkt gab, war Größe und Vorzeichen der Korrekturen unterschiedlich, was ein Zeichen für große strukturelle Unsicherheiten ist.

Free et al. (2004) haben die First Difference Methode (Abschnitt 3.1.5) und LKS (Abschnitt 3.1.4) verglichen. Die globalen Jahresmittel sind bei beiden Methoden ähnlich, allerdings ist der Standardfehler bei der First Difference Methode größer. Für Hemisphärenmittel sind die Differenzen zwischen den zwei Methoden bereits deutlich größer. Je weniger Zeitserien gemittelt werden und je mehr Lücken (durch fehlende Messungen oder entfernte Sprünge) in den Zeitreihen sind, desto größer wird der Fehler (Free et al., 2004).

Tavolato (2006) hat verschiedene homogenisierte Radiosondentemperaturdatensätze verglichen. Sie konnte zeigen, dass neuere homogenisierte Radiosondentemperaturdatensätze wie RAOBCORE (Abschnitt 3.1.9) oder HadAT2 (Abschnitt 3.1.7), die viele Stationen beinhalten, mehr Ähnlichkeit mit den Satellitendatensätzen aufweisen als ältere Radiosondentemperaturdatensätze.

Sperka (2007) hat gefunden, dass es für manche Stationen Übereinstimmungen zwischen den RAOBCORE Korrekturen und den durch Vergleichsexperimente gefundenen Korrekturen gibt, an manchen anderen Stationen die Korrekturen aber sehr verschieden sind. Es hat sich allerdings als schwierig erwiesen dokumentierte Radiosondenwechsel zu finden, bei denen zwischen zwei Instrumenten gewechselt wurde, die bei einem Vergleichsexperiment dabei waren.

#### 3.2.2 Vergleich MSU - Radiosonden

Beim Vergleich von Radiosondendaten mit MSU Daten ist es wichtig mit Hilfe von Gewichtsfunktionen MSU äquivalente Radiosondentemperaturen zu berechnen und das unterschiedliche Sampling der beiden Datensätze zu berücksichtigen (Ramaswamy et al., 2001; Santer et al., 2000a). Dennoch entstehen große Unsicherheiten beim Vergleich von Trends aus diesen beiden Datenquellen (Santer et al., 2000a).

Lanzante et al. (2003b) haben die Trends der mit ihrer Methode (LKS, Abschnitt 3.1.4) korrigierten Radiosondentemperaturzeitreihen mit MSU Trends verglichen (MSU UAH Version d (4)) und für die antarktischen Stationen große Unterschiede in den Trends gefunden, wobei als Ursache dafür sowohl mangelnde Korrekturen der Radiosonden, als auch für die Region am Eisrand nicht passende Gewichtsfunktionen oder schlechte Anpassung der MSU Zeitreihen beim Übergang von einem Satellit zum nächsten in Frage kommen.

Haimberger et al. (2008) haben gefunden, dass global gesehen die mit RAOBCORE oder RICH korrigierten Radiosondendaten deutlich besser mit den MSU Daten übereinstimmen als die unkorrigierten. In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob das auch für einzelne antarktische Stationen zutrifft.

Tichner et al. (2009) haben die TLT Trends in den Tropen für verschiedene Radiosonden- und Satellitentemperaturdatensätze sowie Erwartungen aus Klimamodellen verglichen. Bei diesem Vergleich liegt nur RSS im Bereich der Modellerwartungen. Von den Radiosondendatensätzen ist RAOBCORE am nächsten an den Erwartungen, wobei die für HadAT2 in dieser Studie abgeschätzte strukturelle Unsicherheit so groß ist, dass die Differenz zwischen HadAT2 und RSS keine Inkonsistenz bedeuten muss. Für die anderen Radiosondendatensätze gibt es solche Abschätzungen noch nicht, es ist aber anzunehmen, dass auch bei anderen Methoden die strukturelle Unsicherheit groß genug ist, dass es keine Inkonsistenz mit den Modellerwartungen gibt.

Für den Vergleich mit MSU Satellitendaten werden in Kapitel 5 der RSS 3.2 und der UAH 5.1, beziehungsweise 5.2 für die TLT, Datensatz verwendet, die aus den gleichen Rohdaten erzeugt wurden wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben. Um Radiosondendaten mit MSU Daten vergleichen zu können, werden MSU äquivalente Schichtmittel mit den Gewichtsfunktionen der entsprechenden MSU Kanäle gebildet (Haimberger et al., 2008; Tavolato, 2006). Bei der TMT und bei der TLT Schicht wird Bodeninformation benötigt. Hier werden zwei verschiedene Datensätze verwendet: ECMWF Reanalysen und der Bodentemperaturdatensatz des Hadley Centers HadCRUT3. Es werden Monatsmittel für die 00:00 UTC und die 12:00 UTC Zeitreihen getrennt gebildet und Anomalien bezüglich 1979-1998 betrachtet. Zum Vergleich mit Radiosondenzeitreihen wird der nächste Gitterpunkt der MSU Daten verwendet (Haimberger et al., 2008). In den in Kapitel 5 gezeigten Plots werden Anomaliedifferenzen bezüglich RSS oder RAOBCORE gezeigt.

### 3.2.3 Vergleich GPS Radiookkultationsdaten - Radiosonden

Steiner et al. (2007) haben für die Jahre 2001-2006 große Übereinstimmung der Anomalien zwischen MSU und GPS Radiookkultationsdaten für die TLS gefunden und weniger gute Übereinstimmung mit den HadAT2 Radiosondendaten. Allerdings haben die MSU Daten in diesem Zeitraum einen negativen Trend verglichen mit den Radiookkultationsdaten. Blaschek (2009) hat GPS Radiookkultationsdaten mit Radiosondendaten verglichen und aus den Differenzprofilen Korrekturvorschläge für die Radiosondendaten berechnet. Diese Korrekturen sollen nun mit den RAOBCORE Klimatologiekorrekturen verglichen werden.

Blaschek (2009) hat auch Korrekturen für verschiedene Radiosondentypen berechnet und dabei besonders große Korrekturen für die in Indien verwendeten IMMK3 Radiosonden gefunden. Ein typisches Beispiel für eine indische Station ist

Vergleich: RAOBCORE - COSMIC Korrekturen Station: 43003 Pos: 19.1N 72.8E

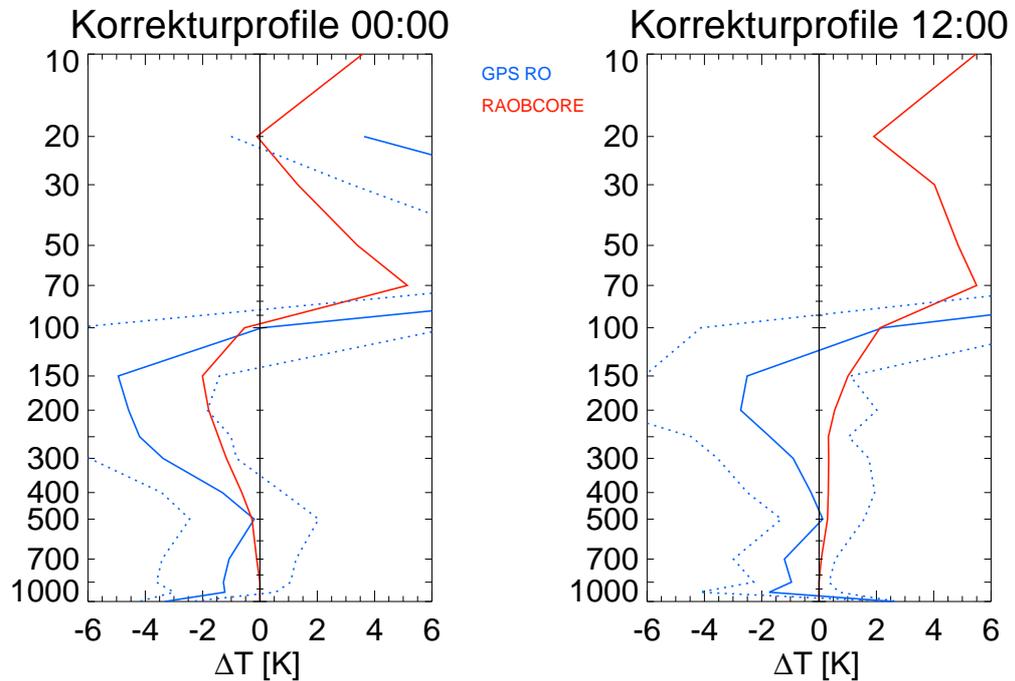


Abbildung 3.1: Vergleich der Korrekturprofile aus Radiookkultationsdaten (blau) mit der RAOBCORE Klimatologie Korrektur (rot) für die Station 43003 Bombay/Santa Cruz.

die Station Bombay/Santa Cruz. Der Vergleich der Korrektur aus Radiookkultationsdaten mit der RAOBCORE Klimatologiekorrektur Abbildung 3.1 zeigt, dass beide Korrekturprofile eine ähnliche Form haben, die Korrektur aus Radiookkultationsdaten aber weit extremere Werte annimmt, beziehungsweise der Bias in der RAOBCORE Klimatologiekorrektur noch unterschätzt wird. Betrachtet man im Vergleich dazu die Station Point Barrow in Alaska (Abbildung 3.2), so ist wiederum zu sehen, dass die Form der Korrekturprofile gut übereinstimmt, betrachtet man allerdings das 12:00 Profil, so sieht man, dass hier die RAOBCORE Klimatologiekorrektur deutlich größer ist, als die Korrektur aus GPS Radiookkultationsdaten.

### 3.2.4 Vergleich GPS RO - MSU

Ho et al. (2007) haben GPS RO Daten der CHAMP Mission mit MSU/AMSU Daten von RSS 2.1 und UAH 5.1 für die Jahre 2001 bis 2005 in der TLS Schicht verglichen. Dazu haben sie aus den GPS RO Profilen mit einer entsprechenden Ge-

Vergleich: RAOBCORE - COSMIC Korrekturen Station: 70026 Pos: 71.3N -156.8E

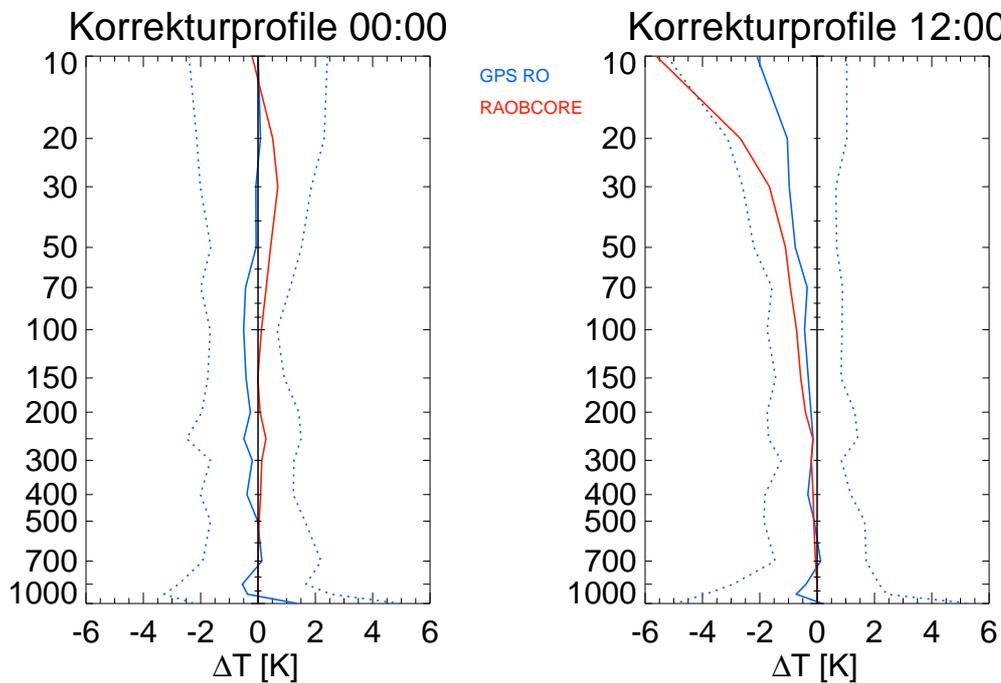


Abbildung 3.2: Vergleich der Korrekturprofile aus Radiookkultationsdaten (blau) mit der RAOBCORE Klimatologie Korrektur (rot) für die Station 70026 Point Barrow.

wichtsfunktion Brightness Temperatures für die TLS Schicht berechnet, in Boxen gemittelt und mit MSU Daten verglichen. Für die Antarktis (60 S - 82,5 S) haben Ho et al. (2007) sehr hohe Korrelationen zwischen den verschiedenen Datensätzen gefunden. Allerdings ist die mittlere Differenz zwischen den MSU und den GPS RO Daten und die Standardabweichung verglichen mit anderen Regionen sehr hoch.

# 4 Trends

## 4.1 Vorbetrachtungen

Der Begriff Trend bezeichnet neben dem klimatologischen Trend oft ein statistisches Maß, mit dem so wie mit anderen statistischen Maßen auch Datensätze verglichen werden können. Meist wird eine lineare Regression mit der Methode der kleinsten Quadrate verwendet, es gibt jedoch auch andere Möglichkeiten Trends zu berechnen wie zum Beispiel die absoluten- statt der quadratischen Differenzen zu minimieren, oder der Median der „pairwise slopes“ (Lanzante, 1996), was den Vorteil hat, weniger stark von den Werten am Rand, Extremwerten und Sprüngen in der Zeitreihe abzuhängen (Gaffen et al., 2000). Je kürzer der Zeitraum, desto größer ist die Abhängigkeit der Trends von der Wahl der Berechnungsmethode (Santer et al., 2000a). Die folgenden Trendangaben sind, falls nicht extra angegeben, lineare Regressionen mit der Methode der kleinsten Quadrate.

Um zu berechnen, ob die Trends zweier Zeitreihen signifikant unterschiedlich sind, ist es notwendig die Unsicherheit der Trends zu kennen. Bei der Abschätzung dieser Unsicherheit muss die Autokorrelation in den Zeitreihen berücksichtigt beziehungsweise ein effektiver Stichprobenumfang berechnet werden (Santer et al., 2008). Dies soll an Hand eines Beispiels demonstriert werden.

Betrachten wir einen autoregressiven Prozess der Form

$$X_n = \alpha X_{n-1} + Z_n \quad (4.1)$$

wobei  $n$  der Zeitindex ist und von 1 bis  $N$  läuft, und  $\alpha$  der Autokorrelationskoeffizient. Für  $\alpha = 0$  erhält man eine reine Zufallszeitreihe, da die  $Z_n$  normalverteilte Zufallszahlen mit Mittelwert 0 und Standardabweichung 1 sein sollen. Damit soll eine 30-jährige Zeitreihe monatlicher Temperaturanomalien simuliert werden, womit gilt  $N = 30 \times 12 = 360$ . Simuliert man 1000 Zufallszeitreihen und berechnet jeweils die Trends, so kann bestimmt werden welche Trends zufällig vorkommen können und wie groß ein Trend sein muss um die Nullhypothese „es gibt keinen Trend“ mit zum Beispiel 95% Wahrscheinlichkeit zu verwerfen. In Abbildung 4.1 ist jeweils in blau die erste der 1000 simulierten Zeitreihen geplottet, rot gepunktet die tausend Trendlinien und grün das 2,5. und 97,5. Perzentil der Trends. Der oberste Plot in Abbildung 4.1 zeigt den Fall  $\alpha = 0$  also für reine Zufallszeitreihen. Um die Nullhypothese verwerfen zu können müssen die Trends größer als  $\pm 0,12$

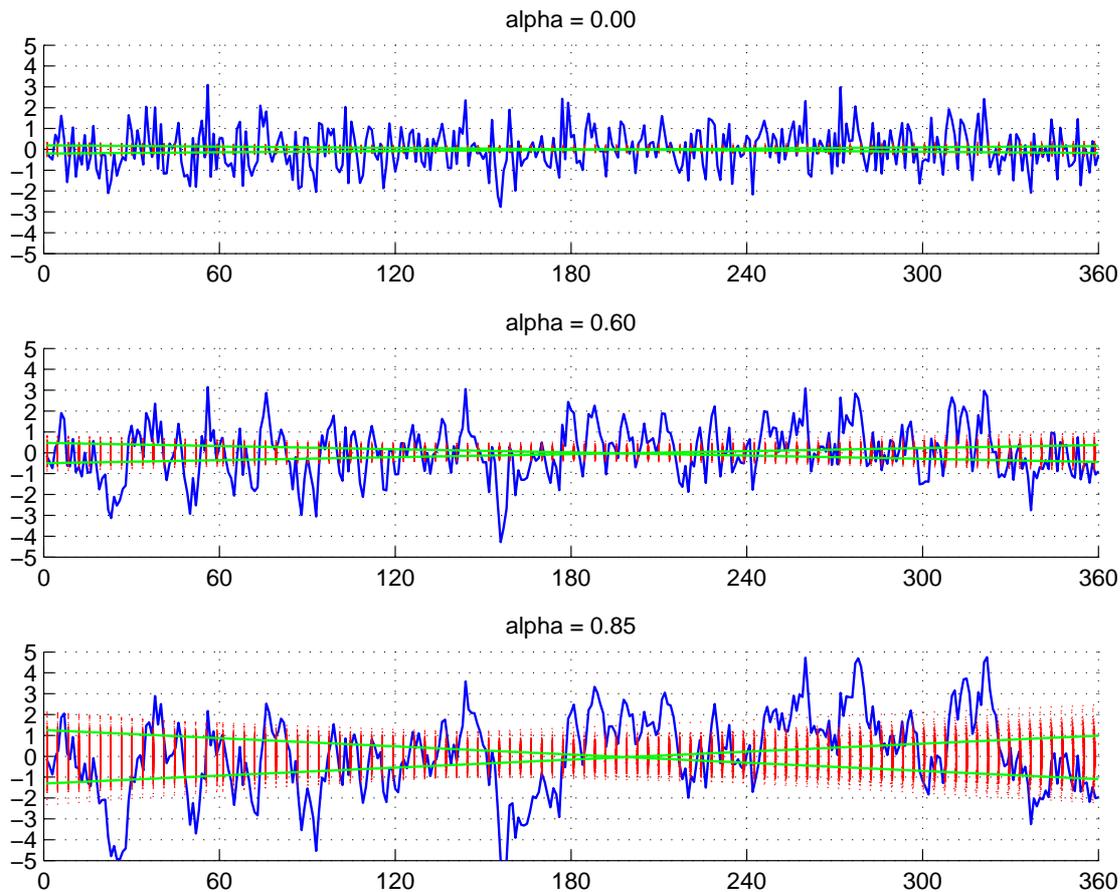


Abbildung 4.1: In blau jeweils die erste von 1000 simulierten Zufallszeitreihen, rot gepunktet die Trendlinien aller 1000 Zeitreihen, in grün das 2,5. und 97,5. Perzentil der Trends. Oben  $\alpha = 0$ , mitte  $\alpha = 0,6$ , unten ( $\alpha = 0,85$ ).

K Dekade<sup>-1</sup> sein. In der mittleren Abbildung ist  $\alpha = 0,6$ . Dieser Wert entspricht laut Wigley et al. (2006) ungefähr der Autokorrelation in Radiosondentemperaturzeitreihen. In diesem Fall müssen die Trends bereits größer als  $\pm 0,3$  K Dekade<sup>-1</sup> sein um signifikant zu sein. MSU TLS Zeitreihen haben laut Wigley et al. (2006) eine Autokorrelation von 0,85. Dieser Fall ( $\alpha = 0,85$ ) ist im unteren Teil der Abbildung 4.1 zu sehen. Die Trends müssen größer als  $\pm 0,77$  K Dekade<sup>-1</sup> sein, damit sie signifikant sind.

Eine andere Variante zur Bestimmung der Unsicherheit der Trends ist mit Hilfe des Standardfehlers

$$SE = \sqrt[2]{\frac{\sigma^2}{\frac{N(N^2-1)}{12}}}. \quad (4.2)$$

## 4 Trends

$\pm 2 \times SE$  wird gerne als Maß für das 95% Konfidenzintervall verwendet. Ohne Autokorrelation ist in unserem Beispiel die Varianz der Residuen  $\sigma^2 = 1$ , für  $\alpha = 0.6$  ist  $\sigma^2 = 1,55$  und für  $\alpha = 0.85$  ist  $\sigma^2 = 3,49$ . Daraus ergeben sich, wenn man die Autokorrelation in der Formel für den Standardfehler nicht berücksichtigt 95% Konfidenzintervalle von  $\pm 0,12$ ,  $\pm 0,15$  und  $\pm 0,23$  K Dekade<sup>-1</sup> für die Trends. Für die Zufallszeitreihe ist der Wert etwas größer als in der Simulation, was daran liegt, dass das echte 95% Konfidenzintervall nicht  $\pm 2 \times SE$  sondern  $\pm 1,96 \times SE$  beträgt. Bei den Zeitreihen mit Autokorrelation sind die so berechneten Werte viel zu klein, das heißt, die statistische Unsicherheit wird massiv unterschätzt. Wenn man bei der Schätzung der Varianz  $\sigma^2$  statt  $N$  den effektiven Stichprobenumfang

$$N_{eff} = \frac{N(1 - \alpha)}{N(1 + \alpha)} \quad (4.3)$$

verwendet, kommt man auf Werte von  $\pm 0,12$ ,  $\pm 0,3$  und  $\pm 0,79$  K Dekade<sup>-1</sup> für die 95% Konfidenzintervalle der Trends, womit die Abschätzung wieder stimmt.

Die räumliche Konsistenz von Trends wird als Maß für die Homogenität verwendet, da Trends durch zeitliche Änderung der systematischen Fehler in Messungen verfälscht werden können (Gaffen et al., 2000). Nimmt man in den Tropen nur die Stationen ohne in den Differenzzeitreihen zu Satellitendaten sichtbaren Sprüngen, so wird die Erwärmung in der oberen Troposphäre stärker, und die Abkühlung in der unteren Stratosphäre schwächer. Das Vertikalprofil des Trends passt dann besser zu den Satellitendaten und zu den Erwartungen aus der Theorie (Randel and Wu, 2006; Santer et al., 2005).

## 4.2 Radiosondentemperaturtrends in der Literatur

Homogenisierte Radiosondentemperaturdatensätze wie RATPAC-A und RATPAC-B (Abschnitt 3.1.6) (Free et al., 2005) oder RAOBCORE und RICH (Abschnitt 3.1.9 und 3.1.10) (Haimberger, 2005; Haimberger et al., 2008) verbessern die räumliche Konsistenz der Radiosondentemperaturtrends verglichen mit unkorrigierten Radiosondendaten stark.

Die Wahl der Homogenisierungsmethode für Radiosondendaten kann einen großen Einfluss auf die Temperaturtrends haben. Auch zwischen älteren und neueren Versionen der MSU Datensätze gibt es große Unterschiede in den Trends durch unterschiedliche Korrekturen verschiedener Effekte (Santer et al., 2000a). Radiosondentemperaturtrends reagieren sehr sensibel auf stufenförmige Änderungen im systematischen Beobachtungsfehler und auch auf Korrekturen dieser künstlichen Änderungen (Gaffen et al., 2000). Gaffen et al. (2000) finden in ihren mit Rangsummentests homogenisierten Radiosondentemperaturzeitreihen (Abschnitt 3.1.3)

## 4.2 Radiosondentemperaturtrends in der Literatur

weniger starke Erwärmung in der Troposphäre von 1959-1995 als in den unkorrigierten Zeitreihen. Angell (2003) zeigte, dass das Weglassen von neun fehlerhaften tropischen Stationen (von 31) den Trend (1958-2000) in einer Schicht zwischen 100 hPa und 300 hPa in den Tropen signifikant ändert (von -0,16 K pro Dekade auf 0,06 K pro Dekade). Die positiven Trends in der tropischen Troposphäre (850 hPa bis 300 hPa) haben sich verstärkt. Für den globalen Trend (63 Stationen) und für die Periode 1979-2000 sind die Auswirkungen auf den Trend sehr klein und nicht signifikant. Der Unterschied zwischen den Trends in der Troposphäre und den Trends am Boden wird kleiner.

Seidel et al. (2004) haben gefunden, dass die unkorrigierten Radiosondendaten stärkere Abkühlung in der Stratosphäre zeigen, als die mit den Methoden von LKS (Lanzante et al., 2003a,b) (Abschnitt 3.1.4), Parker und HadAT (Thorne et al., 2005b) (Abschnitt 3.1.7) homogenisierten Radiosondenzeitreihen. Haimberger (2005) bestätigt das auch für RAOBCORE. Die größten Änderungen von Trends durch Homogenisierung gibt es in den Tropen und auf der Südhalbkugel (Randel et al., 2009). McCarthy et al. (2008) finden, dass die Unsicherheit der homogenisierten Radiosondendaten (in diesem Fall HadAT2) groß genug ist, um die Unterschiede zwischen diesen Daten und anderen Daten, Modellergebnissen, theoretischen Erwartungen und Trends am Boden zu erklären. Die Sensitivität der Trends bezüglich verschiedener Korrekturverfahren oder Varianten dieser Verfahren muss getestet werden um die Unsicherheiten abzuschätzen (Thorne et al., 2005b).

Trends hängen stark vom betrachteten Zeitraum ab. Vor allem in der Stratosphäre gibt es viel niederfrequente Variabilität, was zu großen Unsicherheiten in den Trends führt, selbst wenn die Perioden einigermaßen lang sind (Ramaswamy et al., 2001). Große Vulkanausbrüche wie die des Agung in Indonesien 1963, des El Chichon in Mexiko 1982 oder des Pinatubo auf den Philippinen 1991 bringen Aerosol in die Stratosphäre, wodurch dort mehr Infrarotstrahlung absorbiert wird und es zu einer Erwärmung kommt. Die positiven Temperaturanomalien (bis zu 3 K) sind etwa zwei Jahre lang zu sehen. Die Sonnenaktivität beeinflusst die Bildung von Ozon und damit ebenfalls die Temperaturen in der Stratosphäre. Auch die Quasi-Biennial Oscillation (QBO) erzeugt Temperaturvariationen in der Stratosphäre, die in den Tropen bis zu  $\pm 4$  K betragen können. Die QBO beeinflusst aber auch die Polarwirbel vor allem im Winter und Frühling, wobei es eine Phasenverschiebung bezüglich der QBO in den Tropen gibt. Die Periode der QBO ist kurz genug um die Trendberechnung nicht zu sehr zu beeinflussen (Ramaswamy et al., 2001).

In den Polargebieten entsteht große natürliche Variabilität durch den Polarwirbel und planetare Wellen, wodurch die Trends schon recht groß sein müssen um signifikant zu sein (Ramaswamy et al., 2001). Durch die große Variabilität

## 4 Trends

der planetaren Wellen gibt es auch große Variabilität in der stratosphärischen Ozonkonzentration und in den Temperaturen (Randel and Wu, 1999). Ein weiterer Faktor für Variabilität ist ENSO, da die Meeresoberflächentemperaturen und die geänderte Zirkulation auch die Meereisbildung im südlichen Ozean, die atmosphärische Dynamik bis in die Stratosphäre und damit die Ozonkonzentrationen beeinflussen (Braesicke and Pyle, 2004; Arguez et al., 2007). Die Änderung der Tropopausenhöhe hat großen Einfluss auf die Trends in dieser Höhe (Ramaswamy et al., 2001). Durch die starken Temperaturjahresgänge werden fehlende Daten in bestimmten Jahreszeiten zum Problem für die Trendberechnung. Zum Beispiel fehlen in den frühen antarktischen Radiosondendaten regelmäßig viele Werte in den hohen Schichten im Winter (Trenberth and Olson, 1989).

Der Jahresgang ist in der Antarktis nicht symmetrisch. Die Erwärmung im Frühling geht schneller als die Abkühlung im Herbst, wobei die Erwärmung beziehungsweise Abkühlung jeweils oben beginnt und sich dann nach unten fortpflanzt (Trenberth and Olson, 1989).

Treibhausgase tragen bodennah zur Erwärmung bei, der Effekt in höheren Schichten hängt allerdings von der jeweiligen Substanz und ihren Absorptionsbändern ab. CO<sub>2</sub> Äquivalente funktionieren daher zur Abschätzung der Erwärmung in Bodennähe, überschätzen allerdings die Abkühlung in der Stratosphäre (Ramaswamy et al., 2001). Das Ausmaß der Abkühlung in der polaren Stratosphäre hängt bei Modellen stark von der Parametrisierung verschiedener Prozesse ab (Ramaswamy et al., 2001).

### 4.2.1 Trends in der Stratosphäre

Die Unterschiede in den TLS Trends zwischen Radiosondendaten und Satellitendaten sind in den Tropen und auf der Südhalbkugel größer als auf der Nordhalbkugel. Je tiefer die betrachtete Schicht, desto kleiner werden die Unterschiede in den Trends. Die UAH Daten haben in der unteren Stratosphäre (TLS) eine größere Abkühlung als die RSS Daten (Haimberger et al., 2008).

Die Datensätze HadAT2 und RATPAC zeigen in der TLS Schicht in den Tropen stärkere Abkühlung (1979-1999) als die MSU Daten und liegen außerhalb der Bandbreite von Modellsimulationen (Santer et al., 2005; Randel et al., 2009). Auch die LKS Daten haben 1979-1997 mit -0,76 K pro Dekade einen stärker negativen Trend als die MSU Daten und die Modelle (Shine et al., 2003). Die stärkeren negativen Trends in der TLS Schicht in den Radiosondendaten verglichen mit MSU Daten hängt auch damit zusammen, dass die Radiosonden in den Achziger Jahren im globalen Mittel  $0,6 \pm 0,3$  K zu hohe Temperaturen gemessen haben und diese systematischen Fehler durch neue Geräte und verbesserte Strahlungskorrekturen im Laufe der Jahre wesentlich kleiner geworden sind (Haimberger et al., 2008).

## 4.2 Radiosondentemperaturtrends in der Literatur

Durch die Korrektur mit RAOBCORE oder RICH werden die zonal gemittelten Trends der Radiosondendaten den MSU Daten ähnlicher. Die Ausnahme sind datenarme Gebiete auf der Südhalbkugel etwa ab 50° S. Besonders RICH hat hier Probleme, da die Methode auf Nachbarstationen angewiesen ist, die in dieser Gegend rar sind. In der unteren Stratosphäre hat RICH stärkere negative Trends als die anderen Datensätze (Haimberger et al., 2008).

Vergleicht man die Trends der Tag- und Nachtaufstiege, so sind die negativen Temperaturtrends der Tagaufstiege um 0,1 - 0,2 K pro Dekade stärker als die Trends der Nachtaufstiege (Randel and Wu, 2006). Das bedeutet, dass die Strahlungsfehler etwas zu den stärkeren negativen Trends der Radiosonden in der tropischen TLS Schicht beitragen (Sherwood et al., 2005), aber dass das nicht der einzige Grund sein kann (Randel and Wu, 2006).

| RSS   | UAH   | RAOBCORE | HadAT2 | RICH  |
|-------|-------|----------|--------|-------|
| -0,36 | -0,44 | -0,40    | -0,58  | -0,47 |

Globale TLS Trends 1979-2006 in K Dekade<sup>-1</sup> (Haimberger et al., 2008)

Die stärkste Abkühlung gibt es jeweils nach der Erwärmung die auf die Ausbrüche des Pinatubo und des El Chichon folgte. Die Abkühlung ist außerhalb der Polargebiete recht ähnlich in den verschiedenen Breiten (Randel et al., 2009).

Die Trends in der Stratosphäre lassen sich nur mit einer Kombination aus natürlichem und anthropogenem Forcing erklären, wobei ein großer Teil der Abkühlung durch die Abnahme des stratosphärischen Ozon bedingt ist. Durch Vulkanausbrüche kommt es in der Stratosphäre zuerst zu einer Erwärmung und danach zu einer leichten Abkühlung (Ramaswamy et al., 2006).

### Antarktis

Die Trends in der Stratosphäre aus Radiosondendaten sind in der Antarktis im Südfrühling und -sommer (SON DJF) stark negativ, je nach Datensatz bis -1,5 K pro Dekade (1979-2007, berechnet mit einer multivariaten linearen Regression (Randel et al., 2009), in der neben linearen Trends auch der Sonnenzyklus und die QBO berücksichtigt werden und jeweils zwei auf große Vulkanausbrüche folgende Jahre nicht berücksichtigt werden) und im Südwinter neutral (Randel et al., 2009; Randel and Wu, 1999; Newman et al., 2002). Die MSU TLS Daten ergeben für die Polargebiete ebenfalls starke Jahrgänge bei den Trends. Die starken negativen Trends im Frühling hängen mit der Abnahme des stratosphärischen Ozons zusammen (Ramaswamy et al., 2001). In der Arktis hat die starke Abkühlung durch die Abnahme des stratosphärischen Ozons erst Anfang der 90er Jahre begonnen, wäh-

## 4 Trends

rend sie in der Antarktis bereits Anfang der 80er Jahre zu sehen ist (Ramaswamy et al., 2001; Randel and Wu, 1999). In der Arktis sind die Trends auch im Winter negativ (Randel and Wu, 1999) allerdings sind diese Trends aufgrund der hohen Variabilität im arktischen Winter nicht signifikant (Randel et al., 2009). Durch die hohe Variabilität in den Polargebieten hängen die Trends stark vom betrachteten Zeitraum ab (Newman et al., 2002) und sind, obwohl sie größer sind als in niederen Breiten, bei Signifikanztests weniger signifikant (Ramaswamy et al., 2001). In den letzten Jahren sind die negativen Trends in der unteren Stratosphäre in den Polargebieten schwächer geworden (Randel et al., 2009).

In den Radiosondendaten gibt es laut Ramaswamy et al. (2001) und Randel and Wu (1999) einen positiven Trend in 50 hPa und an manchen Stationen wie zum Beispiel Molodezhnaya in 30 hPa. Allerdings haben sie unhomogenisierte Radiosondentemperaturdaten verwendet wie in Abbildung 4.2. Nach der Homogenisierung

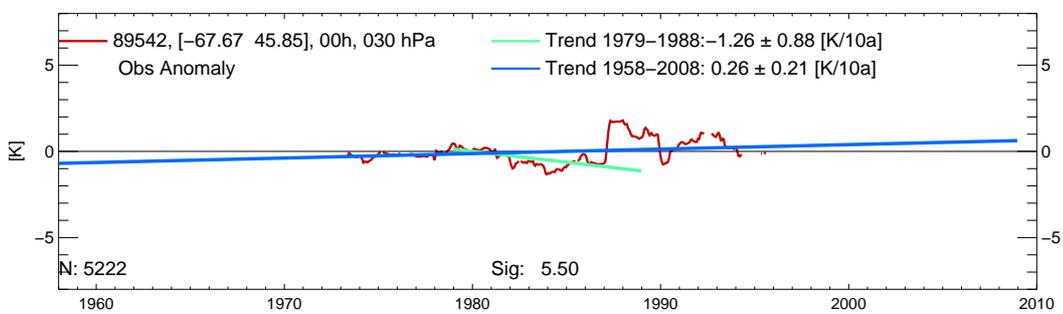


Abbildung 4.2: 00:00 UTC Zeitserie der Temperaturanomalien und Trends in 30 hPa an der Station 89542 Molodezhnaya.

mit RAOBCORE gibt es keinen positiven Trend in 30 hPa an der Station Molodezhnaya mehr (Abbildung 4.3). Die Abkühlung ist jedoch in 30 hPa schwächer als in 100 hPa. In 100 hPa und in den MSU TLS Daten gibt es einen stärkeren negativen Trend (Ramaswamy et al., 2001). Die schwächere Abkühlung oberhalb der starken Abkühlung durch die Abnahme des stratosphärischen Ozons sind laut Modellexperimenten eine Folge einer Änderung der Dynamik und der erhöhten Absorption von Infrarotstrahlung in dieser Schicht durch die Abnahme des Ozons unterhalb und zu einem kleineren Teil durch verstärktes Aufsteigen in den Tropen, wodurch es in den Polargebieten zu Erwärmung durch Kompression beim Absinken kommt (Ramaswamy et al., 2001; Newman et al., 2002). Abnahme des stratosphärischen Ozons und Abkühlung in der unteren Stratosphäre verstärken sich gegenseitig (Ramaswamy et al., 2001). Vulkanausbrüche führen laut Modellsimulationen zu einer Erwärmung in der unteren Stratosphäre und einer Abkühlung in der oberen Stratosphäre in den Tropen, was zu einem verstärkten meridionalen Temperaturgradienten in der unteren Stratosphäre und damit zu stärkeren

## 4.2 Radiosondentemperaturtrends in der Literatur

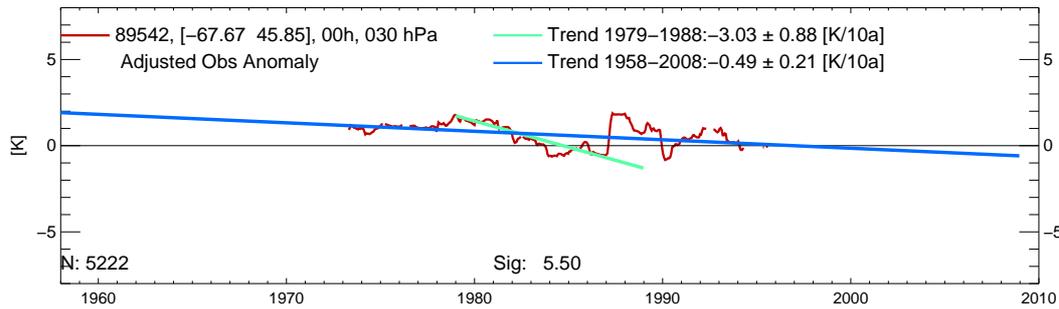


Abbildung 4.3: 00:00 UTC Zeitserie der mit RAOBCORE 1.5 korrigierten Temperaturanomalien und Trends in 30 hPa an der Station 89542 Molodezhnaya.

Westwinden und einer damit verbundenen Abkühlung in den Polargebieten führt (Ramaswamy et al., 2001). Besonders zu beachten bei den Trends ist, dass die interannuelle Variabilität in den Polargebieten durch Ereignisse wie zum Beispiel sudden stratospheric warmings sehr hoch ist (Ramaswamy et al., 2001). Die stärkste Variabilität gibt es in der Antarktis im Frühling (Randel and Wu, 1999; Randel et al., 2009) und in der Arktis im Winter (Randel et al., 2009). Zusätzlich gibt es starke Jahresgänge, QBO, deren Westwindphase zu einer Verstärkung des Polarwirbels führt (Jones and Shanklin, 1995), Sonnenzyklus und ENSO.

Die Polargebiete erfahren besondere Aufmerksamkeit, da sich Klimaänderungen dort durch die Eis-Albedo-Rückkopplung am stärksten bemerkbar machen. Kushner et al. (2001) haben in ihren Modellsimulationen mit ansteigenden Kohlendioxid- und Sulfataerosolkonzentrationen gefunden, dass die Erhöhung der bodennahen Temperaturen zum Nordpol hin zunimmt, auf der Südhalbkugel ein Minimum der Erwärmung zwischen  $55^\circ$  S und  $65^\circ$  S zu finden ist und südlich davon die Erwärmung wieder zunimmt. Dabei wurde allerdings die Änderung in der Ozonkonzentration nicht berücksichtigt. Ein Großteil der Abkühlung in der unteren Stratosphäre seit den Achtzigerjahren ist durch den Rückgang des stratosphärischen Ozons bedingt (Gaffen et al., 2000; Randel and Wu, 1999; Shine et al., 2003; Newman et al., 2002), in der mittleren und oberen Stratosphäre trägt auch der Anstieg der Treibhausgase zur Abkühlung bei (Shine et al., 2003).

Ozon wird hauptsächlich in den Tropen und mittleren Breiten durch Photodissoziation von Sauerstoff durch UV Strahlung erzeugt und durch die Brewer-Dobson Zirkulation in die Polargebiete transportiert (Newman et al., 2002). Bereits in den späten 80er Jahren wurde eine hohe Korrelation zwischen den Temperaturen in 70 hPa und der Konzentration des stratosphärischen Ozons festgestellt (Trenberth and Olson, 1989; Newman et al., 2002). Austin et al. (1992) und Shindell et al. (1998) haben in ihren Modellexperimenten gefunden, dass eine Zunahme der Koh-

lendioxidkonzentration durch tiefere Temperaturen in der unteren Stratosphäre zu einem verstärkten Abbau von Ozon in diesem Bereich durch heterogene Chemie führt. Weniger Ozon führt zu noch mehr Abkühlung. Gleichzeitig ändern sich die planetaren Wellen, der Polarwirbel und die zonalen Winde werden stärker und „sudden stratospheric warmings“ seltener (Shindell et al., 1998). In den letzten Jahren ist der Trend zur Verstärkung des Polarwirbels in der Antarktis schwächer geworden, da auch der Ozonverlust nicht mehr viel stärker geworden ist (Newman et al., 2002). Der Abbau des stratosphärischen Ozons in der Arktis hängt stark von der Häufigkeit der „sudden stratospheric warmings“ ab (Shindell et al., 1998). Die Rolle des Wasserdampfs für die Temperaturtrends in der Stratosphäre ist noch immer unsicher (Ramaswamy et al., 2001; Randel et al., 2009) könnte aber laut Newman et al. (2002) zur Abkühlung in der Stratosphäre beitragen.

Der Wasserdampf in der Stratosphäre kommt zu einem großen Teil aus der tropischen Troposphäre und hängt stark von der Temperatur in Äquatornähe ab. Damit spielen die QBO und ENSO eine große Rolle für den Wasserdampf in der Stratosphäre, welcher dann in die Polargebiete transportiert wird. Eine zweite Quelle für Wasserdampf in der Stratosphäre ist Oxidation von Methan. Vor allem in der Arktis spielt der Transport aus den Tropen eine große Rolle, in der Antarktis ist eher die Abtrocknung in der Antarktis selbst entscheidend für den Wasserdampfgehalt (Randel et al., 2004).

Die Vertikalprofile der Temperaturtrends stimmen zwischen Radiosonden und Modellen nicht gut überein (Randel et al., 2009). In der tiefen Stratosphäre sind die negativen Trends nur in der Antarktis und in den Tropen signifikant (Ramaswamy et al., 2001). Troposphärisches Aerosol dämpft in der Troposphäre die Erwärmung durch Treibhausgase, verstärkt aber die Abkühlung in der Stratosphäre, da die langwellige Strahlung nach oben reduziert wird (Ramaswamy et al., 2001). Der Wasserdampf in der Stratosphäre nimmt zu, da mehr Methan oxidiert (Ramaswamy et al., 2001). Eine Erwärmung in der tropischen oberen Stratosphäre führt zu einem größeren meridionalen Temperaturgradienten und stärkeren zonalen Winden in der oberen Stratosphäre. Das führt dazu, dass die planetaren Wellen äquatorwärts brechen und der stratosphärische Polarwirbel verstärkt wird. Durch die Verstärkung des Polarwirbels kommt es in der Antarktis zu Abkühlung und auf der antarktischen Halbinsel zu Erwärmung (Arguez et al., 2007; Gillett and Thompson, 2003; Thompson et al., 2005).

### 4.2.2 Trends in der Troposphäre

Für die TMT Schicht sind in der Literatur je nach Datensatzversion, Zeitraum, Sampling der MSU Daten und Bodeninformation bei den Radiosondendaten unterschiedliche global gemittelte Trends zu finden. Vinnikov et al. (2006) finden als global gemittelten Trend (1978-2004) aus MSU Daten 0,2 K pro Dekade, benutzen

## 4.2 Radiosondentemperaturtrends in der Literatur

dabei allerdings eine andere Methode zur Kalibrierung der MSU Daten als RSS oder UAH.

| RSS  | UAH  | RAOBCORE | HadAT2 | RATPAC |
|------|------|----------|--------|--------|
| 0,13 | 0,05 | 0,12     | 0,07   | 0,04   |

Global gemittelte TMT Trends 1979-2006 in K Dekade<sup>-1</sup> (Arguez et al., 2007)

Die Trends in der TMT Schicht sind nicht symmetrisch um den Äquator. Auf der Nordhalbkugel sind die Trends überwiegend positiv, während sie auf der Südhalbkugel schwächer oder sogar negativ sind (Tavolato, 2006). Auf der Südhalbkugel sind die Trendunterschiede etwas größer als auf der Nordhalbkugel.

In der Antarktis führt die Abkühlung in der unteren Stratosphäre auch zu einer Abkühlung in der oberen Troposphäre wegen der reduzierten Infrarotstrahlung aus der Stratosphäre und dem verstärkten Polarwirbel (Ramaswamy et al., 2001). Im Winter haben Randel and Wu (1999) eine Erwärmung in der Troposphäre gefunden. Vinnikov et al. (2006) finden einen Trend von -0,06 K pro Dekade (1978-2004) mit den von ihnen kalibrierten MSU Zeitreihen. In der Arktis hingegen finden sie stark positive Trends mit 0,31 K pro Dekade.

| RSS  | UAH  | RAOBCORE | HadAT2 | RATPAC |
|------|------|----------|--------|--------|
| 0,19 | 0,14 | 0,16     | 0,17   | 0,16   |

Global gemittelte TLT Trends 1979-2006 in K Dekade<sup>-1</sup> (Arguez et al., 2007)

Christy and Norris (2004) haben einen Vergleich ihrer MSU UAH Daten mit Radiosondendaten gemacht, wobei sie nur Stationen verwendet haben, die wenig Datenlücken haben. Diese haben sie in zwei verschiedenen Versionen verwendet: einmal ohne Korrekturen und einmal mit Korrekturen für dokumentierte Radiosondenwechsel, wobei zur Korrektur Differenzzeitserien zur UAH Gitterpunktstemperatur verwendet wurden und für häufig vorkommende Wechsel zwischen bestimmten Gerätetypen nur ein Wert berechnet worden ist. Der Vergleich der Trends hat keine signifikanten Unterschiede zwischen UAH und Radiosonden TLT Trends ergeben sowie wenig Unterschied zwischen den unkorrigierten und den korrigierten Radiosonden.

In den Tropen hat der UAH Datensatz einen leicht negativen Trend und liegt damit außerhalb der Modellrealisierungen. Die RSS Trends unterscheiden sich nicht signifikant von den Trends der meisten Klimamodelle (Santer et al., 2008). HadAT2

## 4 Trends

und RATPAC haben einen positiven Trend und sind konsistent mit den Modellen (Santer et al., 2005). RSS 2.1 und UAH Datensatz unterscheiden sich besonders auf der Südhalbkugel und in den Tropen (Tavolato, 2006; Mears and Wentz, 2005). Für die TLT Schicht ist es schon sehr wichtig welche Bodeninformation für den Vergleich mit Radiosondendaten verwendet wird. Die Differenz zwischen Versionen mit unterschiedlichen Bodeninformationen ist etwa so groß wie die Differenz zwischen den Satellitendatensätzen (Tavolato, 2006).

Während die TLT Trends über weite Teile des Globus positiv sind, sind sie über der Antarktis schwach negativ (Tavolato, 2006). Sowohl RSS als auch UAH zeigen eine signifikante Abkühlung über der Antarktis (Mears et al., 2003).

Am Boden gibt es global eine Erwärmung um 0,12 bis 0,2 K pro Dekade (Durre et al., 2002). Ein Eisbohrkern von der antarktischen Halbinsel zeigt für die letzten Jahrzehnte ebenfalls eine Erwärmung (Jacobs and Comiso, 1997). Im Inneren der Antarktis hingegen wurde keine oder nur eine sehr schwache Erwärmung (im Herbst) am Boden gefunden.

Die Klimavariabilität in der Antarktis ist von der Ausprägung des Polarwirbels geprägt (Thompson and Solomon, 2002). Durch die verstärkte photochemische Zerstörung des stratosphärischen Ozons (und zu einem kleineren Teil durch eine erhöhte Treibhausgas- und Wasserdampfkonzentration) kommt es zur Abkühlung der unteren Stratosphäre, am stärksten im Frühling mit etwa 10 K zwischen 1985 und 2000, und zur Verstärkung des Wirbels in der unteren Stratosphäre, der immer länger braucht, bis er sich im Sommer auflöst (Thompson and Solomon, 2002; Ramaswamy et al., 2001; Randel and Wu, 1999). Der verstärkte Polarwirbel in der Stratosphäre erzeugt auch einen stärkeren Polarwirbel in der Troposphäre und wirkt sich letztlich auch auf die bodennahen Temperaturen in der Antarktis aus (Thompson et al., 2005). Thompson et al. (2005) schließen daraus, dass der photochemische Ozonabbau eine Schlüsselrolle bei der Klimaänderung auf der Südhalbkugel sowohl in der Stratosphäre als auch in der Troposphäre spielt. Der Trend zu stärkeren Westwinden ist sowohl in der Stratosphäre als auch in der Troposphäre zu beobachten und ist in der Stratosphäre im Frühling und in der Troposphäre im Sommer am stärksten ausgeprägt (Gillett and Thompson, 2003). Durch ein Modell mit vorgegebenem stratosphärischen Ozon lassen sich die Trends in der Stratosphäre und Troposphäre auf der Südhalbkugel gut beschreiben (Gillett and Thompson, 2003). Das führt zu einem stärkeren Westwindband in der Troposphäre und zu einem positiven Temperaturtrend über der antarktischen Halbinsel und Patagonien und negativen Trends über der östlichen Antarktis und dem antarktischen Plateau in der Troposphäre. Diese troposphärischen Temperaturtrends passen auch zu den Meer Eis Trends (Thompson and Solomon, 2002; Jacobs and Comiso, 1997).

Ein viel diskutierter Punkt bei Trends ist eine Diskrepanz zwischen den beobachteten Trends am Boden und in der unteren Troposphäre in den Tropen, wobei

## 4.2 Radiosondentemperaturtrends in der Literatur

am Boden eine größere Erwärmung gefunden wird als in der unteren Troposphäre. Laut Santer et al. (2000b) gibt es dafür mehrere mögliche Ursachen: Probleme mit der Datenqualität von Boden-, Radiosonden und/oder Satellitendaten, natürliche Variabilität oder externes Forcing oder Samplingprobleme. Vulkanausbrüche bewirken zum Beispiel eine stärkere Abkühlung in der unteren Troposphäre als am Boden (Santer et al., 2000b). Santer et al. (2000b) konnten zeigen, dass sich der Unterschied nicht alleine mit Samplingproblemen und natürlicher Variabilität erklären lässt. Gleiches Sampling verkleinert den Unterschied etwas, ist also durchaus ein Faktor. Sowohl für die Trends am Boden als auch in der unteren Troposphäre liegen die beobachteten Trends innerhalb der Konfidenzintervalle der Modellsimulationen, bei der Trenddifferenz zwischen Boden und unterer Troposphäre ist das nicht der Fall (Santer et al., 2000b). Laut den Modellen (zum Beispiel Kushner et al. (2001)) müsste die stärkste Erwärmung in der mittleren und oberen tropischen Troposphäre auftreten. In verschiedenen Radiosonden- und Satellitendaten sind die positiven Trends schwächer als in den Bodendaten. Das kann durch Inhomogenitäten passieren, wobei die Korrektur dieser eine Unsicherheit durch die Korrekturmethode erzeugt, die in der gleichen Größenordnung wie die von Modellen vorhergesagte Klimaänderung ist (Santer et al., 2005). Mears and Wentz (2005) meinen, dass die unterschiedlichen TLT Trends von RSS und UAH Datensatz zum größten Teil von unterschiedlichen Korrekturen für den Tagesgang beziehungsweise der Änderung der lokalen Beobachtungszeit kommt und führen für ihren Datensatz (RSS) an, dass er besser zu den Modellen und theoretischen Erwartungen passt.

Ein Großteil des Trends in der Troposphäre kommt im HadAT2 Radiosondendatensatz von einer stufenförmigen Erwärmung in den späten 70er Jahren, wodurch die linearen Trends stark von Anfangs- und Endpunkt der Zeitreihe abhängen. Die Trends über den gesamten Zeitraum 1958 - 2002 sind ähnlich den Trends der Bodendaten und konsistent mit den Klimamodellen. Auf der Südhalbkugel gibt es sehr wenig HadAT2 Stationen, wodurch die Homogenisierung mit Nachbarstationen und auch die Trends unsicher werden (Thorne et al., 2005b).

In Kapitel 5 werden die einzelnen antarktischen Zeitreihen analysiert. Die Wirkung der Korrekturen auf die Trends an den einzelnen Stationen wird beschrieben und welche Unterschiede bezüglich der Trends sich aus unterschiedlichen Korrekturberechnungsmethoden ergeben. Es soll gezeigt werden, wie sich die Trends durch die Korrekturen ändern. In Kapitel 6 wird die Wirkung der Korrekturen auf die räumliche Konsistenz der Trends und das Trendprofil für die Antarktis diskutiert.

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

Es wurden bereits viele Versuche unternommen, Radiosondendaten zu homogenisieren, allerdings konzentrieren sich die meisten Forschungen auf datenreiche Gebiete oder die Tropen. Meistens werden für antarktische Stationen trotz teils ausführlicher Metadaten keine Brüche gefunden und Korrekturen gemacht. RAOBCORE und RICH in den Versionen 1.2 - 1.4 (Haimberger, 2007; Haimberger et al., 2008) machen Korrekturen für antarktische Stationen, diese sind aber zum Teil unrealistisch groß und erhöhen nicht immer die Homogenität. Betrachtet man zum Beispiel die räumliche Homogenität der Trends in der Antarktis, kommt es mit Korrekturen der herkömmlichen RAOBCORE Versionen zu einer Verschlechterung. Durch die Verwendung von ERA-Interim Innovationen gibt es bereits eine Verbesserung. In der Antarktis ist das Problem eine gute Referenzzeitreihe zu finden besonders ausgeprägt, da umliegende Stationen, die selbst nicht in der Antarktis liegen, nicht besonders repräsentativ sind, die MSU Daten Schwierigkeiten am Eisrand haben und ERA-40 in den Polargebieten Modellprobleme hat. Bei ERA-Interim sind die meisten dieser Probleme behoben, die Reanalyse beginnt aber erst 1989. Es sollen nun 19 antarktische Zeitreihen (Abbildung 5.1) genauer untersucht werden. Die gefundenen Brüche und Ergebnisse der Korrekturen werden analysiert.

Die Brüche und Korrekturen wurden mit dem RAOBCORE/RICH System ermittelt. Dieses wurde im Lauf der Diplomarbeit immer wieder verbessert. Die Versionen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Die ersten Untersuchungen wurden mit Daten aus dem Experiment 4 mit dem selben Algorithmus wie in Haimberger et al. (2008) gemacht, mit dem Unterschied, dass ab 1989 ERA-Interim Daten verwendet wurden. Zum Zeitpunkt des Experiments waren die ERA-Interim Daten bis zum Ende des Jahres 2004 verfügbar, daher enden die Zeitreihen aus Experiment 4 dort. In Experiment 5 sind die ERA-Interim Daten bis zum Jahr 2008 verfügbar, allerdings wird beim Homogenisieren kein Vergleich mit Mitteln aus umliegenden, qualitativ hochwertigen, Stationen betrachtet. Mit den Daten dieses Experiments werden die Vergleiche mit den MSU Daten gemacht. Bei Experiment 6 werden beim Homogenisieren die Vergleiche mit Mitteln aus umliegenden Stationen berücksichtigt, es unterscheidet sich von Experiment 4 nur durch die Länge

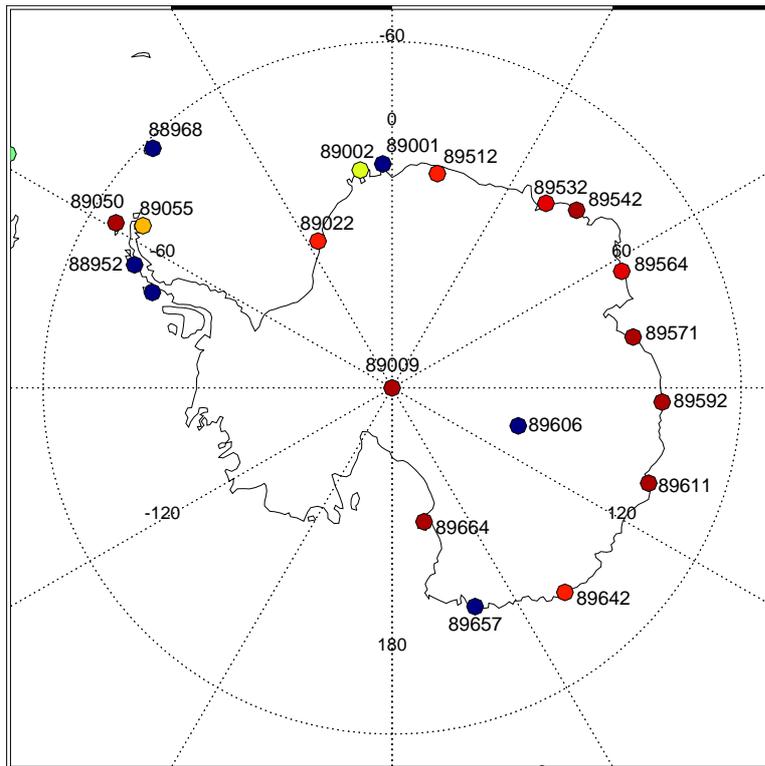


Abbildung 5.1: Analyierte Stationen: 88968 Islas Orcadas, 89050 Bellingshausen, 89055 Vice Commodore Mario Luis Olezza, 88952 Argentine Island, 89022 Halley Bay, 89002 Neumayer, 89001 S.A.N.A.E. Station, 89512 Novolazarevskaya, 89532 Syowa, 89542 Molodezhnaya, 89564 Mawson, 89571 Davis, 89009 Amundsen/Scott, 89606 Vostok 2, 89592 Mirnyy, 89611 Wilkes/Casey, 89664 Mc Murdo, 89657 Leningradskaya, 89642 Dumont.

der Zeitreihen. Mit Experiment 6 werden die Vergleiche mit RICH gemacht.

Genaueres Betrachten der Innovationszeitreihen der antarktischen Stationen lässt immer wieder ähnliche Muster erkennen, was zu der Frage führt, wieviel der sichtbaren Inhomogenität in den Innovationszeitreihen von der Backgroundvorhersage kommt. Durch eine inhomogene Backgroundvorhersage können Brüche übersehen, oder suboptimale Korrekturen berechnet werden. Es wird ein Mittel der Innovationszeitreihen in der Antarktis gebildet, das alle Stationen mit Stationsnummern zwischen 89000 und 90000 umfasst, dies beinhaltet alle betrachteten Stationen mit Ausnahme von Islas Orcadas und Argentine Island.

Der Vergleich der Antarktismittel mit und ohne globaler Backgroundkorrektur (Haimberger (2007) oder Abschnitt 3.1.9 Seite 26) Abbildungen 5.3 und 5.2 zeigt,

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

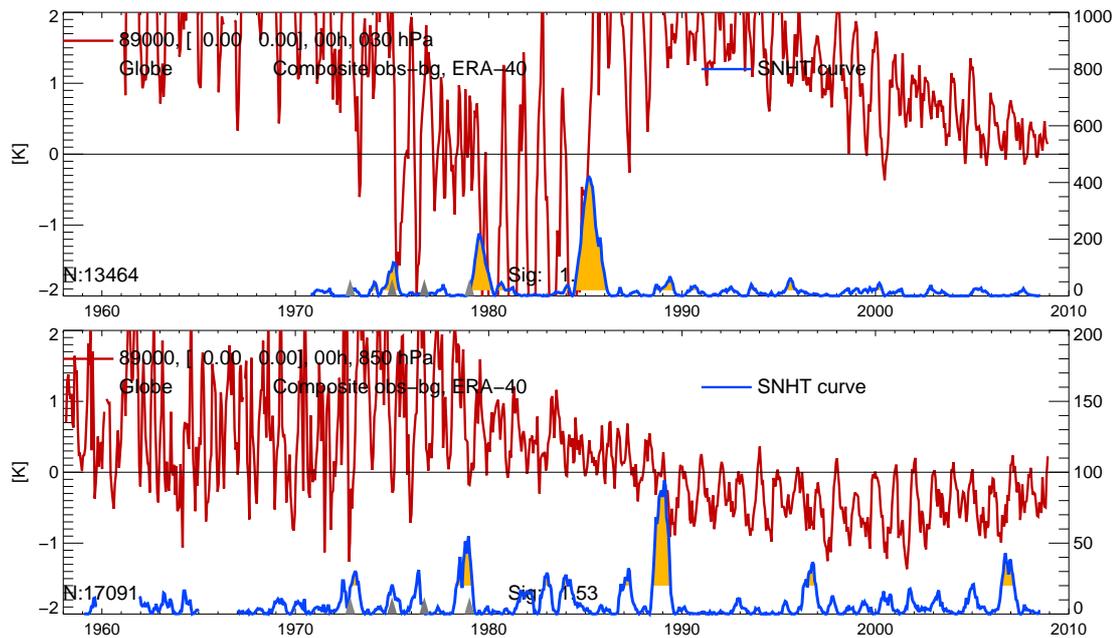


Abbildung 5.2: In rot die mittlere 00:00 UTC Innovationszeitreihe ohne globaler Backgroundkorrektur der Stationen mit Nummern zwischen 89000 und 90000 in 30 hPa und 850 hPa, in blau die SNHT Teststatistik dazu, Werte oberhalb des Signifikanzniveaus von 50 sind gelb eingefärbt. Graue Dreiecke auf der Zeitachse bezeichnen wesentliche Änderungen im Beobachtungssystem der Reanalyse wie zum Beispiel neue Satellitendaten oder Probleme mit Daten von einzelnen Satelliten.

dass durch die globale Backgroundkorrektur einige Inhomogenitäten in der Backgroundvorhersage beseitigt werden können. Man vergleiche zum Beispiel die 850 hPa Zeitserien in Abbildung 5.3 und 5.2 in den Jahren 1989, 1996 und 2006 wo in Abbildung 5.2 ohne globale Backgroundkorrektur signifikante Maxima in der Teststatistik zu sehen sind, während mit Backgroundkorrektur Abbildung 5.3 nur mehr ein signifikantes Maximum im Jahr 1979 übrig ist, an dem sich wenig geändert hat und das offenbar in der Antarktis stärker ausgeprägt ist, als im globalen Mittel. In den 30 hPa Zeitserien werden durch die globale Backgroundkorrektur Inhomogenitäten in den Jahren 1975 und 1995 korrigiert, am auffälligsten ist aber eine Inhomogenität im Jahr 1985, die in der Antarktis deutlich stärker ist, als global gesehen und durch Abziehen des globalen Mittels nicht entfernt wird. Dies hat mit dem zu dieser Zeit verwendeten NOAA-9 Satelliten zu tun und hat große Auswirkungen auf die Temperaturen in der Stratosphäre. Es kann durchaus sein,

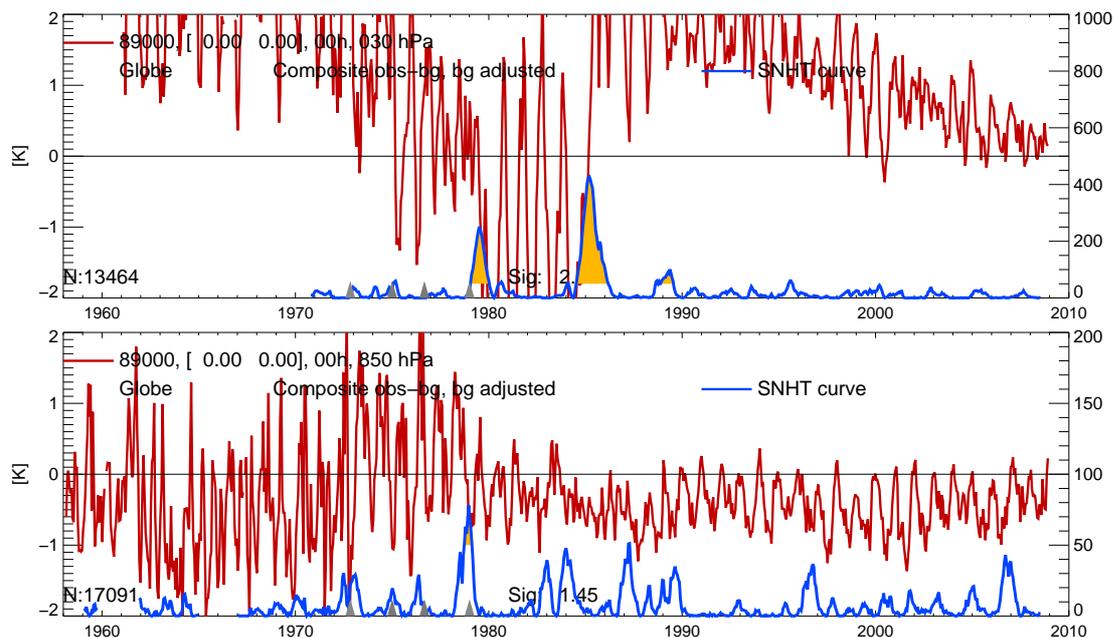


Abbildung 5.3: Wie Abbildung 5.2 mit globaler Backgroundkorrektur.

dass diese Inhomogenität die größte in einem Zeitraum  $\pm 2$  Jahre ist. Wird ein Mittel aus umliegenden Stationen gebildet, so ist es sehr wahrscheinlich, dass die Inhomogenität dort auch auftritt und keine Korrektur gemacht wird. Befindet sich dann allerdings im Zeitraum  $\pm 2$  Jahre ein echter Bruch, der kleiner ist, so kann es passieren, dass dieser „übersehen“ wird. Kann kein Mittel aus umliegenden Stationen gebildet werden, weil zu wenig umliegende Stationen vorhanden sind und wird die Korrektur daher nur aufgrund von Innovationszeitreihen und 00:00 UTC - 12:00 UTC Zeitreihen (die überall dort fehlen, wo nur ein Mal pro Tag gemessen wird, was bei antarktischen Stationen häufig ist) berechnet, so wird womöglich eine falsche Korrektur gemacht. Um zu überprüfen inwiefern diese Effekte tatsächlich auftreten, wird das Mittel über die antarktischen Stationen von den einzelnen Innovationszeitreihen abgezogen und die Version ohne Korrekturen mit der korrigierten verglichen.

Auf Grundlage der analysierten Zeitserien werden weitere Experimente durchgeführt um die Korrekturberechnung zu verbessern. In Experiment 7a werden die Stationen südlich von  $50^\circ$  S nicht mit dem aus den Innovationen an der Station selbst berechneten Bruchprofil korrigiert, sondern, dort wo vorhanden, mit dem Bruchprofil aus dem Mittel aus umliegenden Stationen. Die Anzahl der Brüche nimmt dadurch stark ab. Da RAOBCORE normalerweise mindestens 20 Stationen in einem Umkreis von 5000 km fordert um ein Mittel aus umliegenden Sta-

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

tionen zu bilden und diese Bedingung bei antarktischen Stationen nur sehr selten erfüllt ist, können fast keine Korrekturen gemacht werden. Es wird daher mit der Mindeststationsanzahl für das Mittel aus umliegenden Stationen experimentiert, wobei vorerst die Korrektur wieder mit den Innovationszeitreihen gemacht wird, also das Mittel aus umliegenden Stationen nur zur Homogenitätsprüfung und zum Signifikanztest nicht aber zur Korrektur selbst verwendet wird.

In Experiment 7d wird die Mindeststationsanzahl global von 20 auf 10 gesetzt. Das ändert wenig bei den antarktischen Stationen, aber sonst ändert sich einiges. Global wird die räumliche Homogenität schlechter, ausgenommen in 200 hPa für die 00:00 UTC Zeitreihen, in der Antarktis wird sie in 100 hPa und 200 hPa besser. Betrachtet man die einzelnen antarktischen Zeitreihen, so gibt es bei knapp der Hälfte Verbesserungen und bei der anderen Hälfte Verschlechterungen der Homogenität bezüglich des Antarktismittels.

Da Änderungen bei den Stationen außerhalb der Antarktis nicht gewünscht sind, vor allem keine Verschlechterung, wird in Experiment 7f die Mindeststationsanzahl für die antarktischen Stationen auf 10 und sonst auf 20 gesetzt. Für die Antarktis ist die Änderung der räumlichen Homogenität wie in Experiment 7d, global betrachtet sind die Unterschiede zu Experiment 6 klein und spiegeln im Wesentlichen die Änderungen in der Antarktis wieder.

In Experiment 8a werden die antarktischen Stationen (südlich von  $50^\circ$  S) mit dem Mittel aus mindestens 10 umliegenden Stationen korrigiert, die anderen Stationen wie in Experiment 6. Bei der Station Syowa 89532 war im Jahr 1987 ein Radiosondenwechsel. Es wird weder in Experiment 6 noch in Experiment 7f ein Bruch im Jahr 1987 gefunden, obwohl das gut wäre. Nach kleinen Verbesserungen in der Korrekturroutine (Experiment 8b) wird für die Station Syowa im Jahr 1987 eine Korrektur berechnet, dafür 1986 nicht mehr. Die Zeitreihen werden deutlich homogener, wobei es noch einzelne Probleme gibt, wie zum Beispiel, dass Brüche in den unteren Schichten nicht korrigiert werden. Ein weiteres Problem ist die Station 94998 Macquarie Island, die auf  $54,5^\circ$  S liegt und sehr sensibel auf Änderungen der Korrekturen reagiert.

Um das Problem mit der Station 94998 zu lösen, werden in Experiment 9a nicht mehr die Stationen südlich von  $50^\circ$  S sondern nur mehr die Stationen südlich von  $55^\circ$  S mit dem Mittel aus umliegenden Stationen korrigiert. Die Stationen für den Mittelwert werden für Stationen südlich von  $55^\circ$  S südlich von  $50^\circ$  S oder im Umkreis von 5000 km gesucht, für die nördlich von  $55^\circ$  S gibt es keine Beschränkungen, wobei die niedrigere Mindeststationsanzahl weiterhin südlich von  $50^\circ$  S gilt. In dieser Version ist die Homogenität der Trends verbessert. In den meisten Höhen hat die Station 94998 ähnliche Trends wie die umliegenden Stationen.

In Experiment 9b wird die Anzahl der benötigten Stationen für das Mittel weiter herabgesetzt (auf 5) weil einige Brüche nicht korrigiert werden können, zum

Beispiel bei der Station 89542 Molodezhnaya am 31.12.1988. Tests mit Korrekturen aus den Innovationen wenn keine oder zu wenig Werte für eine Korrektur mit einem Mittel aus umliegenden Stationen vorhanden sind, haben gezeigt, dass es besser ist, gar keine Korrektur zu machen, als mit den Innovationen zu korrigieren. Setzt man nur noch fünf Stationen für ein Mittel voraus, so verbessern sich die Ergebnisse was die räumliche Homogenität der Trends betrifft in den höheren Schichten, aber verschlechtern sich leicht in den unteren Schichten. Betrachtet man die einzelnen Zeitserien, so überwiegen die positiven Effekte.

Experimente mit Mindeststationsanzahlen von 6, 7 und 4 wurden gemacht. Die Station 94998 Macquarie Island reagiert sehr stark auf diese Veränderungen was die Trends betrifft. Beim nächsten Experiment wird die Mindeststationsanzahl deshalb nur für die Stationen südlich von 55° S herabgesetzt. Die besten Ergebnisse gibt es mit einer Mindeststationsanzahl von 5 für die antarktischen Stationen. Diese Version wird im folgenden als Experiment 9 bezeichnet und im Vergleich mit den Experimenten 4 und 6 für die einzelnen Stationen analysiert.

| <b>Experiment</b> | <b>Eigenschaften</b>  | <b>Pfad zu den Daten</b>                   |
|-------------------|---|--|
| Experiment 4      | Wie in Haimberger et al. (2008) nur mit ERA-Interim Daten, bis 2004.  | /home/servx2/sabiner/scratch2/scratch/exp4 |
| Experiment 5      | Zeitreihen bis 2008, kein Vergleich mit einem Mittel aus umliegenden Stationen beim Homogenisieren.   |  |
| Experiment 6      | Wie Experiment 4 bis 2008.  | /home/servx2/sabiner/scratch2/scratch/exp6 |
| Experiment 7a     | Stationen südlich von 50° S werden mit einem Mittel aus umliegenden Stationen korrigiert, wobei für das Mittel mindestens 20 Stationen in einem Umkreis von 5000 km verwendet werden. |  |
| Experiment 7d     | Für den Vergleich mit einem Mittel aus umliegenden Stationen werden global nur noch 10 Stationen verlangt. Korrektur mit den Innovationen.  |  |
| Experiment 7f     | Wie 7d, für Stationen nördlich von 50° S 20 Stationen für ein Mittel aus umliegenden Stationen, südlich 10.   |  |
| Experiment 8a     | Wie 7f, Korrektur für Stationen südlich von 50° S mit dem Mittel aus umliegenden Stationen.   |  |

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

|               |  |  |
|---------------|--|--|
| Experiment 9a | Wie 8a, nur liegt die Grenze für eine Korrektur mit einem Mittel aus umliegenden Stationen bei 55° S. Stationen, die für ein Mittel aus umliegenden Stationen für diese Stationen verwendet werden, müssen südlich von 50° S liegen. |  |
| Experiment 9b | Wie 9a, Mittel aus umliegenden Stationen für Stationen südlich von 50° S aus mindestens 5 Stationen.   |  |
| Experiment 9  | Wie 9b, die niedrigere Mindeststationsanzahl für ein Mittel aus umliegenden Stationen gilt nur für Stationen südlich von 55° S.  | /home/servx2/sabiner/scratch2/scratch/exp9 |

Tabelle 5.1: Beschreibung der in dieser Diplomarbeit verwendeten Experimente mit RAOBCORE/RICH.

Im Folgenden werden die Korrekturen und Brüche an den einzelnen Stationen im Detail beschrieben.

### 5.1 Amundsen/Scott

Die US-amerikanische Station Amundsen/Scott, Stationsnummer 89009, befindet sich direkt am Südpol (0°,90° S). Die nächste Station ist die Station Vostok 2, die bereits 1284 km entfernt und heute nicht mehr in Betrieb ist. Die nächsten Stationen, die heute noch in Betrieb sind, sind die 1351 km entfernte Station Mc Murdo, die 1610 km entfernte Station Halley Bay, an der aber nur zum 12:00 UTC Termin gemessen wird und die 2138 km entfernte Station Novolazarevskaya. Der erste Radiosondenwechsel wird im Jahr 2005 über GTS gemeldet. Für das Jahr 2003 sind gleich zwei über GTS gemeldete Radiosondenwechsel in den a priori Wahrscheinlichkeiten (Abbildung 5.4) zu sehen, einer am Anfang des Jahres und der zweite gegen Ende. Davon kann eigentlich nur einer gefunden werden, da sie zu knapp beieinander liegen. In Experiment 9 wird ein Bruch am 31.1.2003 gefunden, was sehr gut zu dem ersten Radiosondenwechsel im Jahr 2003 passt, in Experiment 6 ist dieser Bruch nicht signifikant. In der Zeitserie der Maxima der Teststatistiken für die Mittel über benachbarte Hauptdruckflächen in der Stratosphäre (im folgenden auch als Stratosphärenmittel bezeichnet) sind die absoluten Maxima für die 00:00 UTC und 12:00 UTC Beobachtungen sowie für die Differenz zu einem Mittel aus umliegenden Stationen für die 00:00 UTC Beobachtungen eher

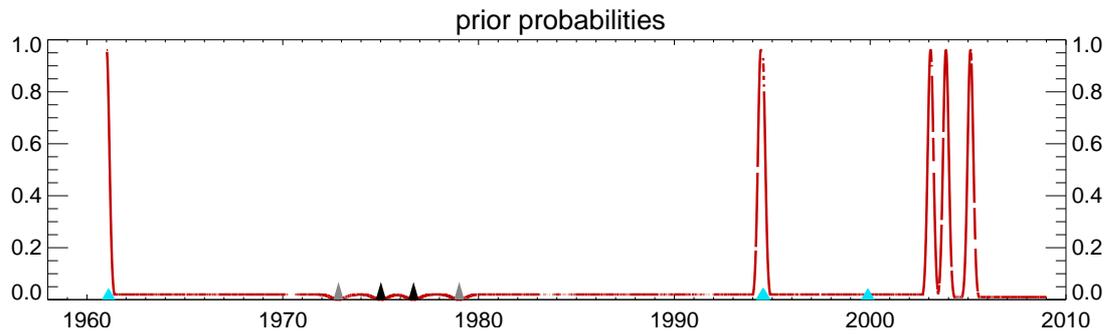


Abbildung 5.4: Zeitserie der a priori Bruchwahrscheinlichkeiten für die Station 89009 Amundsen/Scott aufgrund von Metadaten. Blaue Dreiecke auf der Zeitachse bezeichnen im CARDS dokumentierte Radiosondenwechsel und graue Dreiecke große Änderungen im Beobachtungssystem der Reanalysen. Bei Radiosondenwechseln wird die a priori Wahrscheinlichkeit auf 0,96 gesetzt, bei Änderungen im Beobachtungssystem auf 0, sonst auf 0,02 und ab 2003 wo die Radiosonden ihren Typ melden auf 0,01.

2005 oder Ende des Jahres 2003. In der Zeitreihe der Maxima der Teststatistik für Mittel über benachbarte Hauptdruckflächen in der Stratosphäre für die Differenz zu einem Mittel aus umliegenden Stationen und die 12:00 UTC Beobachtung ist ein Maximum Anfang 2003 zu sehen. Die berechnete Korrektur ist sehr klein.

Die nächste Korrektur, das heißt, die zeitlich gesehen nächst frühere, da RAOB-CORE mit der Homogenisierung bei den aktuellsten Daten beginnt und dann zeitlich zurück geht, wird in Experiment 4 für den 1.3.2000, in Experiment 6 für den 11.3.2000 und in Experiment 9 für den 18.3.2000 berechnet. In den Teststatistiken für die Innovationszeitreihen in den einzelnen Druckniveaus (Abbildung 5.5 Seite 52) sind in 30 hPa und 50 hPa signifikante Maxima zu sehen, in 200 hPa und 100 hPa gibt es auch Maxima, allerdings keine signifikanten. In der Zeitreihe der Maxima der Teststatistiken für die Mittel über benachbarte Hauptdruckflächen in der Troposphäre (im folgenden auch als Troposphärenmittel bezeichnet) sowie für das Stratosphären- und das Troposphärenmittel der Differenzzeitreihe zu einem Mittel aus umliegenden Stationen sind ebenfalls signifikante Maxima zu sehen. Es gibt keinen Eintrag in den Metadaten, der eine höhere a priori Wahrscheinlichkeit bewirken würde. Die Korrektur ist recht groß, etwa 1,5 K in 30 hPa in Experiment 9, und wirkt sich, wenn man den Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen betrachtet sehr positiv aus.

Am 13.10.1999 ist in Abbildung 5.4 ein blaues Dreieck zu sehen, das einen im CARDS dokumentierten Radiosondenwechsel anzeigt. Diesem wird allerdings keine größere a priori Wahrscheinlichkeit für einen Bruch zugewiesen, da zu diesem

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

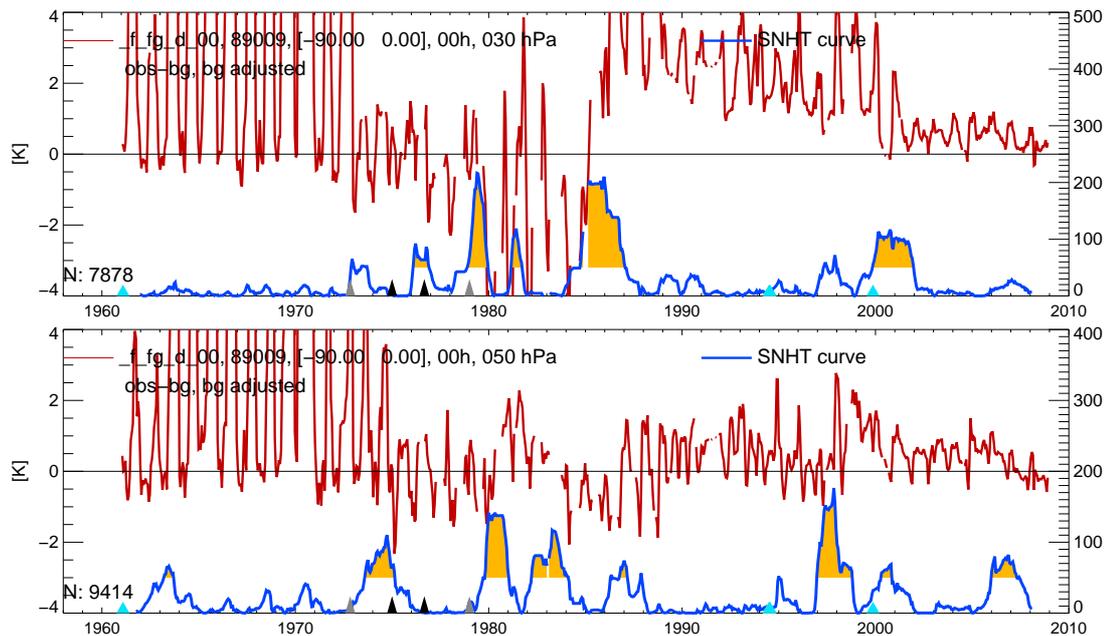


Abbildung 5.5: In rot die 00:00 UTC Innovationszeitserien in 50 hPa und 30 hPa mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 der Station Amundsen/Scott 89009, in blau die dazu gehörende Teststatistik  $T_k$  des SNHT. Bereiche in denen die Teststatistik Werte größer als 50 hat sind gelb eingefärbt, dies entspricht dem Signifikanzniveau. Dreiecke auf der Zeitachse wie in Abbildung 5.4.

Datum alle Stationen einen Bruch verzeichnet haben, bei denen der letzte dokumentierte Radiosondentyp nicht mit dem aktuell gestarteten übereinstimmt, also irgendwo eine Dokumentationslücke aufgetreten ist.

Der nächste Bruch wird am 30.10.1997 gefunden. Signifikante Maxima in der Teststatistik für die Innovationen der einzelnen Druckniveaus gibt es in allen betrachteten Niveaus sowie in allen Teststatistikzeitserien für Schichtmittel. Das Bruchdatum ist in allen Experimenten gleich, das heißt, es ist nicht von der Länge der Zeitreihe oder der Korrekturberechnungsmethode abhängig. Diese Korrektur wird auch sehr gut bewerkstelligt.

Am 1.6.1994 gibt es einen Radiosondenwechsel, zu dem es in Experiment 4 und 6 eine Korrektur ebenfalls am 1.6.1994 und in Experiment 9 eine am 18.6.1994 gibt. Es sind kaum Maxima in den Teststatistikzeitserien zu sehen und die Korrekturen sind klein.

Der nächste Bruch wird am 18.8.1988 in der 00:00 UTC Zeitserie gefunden. Es gibt signifikante Maxima in der Teststatistik für die Innovationen in 200 hPa, 100

hPa, im Troposphärenmittel und für die Stratosphären- und Troposphärenmittel der Differenzzeitreihen zwischen der Station Amundsen/Scott und dem Mittel aus umliegenden Stationen. Dieser Bruch wird in Experiment 6 nicht mehr gefunden. In Experiment 9 wird wieder ein Bruch gefunden, allerdings erst am 21.1.1989.

Am 1.1.1986 in Experiment 4 beziehungsweise 11.1.1986 in Experiment 6 und am 7.4.1986 in Experiment 9 wird der nächste Bruch gefunden, mit signifikanten Maxima in der Teststatistik der Innovationen in 200 hPa, 30 hPa, im Troposphärenmittel und im Troposphären- und Stratosphärenmittel der Differenzzeitreihen zu einem Mittel aus umliegenden Stationen. Im Jahr 1985 wird der NOAA 9 Satellit zum ersten Mal verwendet und im April 1986 kommt es zu einem Ausfall des NOAA 9 Satelliten. Beides verursacht große Inhomogenitäten in der ERA-40 Backgroundvorhersage, die am deutlichsten in der 30 hPa Innovationszeitreihe (Abbildung 5.5 Seite 52) zu sehen sind. Durch die unterschiedliche Größe dieser Inhomogenität an verschiedenen Stationen beziehungsweise möglicherweise zusätzlicher Inhomogenität in den Radiosondendaten kann es sein, dass auch in der Teststatistik für die Differenzzeitreihen zu einem Mittel aus umliegenden Stationen Maxima auftreten. Eine aus den Innovationen berechnete Korrektur verbessert in diesem Fall zwar oft die Homogenität der Innovationszeitreihe, aber nicht unbedingt die der Radiosondentemperaturzeitreihe. Im Fall der Station Amundsen/Scott ist auch in der Differenzzeitreihe zu den umliegenden Stationen eine Inhomogenität zu sehen (Abbildung 5.6). Die Korrektur ist in 30 hPa in allen Experimenten dementsprechend

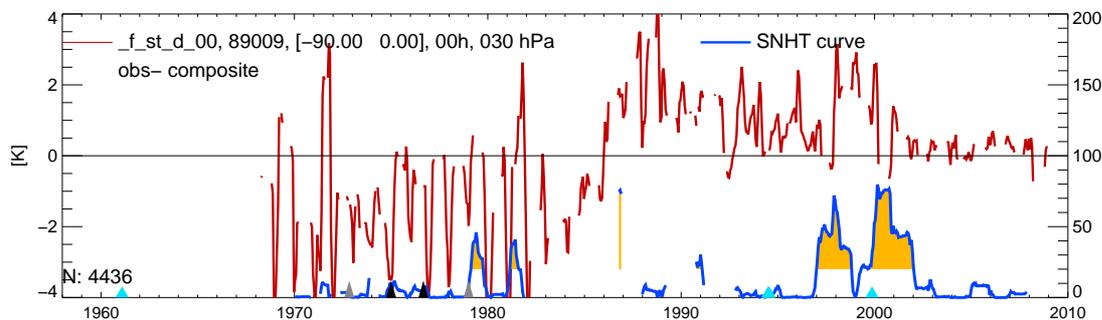


Abbildung 5.6: In rot die 00:00 UTC Zeitserie der Differenz der Radiosondentemperaturzeitreihe zu einem Mittel aus mindestens fünf umliegenden Stationen in 30 hPa an der Station Amundsen/Scott 89009, in blau die dazu gehörende SNHT Teststatistik.

groß und bringt eine Verbesserung (siehe Abbildung 5.7).

Am 11.4.1984 gibt es in Experiment 6 einen Bruch, den es in Experiment 4 und 9 nicht gibt.

Der Bruch am 3.1.1982 in Experiment 4 und 6 liegt, wenn man die Innovationen in 50 hPa und 100 hPa betrachtet, jeweils zwischen zwei signifikanten Maxima der

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

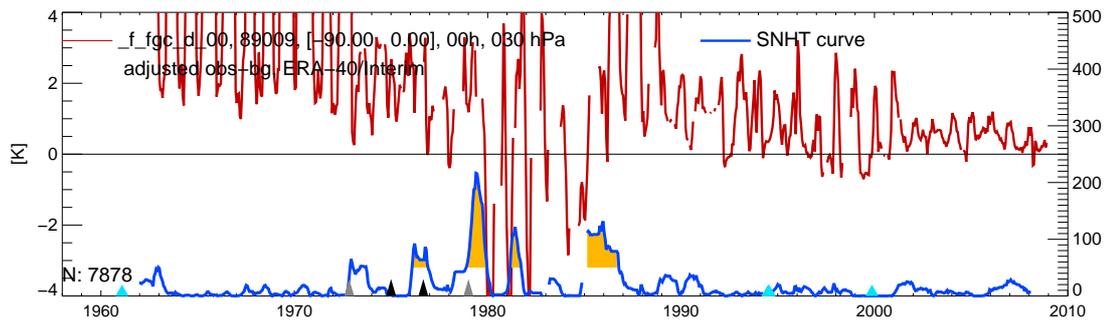


Abbildung 5.7: In rot die mit RAOBCORE Experiment 6 korrigierte 00:00 UTC Zeitserie der Innovationen in 30 hPa für die Station Amundsen/Scott 89009.

Teststatistik, es gibt aber signifikante Maxima der Teststatistik für das Stratosphärenmittel, das Troposphärenmittel der Innovationen und der Differenzzeitreihen zu einem Mittel aus umliegenden Stationen. Es gibt zwar eine Korrektur im Jahr 1982, allerdings verbleiben in verschiedenen Niveaus Inhomogenitäten in den Jahren 1983 - 1986.

Der letzte Bruch wird in Experiment 4 und Experiment 9 am 3.1.1980 gefunden. Es gibt signifikante Maxima der Teststatistikzeitreihen für die Innovationen in 100 hPa, 50 hPa, 30 hPa, im Troposphärenmittel und in den Schichtmitteln der Differenzzeitreihen zu einem Mittel aus umliegenden Stationen. Die Korrektur aus Experiment 4 führt in 200 hPa und 50 hPa zu Verbesserungen, in 100 hPa gibt es wenig Veränderung und in 30 hPa ist sie nicht zufriedenstellend. Es bleiben Inhomogenitäten in den siebziger Jahren, die Korrektur aus Experiment 9 ist sehr gut.

In Experiment 6 wird am 2.1.1963 ein zusätzlicher Bruch gefunden und eine sehr große Korrektur gemacht. In Experiment 9 wird dieser Bruch nicht mehr akzeptiert, da es nicht genügend umliegende Stationen zu diesem Zeitpunkt gibt um ein Mittel für eine Korrektur zu bilden.

Der Vergleich der RAOBCORE Korrekturen aus Experiment 6 mit den RICH Korrekturen zeigt, dass für die Station Amundsen/Scott die Korrekturen sehr unterschiedlich ausfallen. Die erste Korrektur ist noch recht ähnlich, danach gibt es massive Unterschiede, wobei an den korrigierten Innovationszeitserien zu sehen ist, dass RAOBCORE die für diese Station besseren Korrekturen macht, was nicht sehr verwunderlich ist, wenn man bedenkt, dass die nächsten Stationen, die RICH zur Verfügung hat, schon sehr weit weg und am Eisrand liegen, wo bereits ganz andere Einflüsse eine Rolle spielen.

Das Differenzprofil zu den COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) (Abbildung 5.8 Seite 55) zeigt für das 00:00 UTC Profil bis in eine Höhe

von 50 hPa keinen Bias, oberhalb sind die Radiosondentemperaturen verglichen mit denen aus Radiookkultationsdaten um 0,5 K bis 1 K zu hoch. Für das 12:00 UTC Profil ist zu sehen, dass die Radiosondentemperaturen zwischen 250 hPa und 50 hPa 0,5 K tiefer sind als die aus Radiookkultationsdaten, oberhalb von 50 hPa und unterhalb von 250 hPa gibt es keinen Bias.

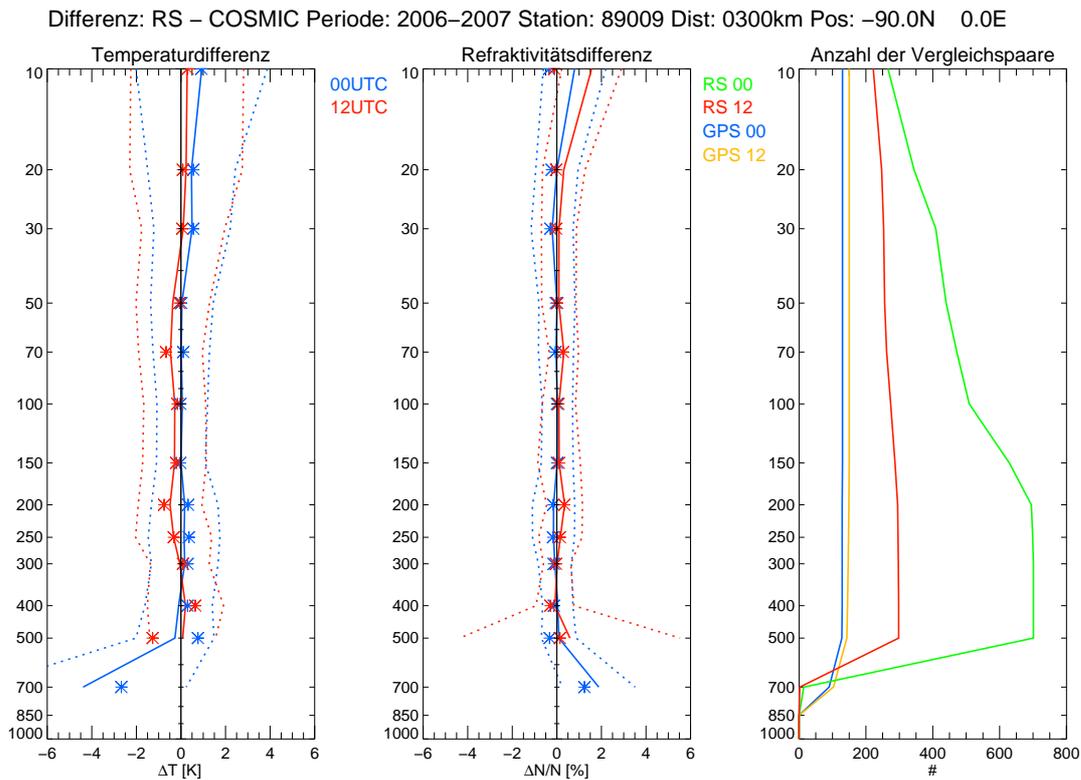


Abbildung 5.8: Mittleres Profil der Temperatur- und Refraktivitätsdifferenzen zwischen der Station 89009 Amundsen/Scott und COSMIC GPS Radiookkultationsdaten, sowie die Anzahl der jeweiligen Beobachtungen.

Zieht man die über die Antarktis gemittelten Innovationen von denen an der Station Amundsen/Scott ab, so ist zu sehen, dass für 00:00 UTC die ersten drei Brüche sehr gut korrigiert werden, wobei der Bruch 1994 sehr klein ist. Auch der Bruch 1986 wird gut korrigiert. Die Korrektur 1984 in Experiment 6 ist in 30 hPa etwas zu groß, wahrscheinlich wegen den großen Inhomogenitäten in der Backgroundvorhersage 1985 und 1986. 1982 bleibt eine kleine Inhomogenität in 50 hPa bestehen, der Bruch 1980 wird sehr gut korrigiert. Die Korrektur aus Experiment 6 im Jahr 1963 ist viel zu groß, beziehungsweise wäre nicht notwendig. Für die 12:00

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

UTC Zeitserie wird 1986 in 30 hPa in Experiment 6 keine Korrektur gemacht, in Experiment 4 und 9 schon. 1963 wird wie schon für die 00:00 UTC Zeitreihe in Experiment 6 eine zu große Korrektur gemacht. 2000, 1997, 1994, 1986, 1982, und 1984 (50 hPa und 200 hPa) werden gut korrigiert.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1962-2006) | Experiment 4<br>(1962-2006) | Experiment 6<br>(1962-2008) | Experiment 9<br>(1962-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | 0,08                        | -0,85                       | -0,88                       | -0,68                       |
| 50 hPa      | -0,43                       | -0,7                        | -0,72                       | -0,72                       |
| 100 hPa     | -0,85                       | -0,86                       | -1,16                       | -0,88                       |
| 200 hPa     | -0,38                       | -0,83                       | -0,64                       | -0,7                        |

Trends an der Station Amundsen/Scott in K Dekade<sup>-1</sup>.

Die Auswirkungen der Korrekturen aus Experiment 4 und 9 auf die Trends sind bei der Station Amundsen/Scott ähnlich.

## 5.2 Syowa

Die japanische Station Syowa, Nummer 89532, liegt auf 69° S und 39, 58° W. Am 13.10.1999 ist ein Radiosondenwechsel dokumentiert, der wie schon in Abschnitt 5.1 (Seite 51) beschrieben, zu diesem Zeitpunkt ziemlich sicher nicht stattgefunden hat.

Am 6.3.1998 wird in Experiment 4 der erste Bruch gefunden, die Korrektur fällt sehr klein aus. Nur in der Teststatistik für die Troposphärenmittel der 00:00 UTC und 12:00 UTC Zeitreihe sind signifikante Maxima zu sehen. Weder die RAOBCORE noch die RICH Korrekturen sind bei diesem Bruch besonders groß, bis auf die höchsten Niveaus sind sie kleiner als 0,5 K. Die Korrekturen gehen vor allem für die 00:00 UTC Zeitserie in vielen Niveaus in unterschiedliche Richtungen. In Experiment 9 sind die Korrekturen ebenfalls sehr klein, in Experiment 6 gibt es diesen Bruch nicht. Für die Korrektur der 00:00 UTC Zeitserie werden von RICH 14 Stationen verwendet, davon sechs antarktische, für die 12:00 UTC Zeitserie sind es zwölf Stationen, davon sieben antarktische. Bei den korrigierten Zeitserien sind die größten Unterschiede in 30 hPa und 50 hPa zu sehen, wobei RAOBCORE die besseren Korrekturen macht.

Am 1.5.1997 ist ein Wechsel der Bodenstation im CARDS dokumentiert, im März 1995 ein Radiosondenwechsel und im Jänner 1993 eine fehlerhafte Strahlungskorrektur, es wird aber erst am 21.1.1989 in Experiment 6 ein Bruch gefunden, die Korrektur ist so klein, dass es besser ist nicht zu korrigieren. Die Ursache für den Bruch könnte in diesem Fall der Übergang von ERA-40 zu ERA-Interim

sein.

Im Februar 1987 ist wieder ein Radiosondenwechsel im CARDS dokumentiert es wird aber in Experiment 4 und 6 kein Bruch gefunden, in Experiment 9 schon. Im Jahr 1989 und 1987 gibt es jeweils signifikante Maxima in den Teststatistikzeitserien für die Schichtmittel und die Differenzzeitreihen zu umliegenden Stationen es werden jedoch in den Experimenten 4 und 6 keine Brüche korrigiert.

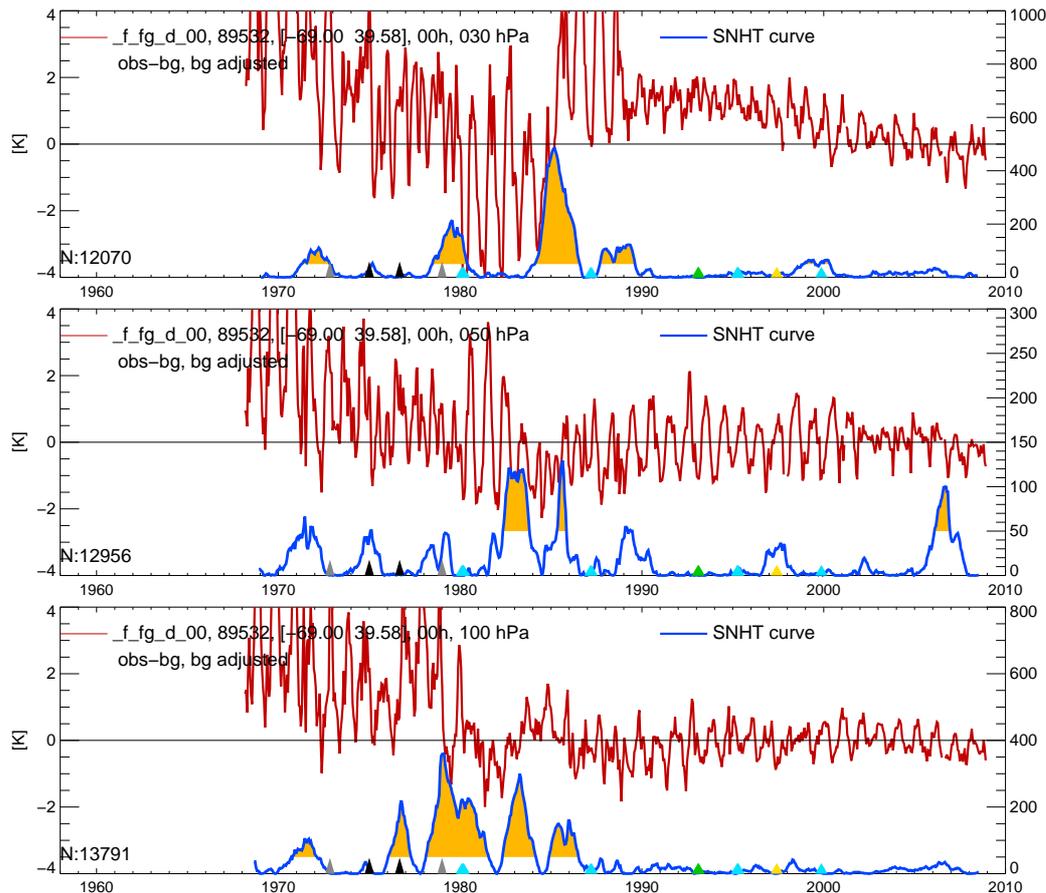


Abbildung 5.9: Wie Abbildung 5.5 für 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa an der Station Syowa 89532. Gelbe Dreiecke bezeichnen im CARDS dokumentierte neue Bodenstationen und grüne Dreiecke Änderungen in der Strahlungskorrektur.

Der nächste Bruch wird in Experiment 4 am 18.3.1985 gefunden. In Experiment 6 wird ein Bruch am 19.7.1985 gefunden, in Experiment 9 wird 1985 keine Korrektur gemacht. Es gibt signifikante Maxima in der Teststatistik für die 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa Zeitreihen zu beiden Beobachtungsterminen, wobei das

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

Maximum in 50 hPa etwas später ist und das Maximum in 30 hPa extrem groß, was aber auch mit dem NOAA 9 Satelliten zu tun hat, dessen Daten zu dieser Zeit zum ersten Mal assimiliert wurden (Abbildung 5.9). Weiters gibt es Maxima in allen Teststatistikzeitserien für Schichtmittel. Die Korrekturprofile von RAOB-

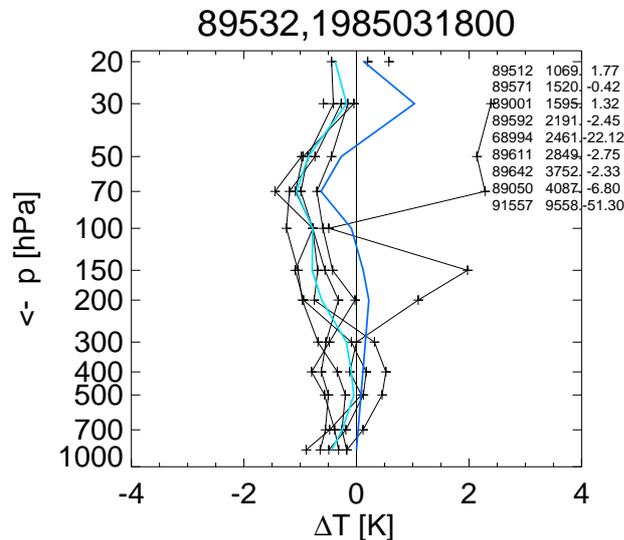


Abbildung 5.10: Profil der RAOBCORE Experiment 4 (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den 18.3.1985 an der Station 89532 Syowa.

CORE und RICH (Abbildung 5.10) haben für 00:00 UTC zwar eine ähnliche Form, unterscheiden sich aber in den meisten Höhen um 0,5 - 1 K. Die Differenz bewirkt in manchen Höhen, dass die Korrekturen in unterschiedliche Richtungen gehen. RICH verwendet neun Stationen, von denen sieben antarktische Stationen sind, allerdings ist die nächste Station bereits 1069 km weit weg und eine liegt in den Tropen. Die RAOBCORE Korrekturen liegen in der Stratosphäre außerhalb der meisten Differenzprofile zu umliegenden Stationen. Die 12:00 UTC Korrekturen von RAOBCORE und RICH haben in vielen Niveaus unterschiedliche Vorzeichen. RICH verwendet zwölf umliegende Stationen, von denen sechs antarktische sind. Am besten ist, wenn man die korrigierten Innovationszeitreihen vergleicht, die RAOBCORE Korrektur für die 12:00 UTC Zeitserie in 30 hPa. Auch sonst bringt sie Verbesserungen, allerdings bleiben noch Inhomogenitäten über, sowohl im Jahr 1985 als auch Anfang des Jahres 1989 und in der Zeit dazwischen, hier allerdings nicht einheitlich (Abbildung 5.11 Seite 59). Nicht alle Inhomogenitäten in den Abbildungen 5.9 und 5.11 sind auf die Radiosonden zurückzuführen, viele kommen

auch aus der Backgroundvorhersage. Betrachtet man den Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen, so entsteht der Eindruck, dass die Korrektur 1985 stark von der Inhomogenität in der Backgroundvorhersage beeinflusst ist. In Experiment 9 wird 1985 gar keine Korrektur gemacht.

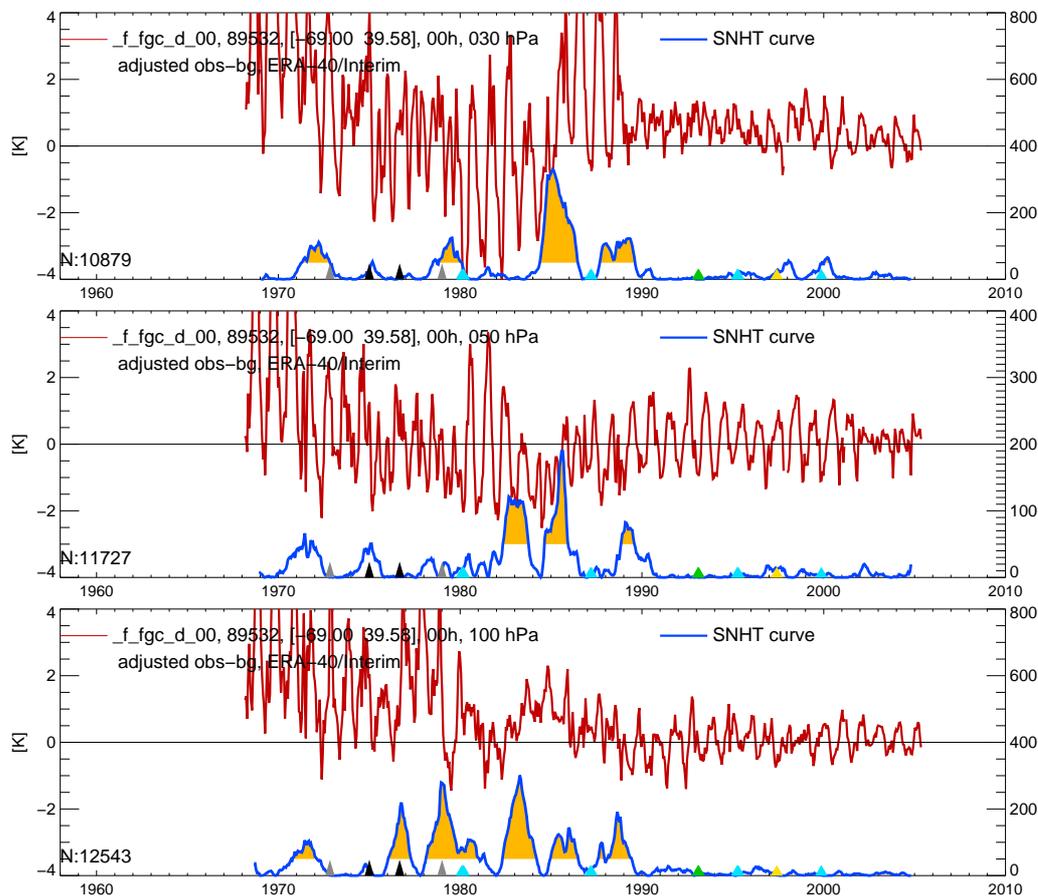


Abbildung 5.11: Mit RAOBCORE Experiment 4 korrigierte 00:00 UTC Zeitserien der Innovationen in 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa an der Station Syowa 89532.

In Experiment 6 und 9 wird ein Bruch am 19.11.1983 gefunden. Es gibt signifikante Maxima in der Teststatistik für 100 hPa und 50 hPa zu beiden Terminen und in 850 hPa für die 00:00 UTC Beobachtungen (Abbildung 5.9). Im Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen sind keine signifikanten Maxima in der Teststatistikzeitserie zu sehen, in der Differenz zu mindestens fünf Nachbarstationen ist in 850 hPa für die 00:00 UTC Zeitserie ein signifikantes Maximum in der Teststatistik zu sehen. In den Teststatistikzeitserien für die Stratosphärenmittel der 12:00 UTC und 00:00 UTC Zeitreihe sind signifikante Maxima zu sehen. In

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

den Troposphärenmitteln gibt es zwar keine Maxima zu diesem Zeitpunkt, aber die Werte der Teststatistik liegen in den Achzigerjahren dauerhaft über 50. Im Stratosphärenmittel für die Differenzen zu umliegenden Stationen für die 00:00 UTC Zeitreihe ist ebenfalls ein Maximum zu sehen. Die Korrekturen sind klein.

Im Jänner 1980 ist ein Radiosondenwechsel dokumentiert, und am 21.2.1980 wird in allen Experimenten ein Bruch gefunden. Es gibt signifikante Maxima in der Teststatistik für 00:00 UTC in 100 hPa, 30 hPa und Troposphärenmittel sowie für 12:00 UTC in 850 hPa, 100 hPa, 50 hPa, 30 hPa, Stratosphären- und Troposphärenmittel. Die RAOBCORE Korrektur aus Experiment 6 ist wieder recht gut, allerdings sieht sie für die 12:00 UTC Zeitserie in 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa noch ein bisschen zu klein aus, obwohl sie dort schon bis zu 2 Kelvin groß ist. Dieser Eindruck ändert sich, wenn man den Vergleich mit dem Antarktismittel betrachtet, dann passen die Korrekturen. In Experiment 9 sind die Korrekturen sogar größer und sehen, wenn man mit dem Antarktismittel vergleicht, zu groß aus. Es könnte natürlich auch sein, dass die Änderung im Satellitenbeobachtungssystem im Jahr 1979 hier eine Rolle spielt.

Ein Maximum in der Teststatistik ist im Jahr 1976 zu sehen, der Zeitpunkt stimmt gut mit dem Ende der Assimilation von Daten des NOAA 4 Satelliten überein. Dementsprechend sind in der Differenzzeitreihe zum Mittel der Innovationen aller antarktischen Zeitreihen kein Maximum in der Teststatistikzeitserie zu sehen. Weitere Maxima in der Teststatistikzeitserie für die 00:00 UTC Beobachtungen gibt es 1973 in 100 hPa im Vergleich mit dem Antarktismittel und in den 100 hPa und 30 hPa Innovationszeitserien im Jahr 1971. Im Troposphärenmittel ist hier auch ein Maximum zu sehen, es ist aber offenbar nicht signifikant und es gibt keine Korrektur. Am 7.4.1969 und 10.12.1962 gibt es Brüche in der 12:00 UTC Zeitserie die mit Datenlücken zu tun haben dürften. Der Bruch 1962 wird in Experiment 9 nicht mehr korrigiert, da es zu dieser Zeit nicht genug umliegende Stationen gibt, um eine Korrektur zu berechnen.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1969-2006) | Experiment 4<br>(1969-2006) | Experiment 6<br>(1969-2008) | Experiment 9<br>(1969-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | -0,55                       | -0,44                       | -0,43                       | 0,04                        |
| 50 hPa      | -0,81                       | -0,58                       | -0,67                       | -0,49                       |
| 100 hPa     | -1,03                       | -0,77                       | -0,88                       | -0,71                       |
| 200 hPa     | -0,58                       | -0,66                       | -0,69                       | -0,24                       |

Trends an der Station Syowa in K Dekade<sup>-1</sup>.

In 850 hPa gibt es einen sehr schwachen positiven Trend, an dem sich durch die Korrekturen nichts ändert.

Das Differenzprofil zu COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009)

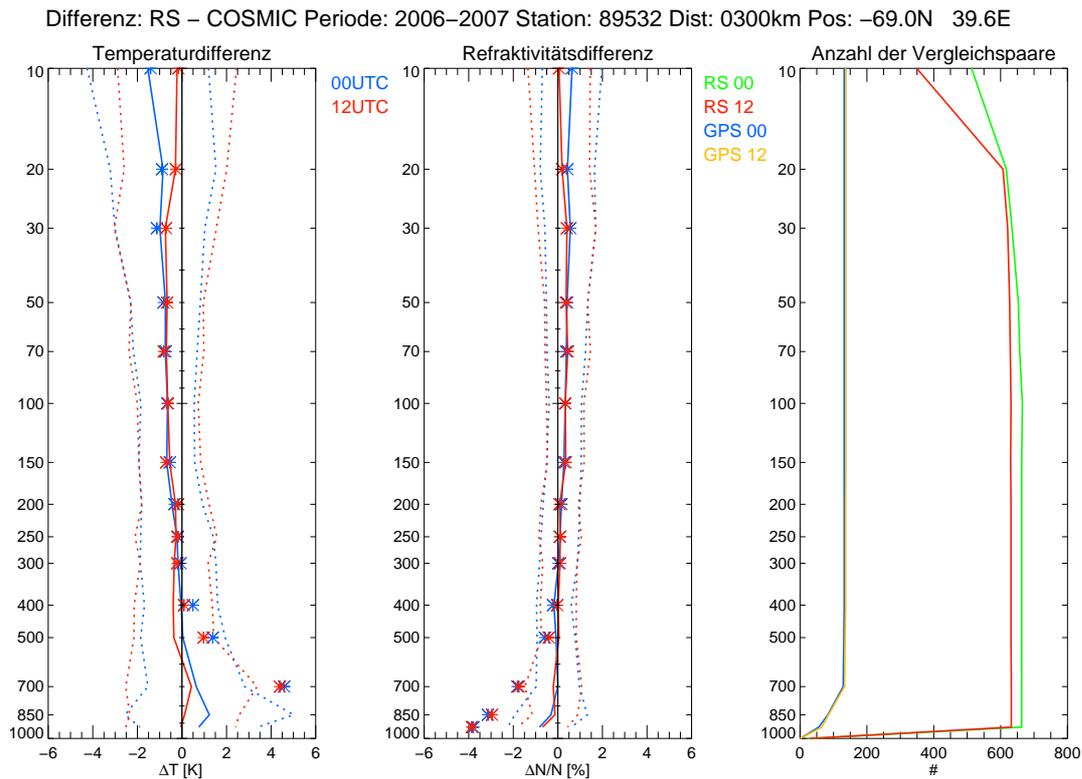


Abbildung 5.12: Mittleres Profil der Temperatur- und Refraktivitätsdifferenzen zwischen der Station 89532 Syowa und COSMIC GPS Radiookkultationsdaten, sowie die Anzahl der jeweiligen Beobachtungen.

(Abbildung 5.12 Seite 61) zeigt sowohl für das 00:00 UTC als auch für das 12:00 UTC Profil, dass die Radiosonden etwas tiefere Temperaturen messen als die aus GPS Radiookkultationen gewonnenen. Der Bias beträgt etwa 0,5 K zwischen 250 und 200 hPa, oberhalb etwa 1 K. Oberhalb von 30 hPa wird der Bias des 12:00 UTC Profils wieder kleiner, jener des 00:00 UTC Profils größer, bis zu 1,5 K.

Der Vergleich der Radiosondendaten mit MSU Satellitendaten zeigt für 00:00 UTC in der TLS Schicht gute Übereinstimmung zwischen den Radiosondendaten und den Satellitendaten. Vor 1985 ist die Übereinstimmung mit RAOBCORE besser als die mit RICH. 1980 gibt es eine Korrektur, wobei es erstmals größere Unterschiede zwischen RAOBCORE, RICH und den unkorrigierten Radiosonden gibt. Da die Zeitreihe der Satellitendaten erst 1979 beginnt, ist es schwer zu sagen, welche Version am besten ist. Die Trends der Anomaliedifferenzzeitserien zum RSS sind für 1979-2006 für die unkorrigierten Radiosonden  $-0,14 \text{ K Dekade}^{-1}$ , für die mit RAOBCORE korrigierten  $-0,1 \text{ K Dekade}^{-1}$  und für die mit RICH korrigierten  $-0,03 \text{ K pro Dekade}$ . Werden für die Korrekturen und die Trendberechnung Daten

bis 2008 herangezogen, so ändern sich vor allem für die mit RICH korrigierten Daten die Trends der Differenzzeitserien stark und betragen nun für die unkorrigierten Radiosonden  $-0,1 \text{ K Dekade}^{-1}$ , für die mit RAOBCORE korrigierten  $-0,06 \text{ K Dekade}^{-1}$  und für die mit RICH korrigierten  $0,17 \text{ K Dekade}^{-1}$ . Randel and Wu (2006) haben mit dem homogenisierten Radiosondendatensatz von LKS (Lanzante et al., 2003a) einen Trend der Anomaliedifferenzzeitserie von 1979-2004 von  $-0,25 \text{ K Dekade}^{-1}$  gefunden. Für die 12:00 UTC Zeitreihen haben ab 1998 die unkorrigierten Radiosondendaten die beste Übereinstimmung mit den Satellitendaten. Davor ist die Übereinstimmung mit RAOBCORE Daten am größten. Ab 1998 hat die Differenz zwischen RAOBCORE und den Satellitendaten einen sichtbaren Jahresgang, davor ist das nicht so klar zu sehen. Die Trends der 12:00 UTC Anomaliedifferenzzeitserien zum RSS sind für 1979-2006 für die unkorrigierten Radiosonden  $-0,28 \text{ K Dekade}^{-1}$ , für die mit RAOBCORE korrigierten  $-0,31 \text{ K Dekade}^{-1}$  und für die mit RICH korrigierten  $-0,35 \text{ K Dekade}^{-1}$ . Werden für die Korrekturen und die Trendberechnung Daten bis 2008 herangezogen, so bekommt man etwas kleinere Trends, für die unkorrigierten Radiosonden  $-0,23 \text{ K Dekade}^{-1}$ , für die mit RAOBCORE korrigierten  $-0,26 \text{ K Dekade}^{-1}$  und für die mit RICH korrigierten  $-0,31 \text{ K Dekade}^{-1}$ . Randel and Wu (2006) haben mit dem homogenisierten Radiosondendatensatz von Lanzante et al. (2003a) einen Trend der Differenzzeitserie von 1979-2004 von  $-0,38 \text{ K Dekade}^{-1}$  gefunden. In der TTS Schicht ist für 00:00 UTC um das Jahr 1995 eine kleine Änderung zu sehen. In der Zeit danach stimmen die RAOBCORE korrigierten Daten am besten mit den Satellitendaten überein, davor die mit RICH korrigierten. In den Metadaten gibt es zu der Zeit einen Radiosondenwechsel, Korrektur gibt es keine. In der 12:00 UTC Zeitserie ist das nicht zu sehen. Für die mittlere Troposphäre (TMT) sind die Unterschiede zwischen den verwendeten Bodentemperaturen deutlich größer als die Unterschiede zwischen den Homogenisierungsverfahren, wobei mit den Had-CRUT Bodendaten sehr große Sprünge in den Differenzzeitreihen zwischen den Radiosonden- und den Satellitendaten entstehen. Mit den ERA Bodendaten ist zwar die Varianz groß, aber die Mittelwerte ändern sich nicht so stark. 1983 ist in der 00:00 UTC Zeitserie eine Änderung zu sehen, davor passen die mit RICH korrigierten Daten besser zu den Satellitendaten, danach die mit RAOBCORE korrigierten. In der 12:00 UTC Zeitserie gibt es ab 1995 große Differenzen zwischen den Radiosondendaten und den Satellitendaten.

### 5.3 Mawson

Die australische Station Mawson - AAS Base, Nummer 89564, liegt auf  $67, 6^\circ \text{ S}$  und  $62, 88^\circ \text{ W}$ . In den Jahren 2005 und 2006 wurden Radiosondenwechsel über GTS gemeldet. Es werden aber keine Brüche korrigiert. In der 00:00 UTC Zeitreihe sind

verglichen mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen keine signifikanten Maxima in der SNHT Teststatistik zu sehen und in der 12:00 UTC Zeitreihe gibt es zu dieser Zeit Datenlücken.

Der erste Bruch wird in Experiment 4 am 2.12.1996 gefunden, in Experiment 6 am 23.7.1998, wobei die Korrektur klein ist. In Experiment 9 wird keine Korrektur in den Neunzigerjahren gemacht. Ein signifikantes Maximum wird nur in der Teststatistik für das Troposphärenmittel der 00:00 UTC Innovationen gefunden. Die Korrektur bewirkt in der 00:00 UTC Zeitserie der Innovationen eine Verringerung des negativen Trends in der Innovationszeitreihe für das 30 hPa Niveau. Dieser Trend ist in der Differenzzeitreihe zu umliegenden Stationen nicht zu sehen. Für die 12:00 UTC Zeitserie in 30 hPa ist die Korrektur sehr klein und der dort ebenfalls vorhandene negative Trend (Abbildung 5.13) bleibt bestehen. Zwischen

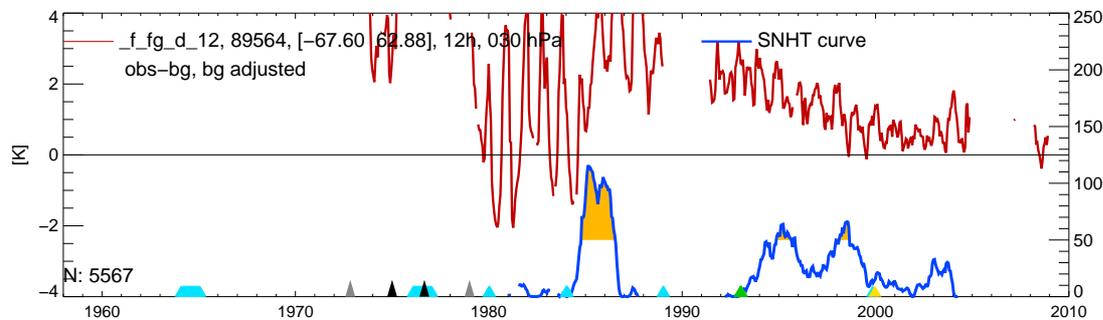


Abbildung 5.13: 12:00 UTC Zeitserie der Innovationen in 30 hPa mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 an der Station 89564 Mawson.

1979 und 1989 gibt es eine Datenlücke bei den 00:00 UTC Messungen, zwischen 1989 und 1991 bei den 12:00 UTC Messungen.

Im Dezember 1988 ist ein Wechsel zur Vaisala RS-80 Sonde im CARDS verzeichnet, wobei offenbar gleichzeitig eine Umstellung von 12:00 UTC Messung auf 00:00 UTC Messung stattgefunden hat, was das Auffinden eines Bruches, falls es dort einen geben sollte, wahrscheinlich verhindert. Im Dezember 1983 und im Dezember 1979 sind in den Metadaten Radiosondenwechsel verzeichnet, es wird kein Bruch gefunden.

Ein Bruch wird am 3.3.1980 in der 00:00 UTC Zeitserie in den Experimenten 4 und 6 gefunden. Für 1980 gibt es eine Metadatenaufzeichnung, die sich auf eine Änderung in den Berechnungen bezieht (COMPUT, CALCULATOR). Es gibt wieder in beiden Zeitserien Datenlücken. In der 00:00 UTC Zeitserie beginnt Ende 1980 eine große Datenlücke, in der 12:00 UTC Zeitserie endet zu dieser Zeit eine kürzere. Im Vergleich mit dem Antarktismittel zeigt sich, dass die Korrekturen aus Experiment 6 zu groß sind und dass es für die 00:00 UTC Zeitreihe besser ist keine

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

Korrektur zu machen wie in Experiment 9 und für die 12:00 UTC Zeitreihe, wo keine Korrektur gemacht wird, wäre zumindest in 200 hPa eine Korrektur gut.

Einen weiteren Bruch mit passendem Radiosondenwechsel gibt es am 19.8.1976. Maxima der Teststatistik gibt es in 200 hPa, 100 hPa und im Troposphärenmittel der 12:00 UTC Zeitserie sowie im Troposphärenmittel der 00:00 UTC Zeitserie. Im Jahr 1978 gibt es in der 12:00 UTC Zeitserie eine Datenlücke und eine Inhomogenität an der Stelle der Datenlücke, die allerdings nicht korrigiert wird. In der 00:00 UTC Zeitserie ist das nicht zu sehen und es liegt zeitlich im Bereich von großen Änderungen im Beobachtungssystem der Reanalysen im Jahr 1979, wo zum Beispiel Daten von NOAA 6 dazu kommen. Die Innovationen vor diesem Zeitpunkt sind so groß, dass sie auf den Abbildungen zum Beispiel 5.13 (Seite 63) kaum noch zu sehen sind, und deshalb ist es auch schwierig zu sagen, ob die Korrektur eine Verbesserung bewirkt. Wenn das Mittel über alle antarktischen Stationen abgezogen ist, ist kaum ein Unterschied zu sehen. Betrachtet man den Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen, so ist zu sehen, dass die Korrekturen für die 00:00 UTC Zeitreihen gut sind, die für die 12:00 UTC Zeitreihe sind in Experiment 6 in einigen Niveaus zu groß, passen aber in Experiment 9.

Am 1.7.1974 wird in Experiment 4 und 6 ein Bruch gefunden, in Experiment 9 am 16.4.1974, mit einem Maximum in der Teststatistik des Troposphären- und Stratosphärenmittels der 00:00 UTC Zeitserie sowie in den Zeitserien der Teststatistik für die Differenz zwischen der Station Mawson und einem Mittel aus umliegenden Stationen für die 12:00 UTC Zeitserie sowohl im Troposphären- als auch im Stratosphärenmittel, kein Metadateneintrag. Wenn man mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen vergleicht, sind die Korrekturen aus Experiment 9 besser als die aus Experiment 6. Im Jahr 1964 ist noch ein Radiosondenwechsel verzeichnet, es gibt keinen Bruch und kaum Messungen.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1958-2006) | Experiment 4<br>(1958-2006) | Experiment 6<br>(1958-2008) | Experiment 9<br>(1958-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | -0,08                       | -0,2                        | 0,13                        | -0,24                       |
| 50 hPa      | -0,37                       | -0,41                       | -0,52                       | -0,61                       |
| 100 hPa     | -0,56                       | -0,94                       | -0,85                       | -0,74                       |
| 200 hPa     | -0,18                       | -0,56                       | -0,59                       | -0,24                       |

Trends an der Station Mawson in K Dekade<sup>-1</sup>. In den obersten Schichten gibt es keine Daten in den frühesten Jahren. In 50 hPa gibt es seit 1968 regelmäßig Daten, in 30 hPa seit 1971.

Die negativen Trends werden mit den Korrekturen aus Experiment 9 in 30 hPa und 50 hPa mehr verstärkt als in Experiment 4 und in 100 hPa und 200 hPa weniger. In 850 hPa ist ein schwacher positiver Trend zu sehen.

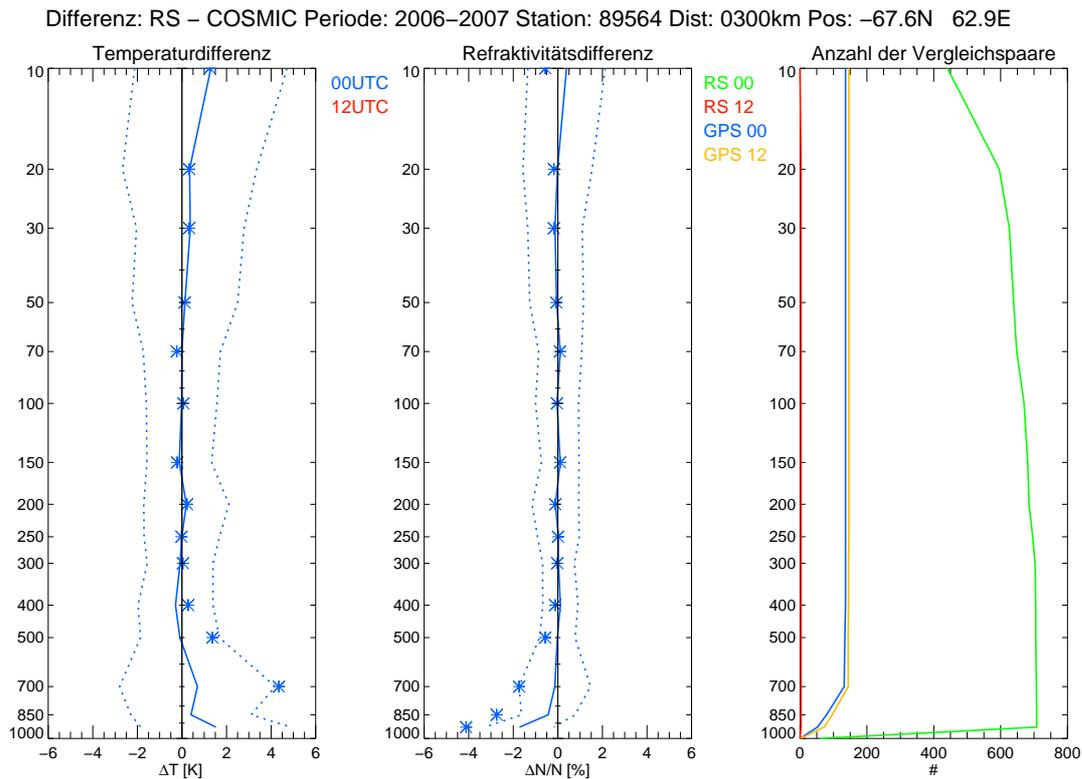


Abbildung 5.14: Mittleres Profil der Temperatur- und Refraktivitätsdifferenzen zwischen der Station 89564 Mawson und COSMIC GPS Radiokulturationsdaten, sowie die Anzahl der jeweiligen Beobachtungen.

Das Differenzprofil zu COSMIC GPS Radiokulturationsdaten (Blaschek, 2009) (Abbildung 5.14 Seite 65) zeigt sehr gute Übereinstimmung zwischen den Radiosondentemperaturen und Temperaturen aus Radiokulturationsdaten. Nur in bodennahen Schichten und oberhalb von 30 hPa ist eine nennenswerte Differenz zu sehen, wobei diese in 30 hPa und 20 hPa noch immer unter 0,5 K liegt, die Radiosondentemperaturen sind höher als die aus Radiokulturationsdaten. Erst in 10 hPa wird die Differenz größer als 1K.

Der Vergleich mit den MSU Satellitendaten für die Stratosphäre zeigt im Mittel eine gute Übereinstimmung zwischen den Radiosondendaten und den Satellitendaten, wobei ein starker Jahresgang zu sehen ist. In der TTS Schicht gibt es vor 1989 eine größere Differenz zwischen den Radiosondendaten und den Satellitendaten, wobei die Backgroundvorhersage dort im Mittel gut mit den Radiosondendaten übereinstimmt.

## 5.4 Davis

Die australische Station Davis 89571 liegt auf 68,58° S und 77,97° O. Die ersten beiden Brüche werden in Experiment 6 am 10.5.2001 und am 24.2.2006 gefunden. In Experiment 4 und 9 gibt es diese Brüche nicht, obwohl 2006 ein signifikantes Maximum in der Teststatistik für die Differenzzeitreihe zu einem Mittel aus umliegenden Stationen in 100 hPa zu sehen ist (Abbildung 5.15). Anfang 2006 wurde

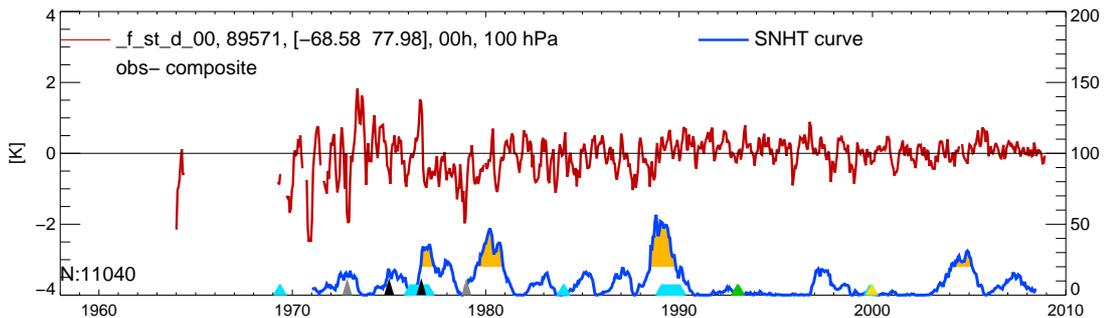


Abbildung 5.15: 00:00 UTC Differenzzeitserie zwischen der Station 89571 Davis und einem Mittel aus umliegenden Stationen in 100 hPa.

ebenso wie Ende 2005 ein Radiosondenwechsel über GTS gemeldet, was sehr gut zu einem Bruch am 24.2.2006 passen würde. In der Teststatistik der Innovationen dagegen ist 2007 noch ein größeres Maximum zu sehen, das möglicherweise schon zu nahe am Ende der Zeitreihe liegt, aber bewirkt, dass 2006 kein Bruch mehr gefunden wird. Wenn man das Antarktismittel von den Innovationszeitreihen abzieht, ist der Bruch 2006 (nur Experiment 6) in der 00:00 UTC Zeitreihe kaum zu sehen. Dafür wäre ein Bruch 2004, der aber nicht korrigiert wird. Die Korrektur 2001 in Experiment 6 führt zu keinen guten Ergebnissen.

In der zweiten Jahreshälfte 1994 wird ein Radiosondenwechsel über GTS gemeldet, aber kein Bruch gefunden. Als erster Metadateneintrag ist im CARDS im Jahr 1999 eine Änderung bei der Bodenstation verzeichnet. Im Dezember 1992 ist eine Änderung in der Strahlungskorrektur verzeichnet.

Im Jahr 1989 gibt es einen Wechsel von der Philips MK III Sonde zur VAISALA-RS80. Es sind Maxima in den Teststatistikzeitreihen für die Innovationen fast aller Druckniveaus, zum Beispiel in 50 hPa (Abbildung 5.16 Seite 67), sowie für das Troposphärenmittel zu sehen. Auch in den Teststatistiken für die Schichtmittel der Differenzzeitserien zwischen der Station Davis und einem Mittel aus umliegenden Stationen sind signifikante Maxima zu sehen. Im Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen ist der Bruch vor allem in 100 hPa zu sehen. In Experiment 4 und 6 wird keine Korrektur gemacht, weil der Bruch beim Signifikanztest abgelehnt wird, in Experiment 9 gibt es eine Korrektur.

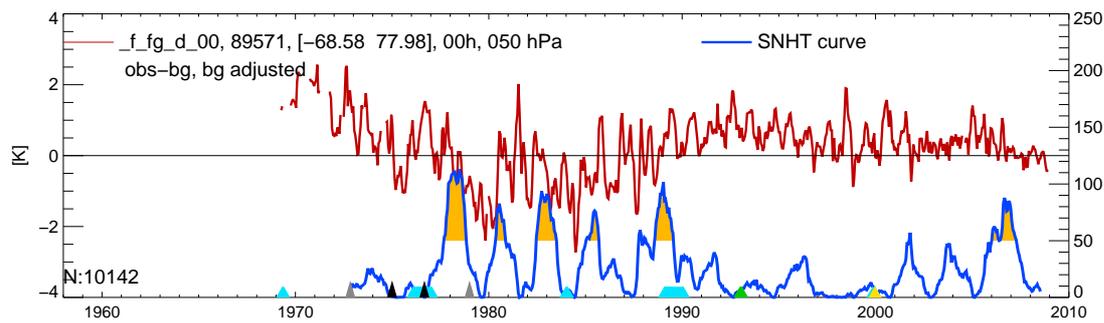


Abbildung 5.16: 00:00 UTC Zeitserie der Innovationen mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 50 hPa an der Station 89571 Davis.

In den Jahren 1985 und 1986 sind signifikante Maxima in der Teststatistik für die Innovationszeitreihen zu sehen ohne dass eine Korrektur gemacht wird (Abbildung 5.17 Seite 67). Zieht man das Mittel über alle antarktischen Stationen ab, sind

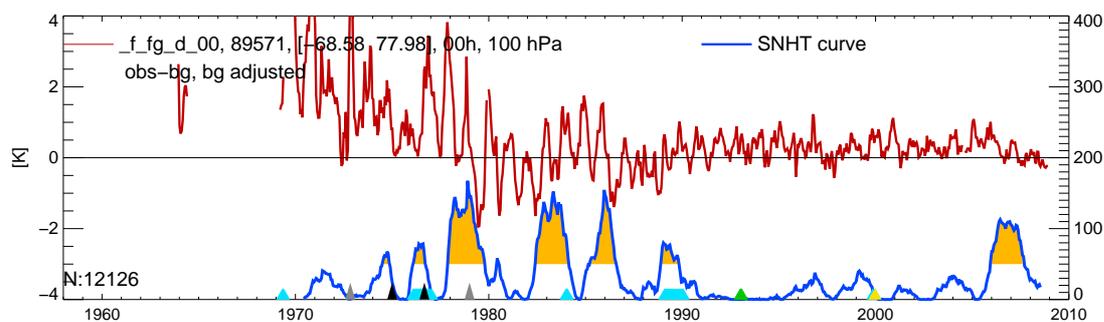


Abbildung 5.17: Wie Abbildung 5.16 für die 100 hPa Druckfläche.

keine signifikanten Maxima zu dieser Zeit zu sehen, was dafür spricht, dass die Inhomogenitäten in der Backgroundvorhersage zu suchen sind und mit dem Start und Ausfall des NOAA 9 Satelliten zu tun haben.

Der nächste Radiosondenwechsel ist im Dezember 1983 verzeichnet, es sind keine signifikanten Maxima in den Teststatistikzeitserien zu sehen und es wird keine Korrektur gemacht. Es gibt signifikante Maxima im Jahr 1982, wobei hier auch keine Korrektur angebracht wird. 1979/80 sind Änderungen bei Berechnungsmethoden im CARDS verzeichnet. In der 12:00 UTC Zeitserie fehlen die Daten zwischen 1978 und 1989.

Im Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen ist für die 00:00 UTC Zeitreihe 1980 ein Bruch in 100 hPa und 30 hPa zu sehen, der nicht korrigiert wird.

Am 10.12.1977 wird in der 12:00 UTC Zeitserie ein Bruch gefunden, der am Be-

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

ginn der Datenlücke zu liegen scheint. Die Korrektur wirkt in allen Experimenten etwas problematisch.

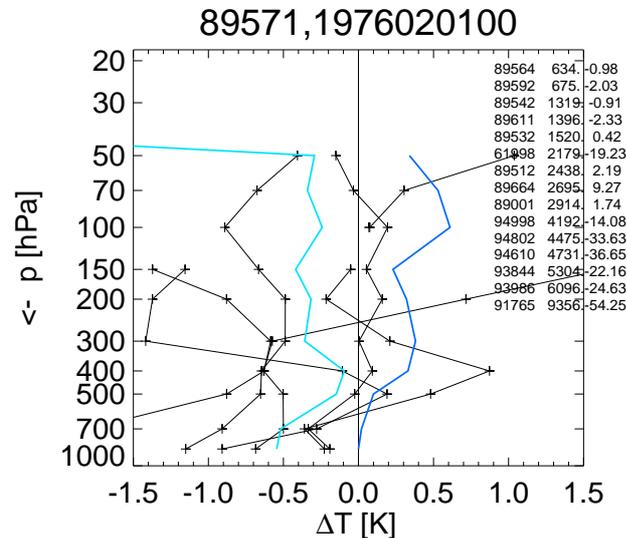


Abbildung 5.18: Profil der RAOBCORE (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 1.2.1976 an der Station 89571 Davis.

Am 1.2.1976 wird ein Bruch in der 00:00 UTC Zeitserie gefunden. Es sind signifikante Maxima in der Teststatistik für die 00:00 UTC Innovationszeitreihe in 100 hPa (Abbildung 5.17), im Troposphärenmittel für beide Beobachtungstermine sowie für 12:00 UTC in 200 hPa und 100 hPa zu sehen. Betrachtet man die Differenzzeitreihe zu einem Mittel über alle antarktischen Stationen, wird der Bruch gut korrigiert. Der Vergleich der Korrekturprofile von RAOBCORE Experiment 6 und RICH (Abbildung 5.18) zeigt, dass RAOBCORE über das gesamte Profil positive Korrekturen macht, RICH negative in einer ähnlichen Größenordnung. Die RICH Korrekturen sind bis 50 hPa mit der Höhe sehr konstant, sie schwanken um die 0,3 K. Die RAOBCORE Korrekturen werden nach oben größer von 0 K in 850 hPa bis 0,6 K in 100 hPa. Die für die RICH Korrektur verwendeten Profile umliegender Stationen streuen stark, wobei von 15 verwendeten Stationen acht antarktische sind. Für die 12:00 UTC Zeitserie macht RAOBCORE keine Korrektur, RICH schon. Die RICH Korrekturen sind -0,8 K in 850 hPa, werden dann nach oben kleiner bis sie zwischen 200 hPa und 300 hPa fast 0 sind und dann wieder größer, wobei das Maximum in 70 hPa zu finden ist mit 1,1 K. Die verhältnismäßig große Korrektur in 850 hPa wirkt sich nicht besonders gut auf

das Ergebnis aus. Die Korrekturen aus Experiment 9 sind von der Richtung her gleich wie die RAOBCORE Korrekturen aus Experiment 6, die Größen sind leicht unterschiedlich.

Der letzte Bruch wird am 7.11.1965 in der 00:00 UTC Zeitserie gefunden und steht in Zusammenhang mit der dort beginnenden und bis 1969 dauernden Datenlücke. Bei dieser Zeitserie sind die meisten Inhomogenitäten in den späten siebziger Jahren und in den achtziger Jahren zu finden. Diese werden alle nicht korrigiert, sind aber in der Differenzzeitreihe zu einem Mittel aus umliegenden Stationen nicht zu sehen und daher wohl eher auf Inhomogenitäten in der Backgroundvorhersage zurückzuführen. Es fällt wieder der negative Trend der Innovationen im 30 hPa Niveau in den neunziger Jahren auf. In der 12:00 UTC Zeitserie führt dieser zu einem signifikanten Maximum in der Teststatistik.

Die Differenzprofile zu Temperaturen aus COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) zeigen sehr gute Übereinstimmung der beiden Datensätze. Die Differenzen sind durchgehend kleiner als 0,5 K.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1960-2006) | Experiment 4<br>(1960-2006) | Experiment 6<br>(1960-2008) | Experiment 9<br>(1960-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | -0,04                       | -0,04                       | -0,06                       | -0,12                       |
| 50 hPa      | -0,28                       | -0,24                       | -0,39                       | -0,49                       |
| 100 hPa     | -0,62                       | -0,55                       | -0,64                       | -0,71                       |
| 200 hPa     | -0,19                       | -0,16                       | -0,22                       | -0,25                       |
| 850 hPa     | 0,06                        | 0,06                        | 0,1                         | 0,1                         |

Trends an der Station Davis in K Dekade<sup>-1</sup>. Trends in 50 hPa ab 1972, in 30 hPa ab 1977, davor sind keine Daten verfügbar.

Die Station Davis hat in der Satellitenära in Experiment 4 keine Korrekturen. Betrachtet man die Differenzzeitreihen zwischen RAOBCORE und den Satellitendaten aus Experiment 5 (Abbildung 5.19 Seite 70), so fällt in allen Schichten auf, dass sich der Mittelwert dieser Differenzen im Jahr 1989 ändert. Es gibt auch einen Radiosondenwechsel und Maxima in diversen Teststatistikzeitserien aber keine Korrektur in den Experimenten 4-6. In Experiment 9 gibt es dort eine Korrektur.

## 5.5 Wilkes/Casey

Die australische Station Wilkes/Casey 89611 liegt auf 66,28° S und 110,53° O. In den Jahren 2005 und 2006 sind Radiosondenwechsel über GTS gemeldet worden. Im Jahr 1999 ist im CARDS eine Änderung der Bodenstation und der Strah-

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

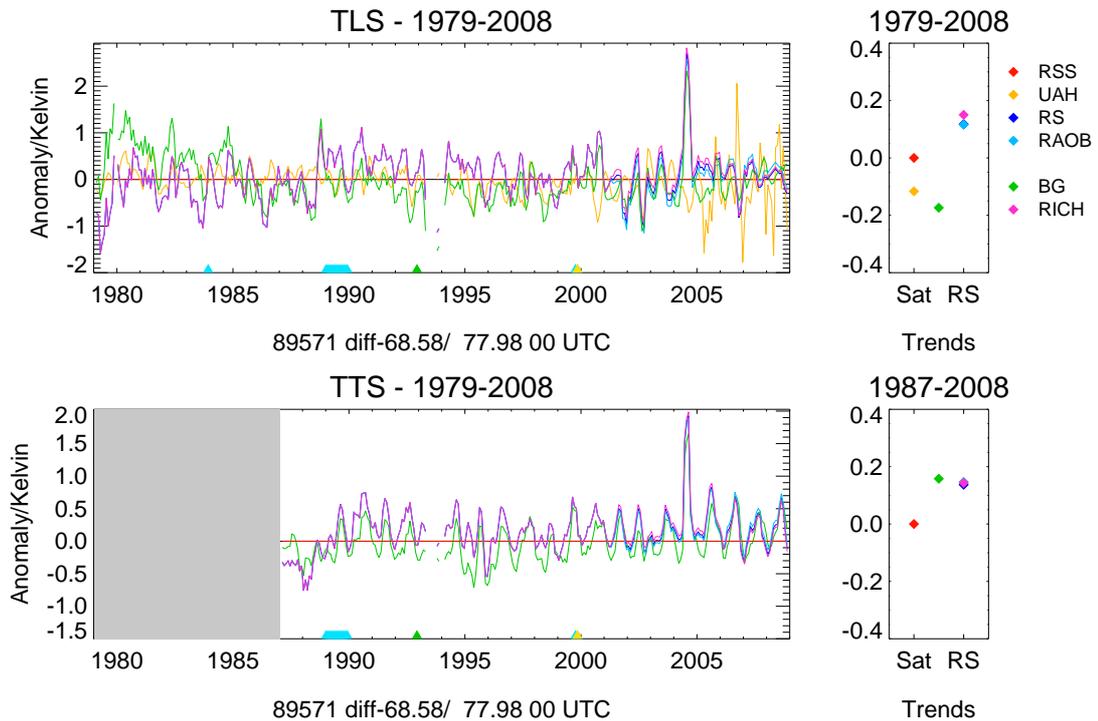


Abbildung 5.19: Links die Zeitreihen der 00:00 UTC Anomaliedifferenzen bezüglich RSS von RAOBCORE (hellblau), RICH (pink), unkorrigierten Radiosondendaten (dunkelblau), UAH (gelb) und Backgroundvorhersage (grün) für die Station 89571 Davis für die untere Stratosphäre (TLS) und die Stratosphäre/obere Troposphäre (TTS). Rechts die Trends der Anomaliedifferenzen.

lungskorrektur verzeichnet, es wird keine Korrektur gemacht. In der Zeitserie der Innovationen in 30 hPa ist in den Neunzigerjahren eine trendartige Veränderung zu sehen. Diese ist in der 12:00 UTC Zeitserie stärker als in der 00:00 UTC Zeitserie. In der 12:00 UTC Zeitserie gibt es auch ein Maximum in der Teststatistik im Jahr 1997, es wird keine Korrektur gemacht. 1993 wird wieder ein Radiosondenwechsel über GTS gemeldet.

Im Jahr 1989 ist eine Änderung der Strahlungskorrektur verzeichnet und es kommt zu einer Abnahme der Varianz, was vermutlich daran liegt, dass ab 1989 ERA-Interim Daten verwendet werden. Am 27.12.1988 gibt es einen Bruch in Experiment 9, bei den anderen Experimenten wird kein Bruch gefunden. Ein signifikantes Maximum ist nur in der Teststatistik für das Troposphärenmittel (Abbildung 5.20) und das 30 hPa Niveau (Abbildung 5.21) zu sehen. In den Teststatistiken für die Differenzzeitreihen zu einem Mittel über alle antarktischen Stationen bezie-

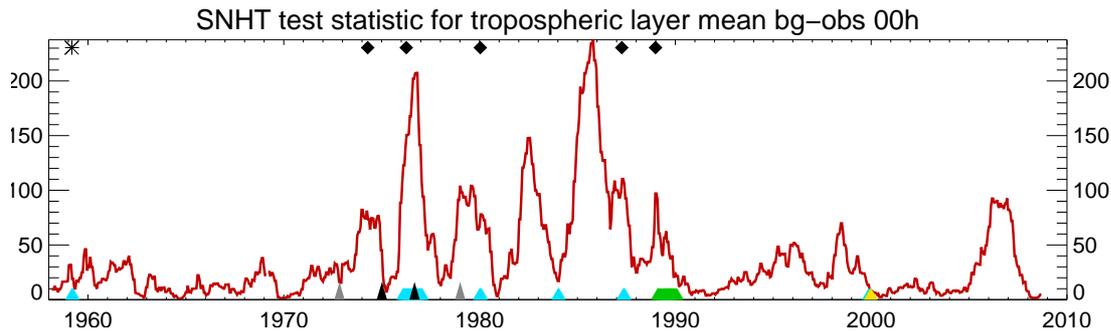


Abbildung 5.20: 00:00 UTC Zeitserie des Maximums der Teststatistik für Mittel über jeweils benachbarte Hauptdruckflächen in der Troposphäre für die Station 89611 Wilkes/Casey. Die schwarzen Quadrate bezeichnen Brüche, bei denen der Teststatistikwert über dem Signifikanzniveau liegt, Sterne bezeichnen Brüche, die in dieser Zeitserie nicht signifikant sind aber in anderen Zeitserien schon (Haimberger, 2007).

hungsweise umliegenden Stationen ist nichts Auffälliges zu sehen. Die Korrekturen sind dementsprechend sehr klein.

Im April 1987 ist ein Radiosondenwechsel von PHILIPS MK III zu VAISALA RS80 in den Metadaten verzeichnet. Es sind signifikante Maxima in der Teststatistik für 200 hPa (Abbildung 5.22), das Stratosphären- und das Troposphärenmittel, sowie das Stratosphärenmittel der Differenzzeitreihe zwischen der Station Wilkes/Casey und einem Mittel aus umliegenden Stationen (Abbildungen 5.23 Seite 73 und 5.20 Seite 71) zu sehen, in Experiment 4 und 6 wird keine Korrektur gemacht, da sie nicht signifikant ist, in Experiment 9 wird am 8.4.1987 eine Korrektur gemacht.

Im Dezember 1983 gibt es einen Radiosondenwechsel von PHILIPS MK II zu MK III. Es sind Maxima in der Teststatistikzeitserie davor und danach zu sehen, im Dezember 1983 gibt es ein Minimum. Es wird keine Korrektur gemacht. In der Teststatistik für die Differenzzeitreihe zum Mittel über die antarktischen Stationen ist ein signifikantes Maximum in der Zeitreihe für die 100 hPa Fläche zu sehen.

Am 15.10.1977 wird ein Bruch in der 12:00 UTC Zeitserie gefunden, es beginnt eine mehrjährige Datenlücke.

In der 00:00 UTC Zeitserie wird am 5.4.1976 ein Bruch gefunden. Es sind signifikante Maxima in der Teststatistik für die Innovationen im 100 hPa Niveau und für das Troposphärenmittel zu sehen (Abbildung 5.20). Die Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH unterscheiden sich stark, wobei die für RICH verwendeten umliegenden Stationen sehr uneinheitliche Profile haben. Für die 12:00 UTC Zeitserien macht RAOBCORE keine Korrekturen, RICH schon. Die RICH

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

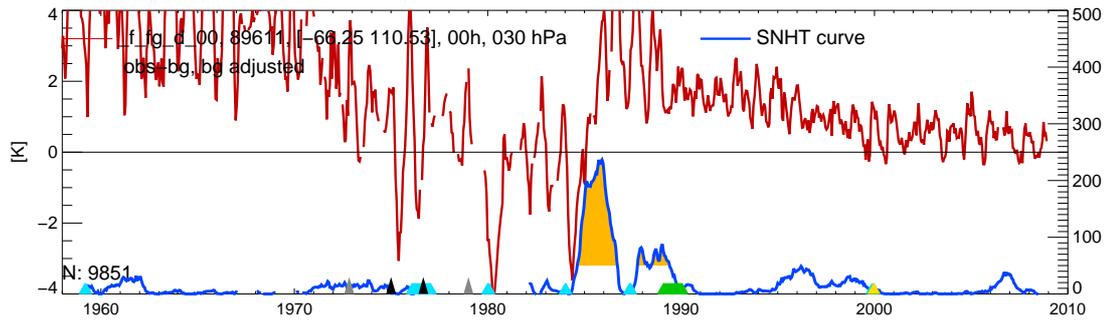


Abbildung 5.21: 00:00 UTC Zeitserie der Innovationen mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 30 hPa an der Station 89611 Wilkes/Casey.

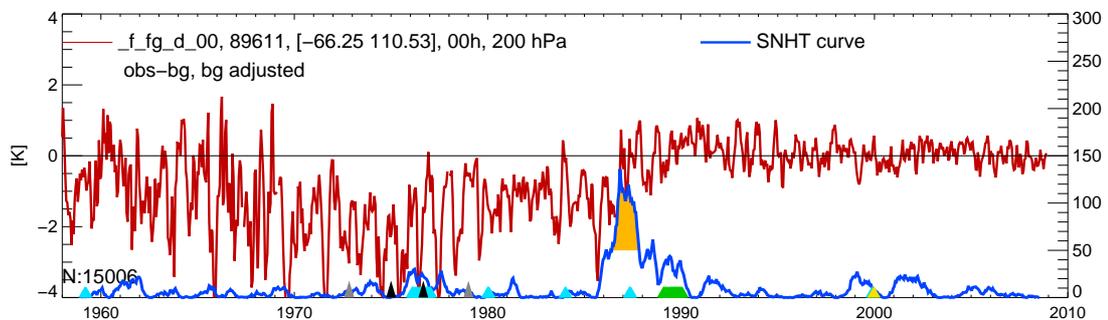


Abbildung 5.22: Wie Abbildung 5.21 für die 200 hPa Druckfläche.

Korrekturen für die 12:00 UTC Zeitreihe erzeugen in den Innovationszeitreihen zusätzliche Inhomogenität.

In den Experimenten 6 und 9 wird am 16.4.1974, in Experiment 4 am 17.12.1973 ein Bruch in den Zeitserien beider Beobachtungstermine gefunden. Es sind signifikante Maxima in der Teststatistik für die Innovationen in 100 hPa und für das Troposphärenmittel (Abbildung 5.20) zu sehen. Die Korrektur ist gut, allerdings bleiben Brüche im Jahr 1976, wo ein Radiosondenwechsel dokumentiert ist und auch eine Korrektur gemacht wird und im Jahr 1979, wo es im Dezember einen Radiosondenwechsel gegeben hat. Zwischen 1976 und 1979 werden Daten des NOAA-4 Satelliten assimiliert, der fehlerhafte Daten geliefert hat, wodurch es Inhomogenitäten in den ERA-40 Daten gibt, die natürlich auch zu den Inhomogenitäten in den Innovationszeitreihen beitragen. In der Teststatistik für die Differenz zwischen der Station Wilkes/Casey und umliegenden Stationen sieht man keine Maxima am Beginn und am Ende der NOAA-4 Periode. Das bedeutet, dass die Inhomogenität den ERA-40 Daten zuzuordnen ist.

Am 22.12.1964 wird ein Bruch in der 12:00 UTC Zeitserie gefunden, wo es wieder

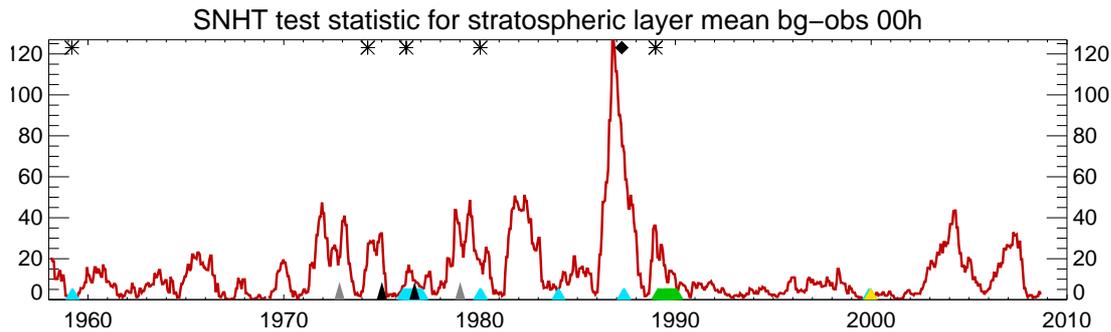


Abbildung 5.23: 00:00 UTC Zeitserie des Maximums der Teststatistik für ein Mittel über jeweils benachbarte Hauptdruckflächen in der Stratosphäre für die Station 89611 Wilkes/Casey.

fehlende Daten gibt. Der letzte Bruch wird am 8.3.1959 in den Zeitserien beider Beobachtungstermine gefunden. Es ist für den Februar ein Radiosondenwechsel dokumentiert. Ein signifikantes Maximum ist in der Teststatistik für das Troposphärenmittel der 12:00 UTC Zeitreihe zu sehen.

Die Korrekturprofile von RICH erreichen sowohl für die 00:00 UTC als auch für die 12:00 UTC Zeitreihe oberhalb von 100 hPa extreme Werte, was damit zusammenhängen dürfte, dass für die unteren Niveaus noch einige antarktische Stationen verwendet werden, die aber in den höheren Schichten nicht mehr genug Daten liefern und daher werden zum Teil über 9000 km weit entfernte, bereits in den Tropen liegende Stationen verwendet (Abbildung 5.24 Seite 74). Die Korrekturen sind entsprechend unsicher. Für das 00:00 UTC Korrekturprofil haben RAOBCORE und RICH in 150 hPa und 200 hPa sehr ähnliche Werte, unterhalb gibt es Differenzen bis zu 0,7 K und in 300 hPa und darunter gehen die Korrekturen immer in unterschiedliche Richtungen. Für die RICH Korrektur werden fünfzehn umliegende Stationen verwendet, davon fünf antarktische. Auch bei den 12:00 UTC Korrekturprofilen gehen die RAOBCORE und RICH Korrekturen in den meisten Schichten in unterschiedliche Richtungen. Die maximale Differenz zwischen den beiden beträgt unterhalb von 100 hPa 1,1 K. Für die RICH Korrektur werden dreizehn umliegende Stationen verwendet, davon fünf antarktische.

Die Differenzprofile zu COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) zeigen sehr gute Übereinstimmung zwischen den Radiosondentemperaturen und den Temperaturen aus Radiookkultationsdaten. Nur in der unteren Troposphäre, wo die Radiookkultationsdaten nicht mehr so verlässlich sind und in 10 hPa für das 12:00 UTC Profil, wo die Anzahl der verfügbaren Radiosondenmessungen schon recht klein ist, sind nennenswerte Abweichungen zu sehen.

Für die Station Wilkes/Casey werden in der Satellitenära nur in Experiment 9 Korrekturen gemacht. Vergleicht man die Temperaturen in der Troposphäre

5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

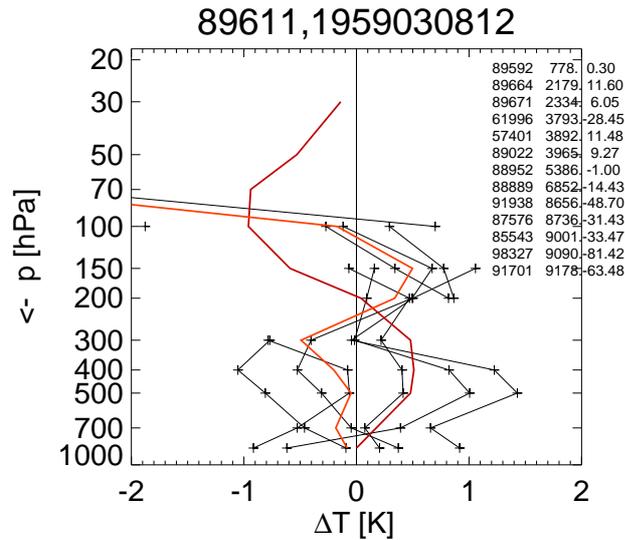


Abbildung 5.24: Profil der RAOBCORE (dunkelrot) und RICH (hellrot) Korrekturen der 12:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 8.3.1959 an der Station 89611 Wilkes/Casey.

(TMT) könnte man sagen, dass Korrekturen 1997, 1995 und 1984 angebracht wären. 1997 gibt es auch ein Maximum in den 12:00 UTC Teststatistiken und im Dezember 1983 gibt es einen Radiosondenwechsel und davor und danach Teststatistikmaxima. In den stratosphärischen Schichten TLS und TTS ist das nicht mehr so deutlich zu sehen, höchstens 1995.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1958-2008) | Experiment 4<br>(1958-2006) | Experiment 6<br>(1958-2008) | Experiment 9<br>(1958-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | -0,07                       | -0,12                       | -0,08                       | 0,02                        |
| 50 hPa      | -0,23                       | 0,02                        | -0,09                       | -0,41                       |
| 100 hPa     | -0,55                       | -0,35                       | -0,45                       | -0,51                       |
| 200 hPa     | -0,41                       | -0,54                       | -0,57                       | -0,51                       |
| 850 hPa     | 0,22                        | 0,23                        | 0,22                        | 0,22                        |

Trends an der Station Wilkes/Casey in K Dekade<sup>-1</sup>.

## 5.6 Mc Murdo

Die US-amerikanische Station Mc Murdo 89664 liegt auf  $77,85^\circ$  S und  $166,67^\circ$  O. In den Jahren 2004 und 2005 werden jeweils Radiosondenwechsel über GTS gemeldet. In Experiment 9 wird am 5.9.2004 der erste Bruch gefunden. Maxima in der Teststatistik sind nur für die Schichtmittel der Differenzzeitreihen zu umliegenden Stationen zu sehen, wobei auch hier die Maxima nicht besonders hoch sind. Die Korrekturen sind auch nicht groß.

Am 13.10.1999 ist ein Wechsel von VAISALA RS80 zu AIR Intellisonde 1680 in den Metadaten notiert, der aber, wie in Abschnitt 5.1 (Seite 51) erläutert wird, wahrscheinlich nicht zu diesem Zeitpunkt stattgefunden hat.

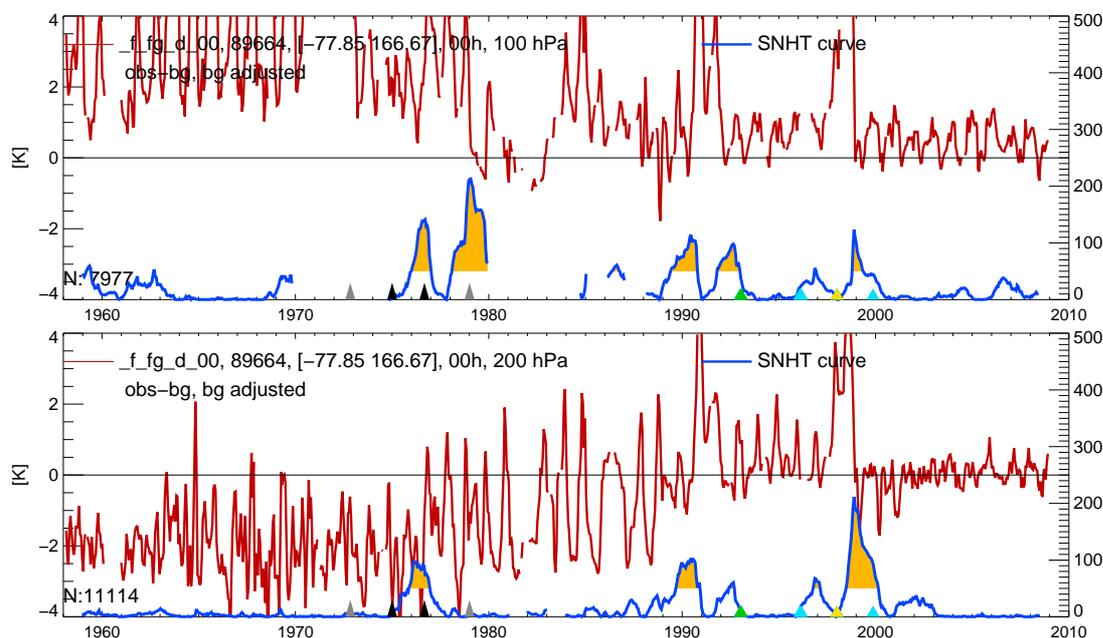


Abbildung 5.25: 00:00 UTC Zeitserien der Innovationen mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 100 hPa und 200 hPa an der Station 89664 Mc Murdo.

Am 1.12.1997 ist ein Wechsel von einer AIR Sonde zu VAISALA RS80 mit gleichzeitigen Änderungen der Bodenstation und der Strahlungskorrektur verzeichnet. In der Zeitserie der Innovationen (Abbildung 5.25) ist zur Zeit des Wechsels ein Minimum in der Teststatistikzeitserie zu sehen und es wird 1997 auch kein Bruch gefunden.

Ein Bruch wird am 21.11.1998 gefunden, wobei hier über GTS ein Radiosondentypwechsel gemeldet wird. Ein weiterer Bruch wird am 17.10.1996 in Experiment 4 und 6 und am 7.10.1996 in Experiment 9 gefunden, nachdem im Jänner 1996 ein

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

Radiosondenwechsel zur AIR Sonde stattgefunden hat. Sowohl in der Teststatistik für die Innovationszeitreihen als auch für die Differenz dieser zum Mittel über die antarktischen Stationen sind signifikante Maxima zu den Zeitpunkten beider Brüche zu sehen. Neben den erwähnten Teststatistikmaxima in den Innovationszeitreihen, gibt es auch Maxima für beide Brüche im Stratosphärenmittel für die 00:00 UTC und für den Bruch im Jahr 1998 auch im Stratosphärenmittel für die 12:00 UTC Zeitserie, sowie im Troposphärenmittel für die 00:00 UTC Zeitserie. Die Korrekturen haben positive Auswirkungen auf die Teststatistik, allerdings bleibt eine sehr hohe Varianz und der Vergleich mit den MSU Satellitendatenzeitreihen (Abbildung 5.26) zeigt, dass der Zeitpunkt der Korrektur zwar für den Bruch im Jahr 1998 passt, der Zeitpunkt für die Korrektur im Jahr 1996 aber zu früh ist. Es wäre statt dessen eine Korrektur im Jahr 1997 besser, was aber vermutlich aufgrund des Mindestabstands zwischen zwei Korrekturen nicht gemacht wird. In

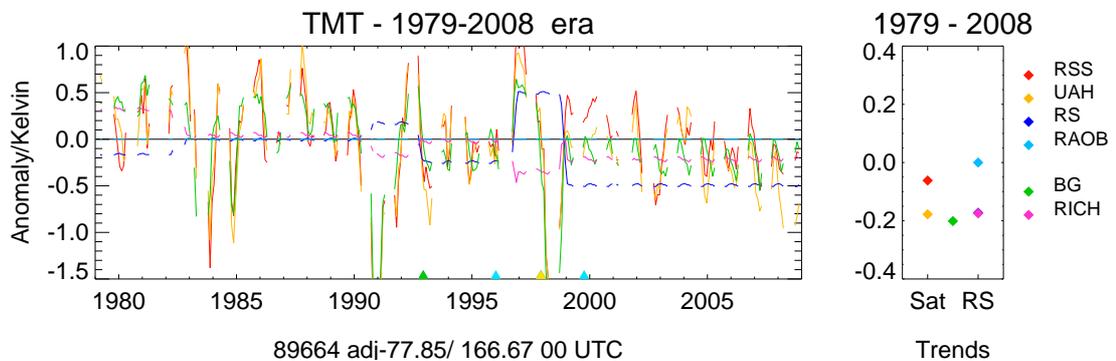


Abbildung 5.26: Links Temperaturanomaliedifferenzen von RSS (rot), UAH (gelb), unkorrigierten Radiosondendaten (dunkelblau), mit RICH korrigierte Radiosondendaten (pink) und Backgroundvorhersage (grün) bezüglich der mit RAOBCORE korrigierten Radiosondendaten in der mittleren Troposphäre (TMT) für die Station 89664 Mc Murdo, rechts Trend Differenzen (1979-2008).

der 00:00 UTC Zeitreihe bringen die Korrekturen 1998 und 1996, wenn man mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen vergleicht, ein sehr gutes Ergebnis.

Die letzte Metadatenaufzeichnung gibt es im Dezember 1992. Ab diesem Zeitpunkt wird die VIZ-(Generic) Sonde verwendet und keine Strahlungskorrektur gemacht. Etwas früher am 7.10.1992 wird ein Bruch gefunden mit Maxima in der Teststatistik für 200 hPa, 100 hPa, Stratosphären- und Troposphärenmittel jeweils für die 00:00 UTC Zeitreihen (Abbildung 5.25 Seite 75).

Zu einem weiteren Bruch am 21.6.1990 sind in 200 hPa und 100 hPa in der 00:00 UTC Zeitreihe, in den Troposphärenmitteln beider Beobachtungstermine und im

Stratosphärenmittel für 00:00 UTC Maxima in der Teststatistik zu finden. Zwischen 1990 und 1992 ist in den Innovationszeitserien (Abbildung 5.25 Seite 75) ein ähnliches Muster zu sehen wie 1997/98. Auch hier werden durch die zwei Korrekturen Verbesserungen erzielt. Diesmal ist es die spätere Korrektur, deren Zeitpunkt nicht optimal ist, wie in Abbildung 5.26 im Vergleich mit MSU Zeitreihen zu sehen ist. Die Unregelmäßigkeit zwischen 1990 und 1992 ist zu kurz um durch zwei Korrekturen gut korrigiert werden zu können. Die Korrektur 1992 ist ein bisschen zu spät, dadurch kann sie nicht so groß sein. Die beiden Korrekturen bringen, verglichen mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen, Verbesserungen. Verglichen mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen wäre 1986 eine Korrektur in 200 hPa gut.

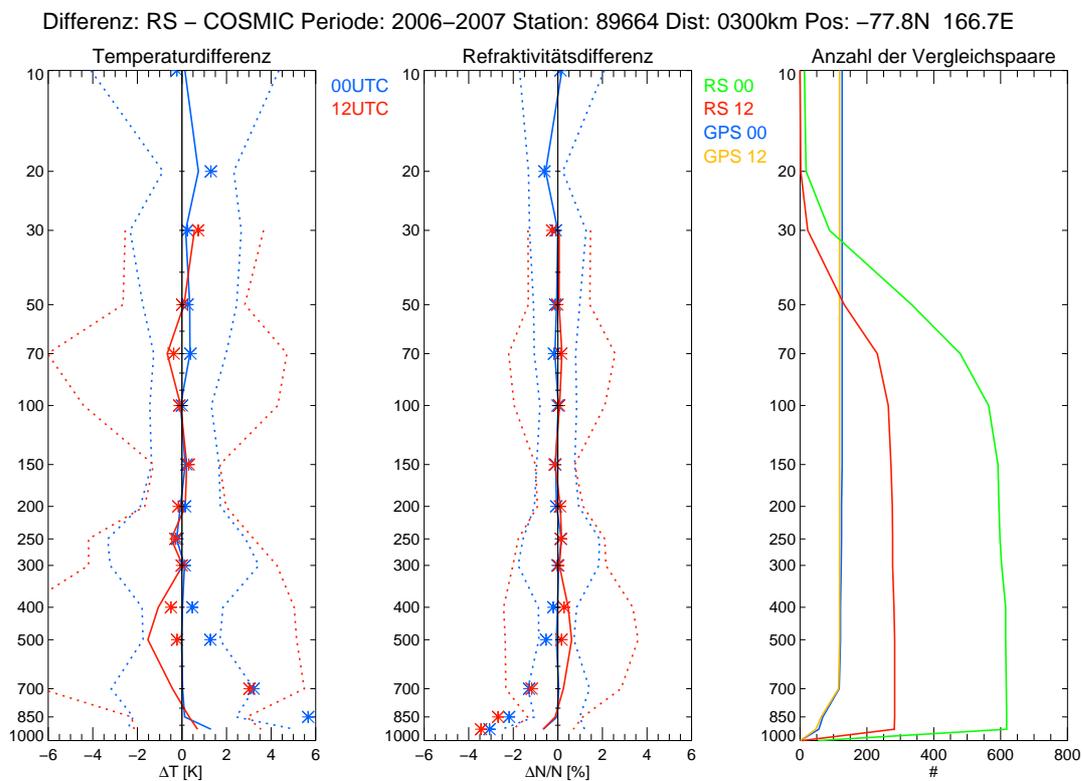


Abbildung 5.27: Mittleres Profil der Temperatur- und Refraktivitätsdifferenzen zwischen der Station 89664 Mc Murdo und COSMIC GPS Radiookkultationsdaten, sowie die Anzahl der jeweiligen Beobachtungen.

Für den nächsten Bruch am 30.12.1982 in Experiment 4 und am 3.6.1982 in Experiment 6 und 9 wird in der Teststatistik für das Troposphärenmittel um 00:00 UTC ein Maximum gefunden. Am 28.11.1980 wird in der 12:00 UTC Zeitserie

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

ein Bruch gefunden, es gibt allerdings zum 12:00 UTC Beobachtungstermin nur unregelmäßig Messungen.

Eine Schwierigkeit bei dieser Station ist, dass in den höheren Schichten im Winter regelmäßig Datenlücken auftreten, eine weitere ist die hohe Variabilität. Die auffälligen Sprünge in den Jahren 1990-1992 und 1997-1998 sind sogar in 850 hPa noch deutlich zu sehen, auch wenn in diesem Niveau von RAOBCORE nur in Experiment 9 1998 eine Korrektur gemacht wird. Diese ist zu groß und erzeugt zusätzliche Inhomogenität sowohl in den Innovationszeitreihen als auch in der Differenz zum Antarktismittel. Vergleicht man die RAOBCORE Korrekturen mit den RICH Korrekturen, so sieht man, dass diese in 200 hPa sehr gut übereinstimmen, in den anderen Niveaus jedoch große Unterschiede aufweisen. So macht RICH für das 850 hPa Niveau große Korrekturen, während RAOBCORE in diesem Niveau nur in Experiment 9 eine Korrektur macht. Dies zeigt, dass die Korrekturen mit großer Unsicherheit behaftet sind. Der Vergleich der korrigierten Innovationszeitreihen zeigt, dass die RAOBCORE Korrekturen für diese Zeitreihe offenbar besser geeignet sind. Die RICH Korrekturen in 850 hPa wirken sich negativ aus. Die Korrektur 1982 ist in der 00:00 UTC Zeitreihe verglichen mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen in 30 hPa gut, in 50 hPa weniger. In der 12:00 UTC Zeitreihe sind die Korrekturen 1982 und 1980 nicht so gelungen, sie sind zu groß.

Die Differenzprofile zu COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) (Abbildung 5.27 Seite 77) zeigen in der Stratosphäre keinen Bias, allerdings für das 12:00 UTC Profil eine stark mit der Höhe variierende Standardabweichung. In der Troposphäre sind die Radiosondentemperaturen tiefer als die Temperaturen aus Radiookkultationsdaten, wobei die maximale Differenz in 500 hPa zu finden ist und etwa 1,5 K beträgt.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1958-2008) | Experiment 4<br>(1958-2006) | Experiment 6<br>(1958-2008) | Experiment 9<br>(1958-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | 0,62                        | 0,24                        | 0,32                        | -0,24                       |
| 50 hPa      | 0,12                        | 0,03                        | 0,23                        | -0,41                       |
| 100 hPa     | -0,51                       | -0,28                       | -0,38                       | -0,46                       |
| 200 hPa     | -0,34                       | -0,48                       | -0,43                       | -0,43                       |
| 850 hPa     | 0,29                        | 0,29                        | 0,29                        | 0,01                        |

Trends an der Station Mc Murdo in K Dekade<sup>-1</sup>.

### 5.7 Novolazarevskaya

Die russische Station Novolazarevskaya 89512 liegt auf 70, 77° S und 11, 83° O. Aufgrund der wenigen vorhandenen Daten entfällt die Interpretation für die 12:00 UTC

Zeitreihe, obwohl in den Experimenten 4 und 6 trotz allem Brüche am 15.2.2001, 11.4.1986 und 9.8.1979 gefunden werden. In Experiment 9 können keine Korrekturen berechnet werden, wenn zu wenig Daten vorhanden sind.

In der 00:00 UTC Zeitserie wird der erste Bruch am 7.11.2002, und der zweite in Experiment 4 am 15.2.2001 gefunden. In Experiment 6 und 9 wird der Bruch 2001 nicht mehr gefunden. In Experiment 9 wird statt dessen ein Bruch am 29.10.2000 gefunden. Für beide Brüche sind signifikante Maxima in den Teststatistikzeitse-

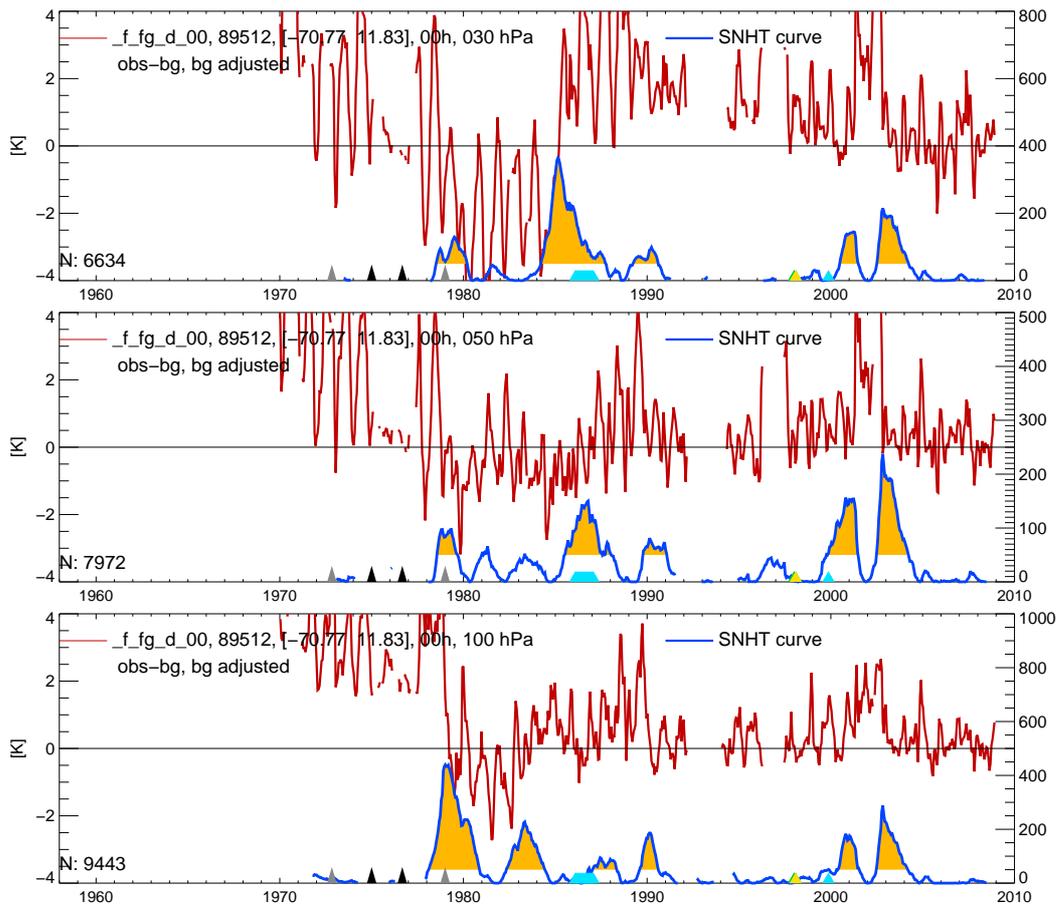


Abbildung 5.28: 00:00 UTC Zeitreihen der Innovationen mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa an der Station 89512 Novolazarevskaya.

rien für die Innovationen in 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa (Abbildung 5.28 Seite 79) sowie Troposphären- und Stratosphärenmittel zu sehen, für den zweiten Bruch zusätzlich auch in der 200 hPa Zeitserie. In manchen Niveaus passen die Maxima besser zum Bruch 2001 in anderen besser zum Bruch im Jahr 2000. Signifikante

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

Maxima sind auch in den Teststatistikzeitreihen für die Differenzzeitreihe zu einem Mittel aus umliegenden Stationen und zu einem Mittel über alle antarktischen Stationen zu sehen. Diese Brüche sind schwer zu korrigieren, da sie nahe beieinander liegen und mit starken Fluktuationen einhergehen. Die Korrekturen sind gut, außer in Experiment 6, wo nur einer der beiden Brüche korrigiert wird. Die RICH Korrekturen sind qualitativ ähnlich, unterscheiden sich aber bis zu 1 K von den RAOBCORE Korrekturen. Die Korrekturprofile für den Bruch am 7.11.2002 zeigen große Übereinstimmung, wobei die größten Differenzen in den untersten Niveaus und in 30 hPa auftreten. Die von RICH verwendeten Stationen sind zwar alle mehr als 1000 km weit entfernt, aber es werden sechs antarktische Stationen verwendet, insgesamt sind es dreizehn. Die Korrekturprofile für den Bruch am 15.2.2001 zeigen einen ähnlichen Verlauf, wobei die RICH Korrekturen in der Stratosphäre um etwa 1 K kleiner sind als die RAOBCORE Korrekturen. In 850 hPa wird von

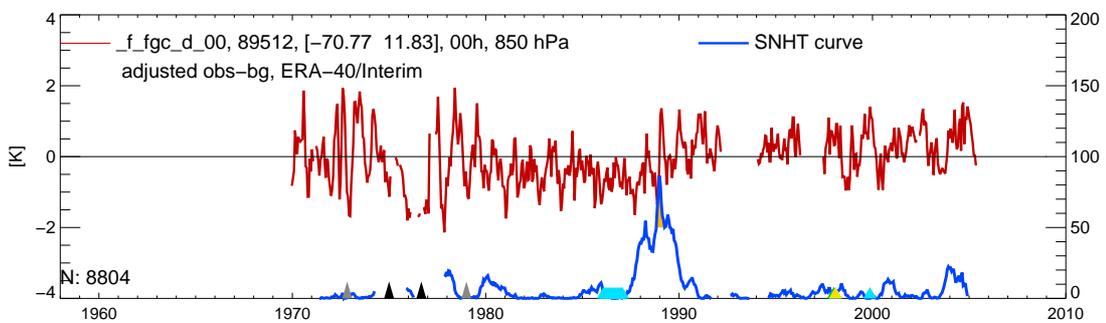


Abbildung 5.29: Mit RAOBCORE korrigierte 00:00 UTC Innovationszeitserie für 850 hPa der Station 89512 Novolazarevskaya.

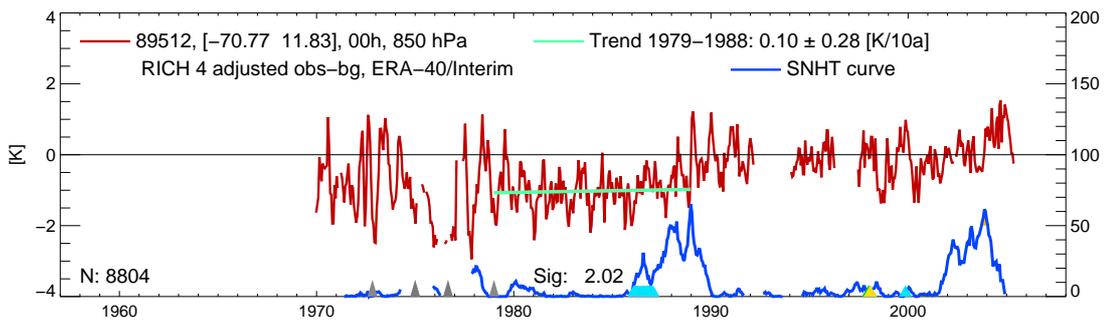


Abbildung 5.30: Mit RICH korrigierte 00:00 UTC Innovationszeitserie für 850 hPa der Station 89512 Novolazarevskaya.

RAOBCORE eine Korrektur im Jahr 2002 gemacht, von RICH hingegen im Jahr

2001, wobei, wenn man die korrigierten Zeitserien (Abbildungen 5.29 und 5.30) betrachtet, die RAOBCORE Korrektur plausibler wirkt. Für die höheren Schichten sieht das anders aus, da sind die Ergebnisse mit RICH für den Bruch 2001 besser.

Auch bei dieser Station gibt es eine Metadatenaufzeichnung am 13.10.1999, hier mit einem Radiosondenwechsel zur MARS-2-1 Sonde, die, wie bereits in Abschnitt 5.1 (Seite 51) beschrieben wurde, vermutlich fehlerhaft ist. Am 1.1.1998 ist ein Radiosondenwechsel zu MARS-2-2, sowie eine neue Bodenstation in den Metadaten verzeichnet, im Monat davor, am 1.12.1997, eine fehlerhafte Strahlungskorrektur.

Der nächste Bruch wird am 24.2.1990 gefunden. Es gibt signifikante Maxima in der Teststatistik für die Innovationen in 200 hPa, 100 hPa, 50 hPa, 30 hPa, Troposphären- und Stratosphärenmittel (Abbildung 5.28 Seite 79). Die Korrekturen von RAOBCORE und RICH sind sehr ähnlich und bringen auch Verbesserungen, nur in 30 hPa wirken die Korrekturen sowohl in Experiment 6 als auch in Experiment 9 etwas zu groß. Für die RICH Korrekturen werden zehn Stationen verwendet, davon sechs antarktische.

Der letzte Metadateneintrag ist ein Radiosondenwechsel im Jahr 1986. In diesem Jahr wird am 11.4. ein Bruch gefunden. Zeitlich sehr gut passt ein Maximum in der Teststatistik für die 50 hPa Zeitserie. In der 30 hPa Zeitserie ist das Maximum und ein auch ohne Teststatistik sichtbarer Bruch schon ein Jahr früher zu sehen, letzterer hat aber mit dem Start von NOAA 9 zu tun. In 100 hPa und in 200 hPa ist das Maximum etwa ein Jahr später zu sehen (Abbildung 5.28). Im Stratosphärenmittel gibt es im Jahr 1986 kein signifikantes Maximum, wohl aber 1985 und 1987. Im Troposphärenmittel ist der Bruch 1986 als signifikant eingetragen, die absoluten Maxima sind aber ebenfalls 1985 und 1987. Dem entsprechend bleiben in der Teststatistik für die korrigierten Zeitserien signifikante Maxima je nach Höhe im Jahr 1985 oder 1987 übrig. In der Teststatistik für die Differenzzeitreihe zum Mittel aus umliegenden Stationen gibt es in den gesamten Jahren 1986 und 1987 hohe Werte, wobei die absoluten Maxima in den verschiedenen Niveaus zu verschiedenen Zeitpunkten sind (Abbildung 5.31). Der Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen würde für einen etwas späteren Bruchzeitpunkt und weniger große Korrekturen sprechen. Die RICH Korrekturen sind in den unteren Niveaus ähnlich den RAOBCORE Korrekturen, unterscheiden sich in den höheren Niveaus jedoch stark. Bei den Korrekturprofilen ist zu sehen, dass sich die 00:00 UTC Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH recht ähnlich sind und erst in den obersten Niveaus größere Unterschiede auftreten, die RICH Korrekturen sind kleiner. Bei den 12:00 UTC Korrekturprofilen unterscheiden sich die Profile stark in ihrer Form. Es gibt einige Niveaus in denen die Korrekturen sehr ähnlich sind, aber es gibt bereits in der Troposphäre Differenzen von mehr als 1 K und oberhalb von 150 hPa werden die Differenzen bis zu 4 K groß. Ein wesentlicher Unterschied sind die verfügbaren umliegenden Stationen. Für das 12:00 UTC Pro-

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

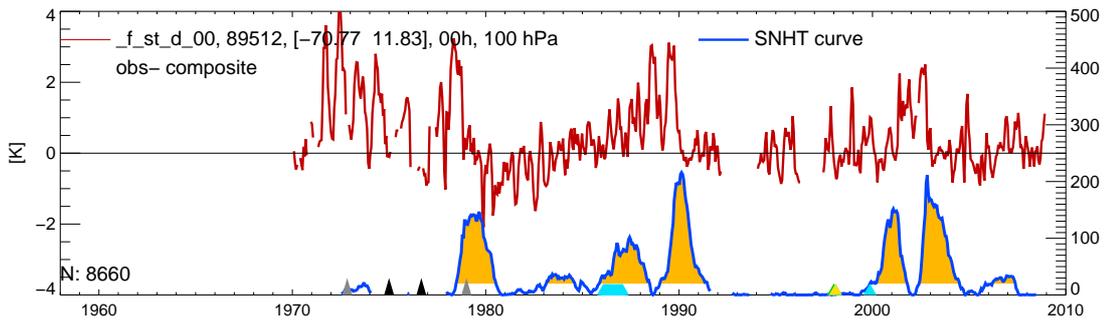


Abbildung 5.31: 00:00 UTC Differenzzeitserie zu einem Mittel aus umliegenden Stationen für die 100 hPa Druckfläche an der Station 89512 Novolazarevskaya.

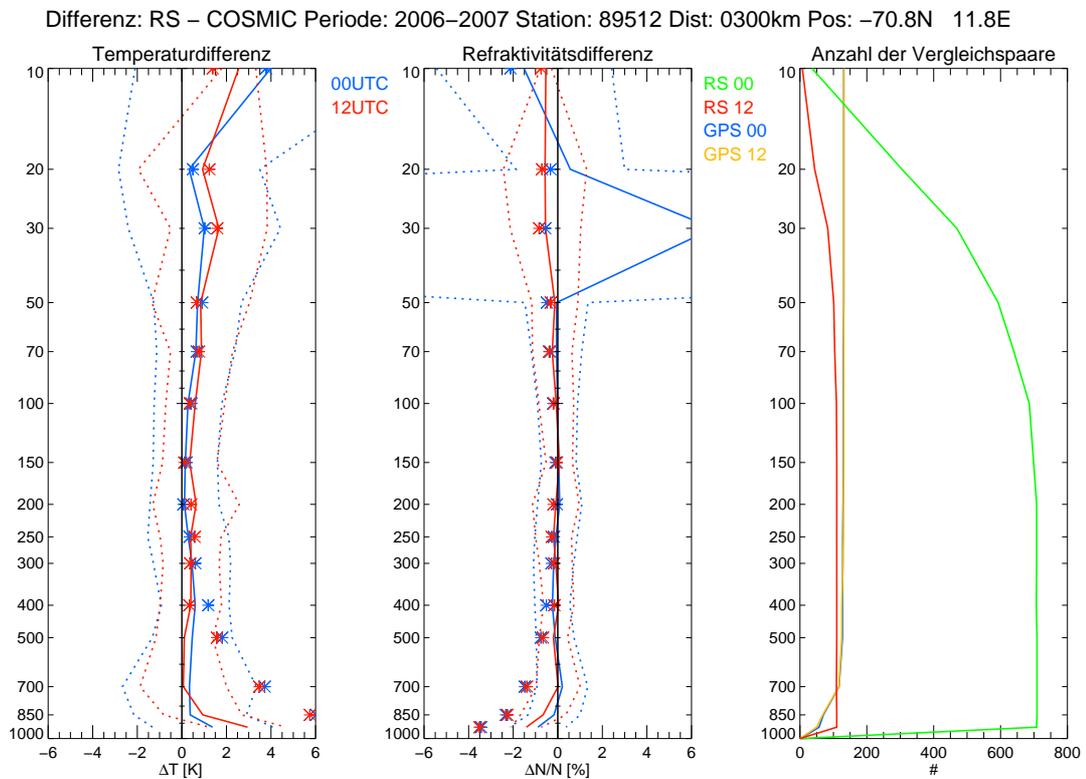


Abbildung 5.32: Mittleres Profil der Temperatur- und Refraktivitätsdifferenzen zwischen der Station 89512 Novolazarevskaya und COSMIC GPS Radiookkultationsdaten, sowie die Anzahl der jeweiligen Beobachtungen.

fil sind nur zwei der verwendeten sieben Stationen antarktische Stationen, beim 00:00 UTC Profil sind es sieben von elf verwendeten Stationen.

Der letzte Bruch wird in Experiment 4 und 6 am 9.8.1979 gefunden. Es sind signifikante Maxima in den Teststatistikzeitserien für 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa (Abbildung 5.28 Seite 79) sowie im Troposphärenmittel und für die Differenzzeitreihe zu einem Mittel aus umliegenden Stationen (Abbildung 5.31 Seite 82) zu sehen. In Experiment 9 wird keine Korrektur gemacht. Die Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH sind für 00:00 UTC ähnlich, die RICH Korrekturen sind unterhalb von 150 hPa größer als die RAOBCORE Korrekturen. Die 12:00 UTC Korrekturprofile sind zwischen 500 hPa und 200 hPa ähnlich, unterhalb macht RAOBCORE keine Korrekturen mehr, RICH dagegen macht für diese Niveaus sehr große Korrekturen, mehr als 1,5 K in 850 hPa. Oberhalb von 200 hPa sind die Differenzen zwischen den RAOBCORE und den RICH Korrekturen ebenfalls groß, 1,5 bis 2 K. Für das 00:00 UTC Profil verwendet RICH dreizehn Stationen, davon acht antarktische. Für das 12:00 UTC Profil stehen nur sechs Stationen zur Verfügung, davon eine antarktische. Die mit RAOBCORE und RICH korrigierten Zeitserien wirken in 100 hPa und 30 hPa insgesamt recht ähnlich, in den anderen Niveaus zeigen die RAOBCORE Korrekturen ein besseres Ergebnis.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1972-2008) | Experiment 4<br>(1972-2006) | Experiment 6<br>(1972-2008) | Experiment 9<br>(1972-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | -0,31                       | -0,57                       | -0,45                       | -0,69                       |
| 50 hPa      | -0,86                       | -0,48                       | -0,43                       | -0,91                       |
| 100 hPa     | -1,16                       | -0,56                       | -0,59                       | -1,21                       |
| 200 hPa     | -0,64                       | -0,46                       | -0,36                       | -0,42                       |
| 850 hPa     | 0,07                        | -0,03                       | 0,07                        | 0,07                        |

Trends an der Station Novolazarevskaya in  $\text{K Dekade}^{-1}$ .

Die Station Novolazarevskaya hat verglichen mit anderen Stationen sehr starke negative Trends in der Stratosphäre.

Die Differenzprofile zu Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) (Abbildung 5.32 Seite 82) zeigen für das 00:00 UTC Profil, dass die Radiosonden in der Troposphäre etwa 0,5 K höhere Temperaturen messen als die, die aus Radiookkultationsdaten gewonnen werden, in 200 hPa und 150 hPa gibt es fast keinen Unterschied, oberhalb steigt die Differenz bis 30 hPa auf 1 K an. In 20 hPa ist die Differenz 0,5 K, in 10 hPa 4 K, wobei hier die Datengrundlage nicht mehr gut ist. Das 12:00 UTC Profil zeigt zwischen 500 hPa und 100 hPa um 0,5 K höhere Radiosondentemperaturen als Temperaturen aus Radiookkultationsdaten, oberhalb steigt die Differenz auf bis zu 2,5 K an. Vergleicht man dazu die RAOBCORE Klimatologiekorrektur (Abbildung 5.33 Seite 84), so sieht man, dass für das 00:00 UTC Profil

Vergleich: RAOBCORE - COSMIC Korrekturen Station: 89512 Pos: -70.8N 11.8E

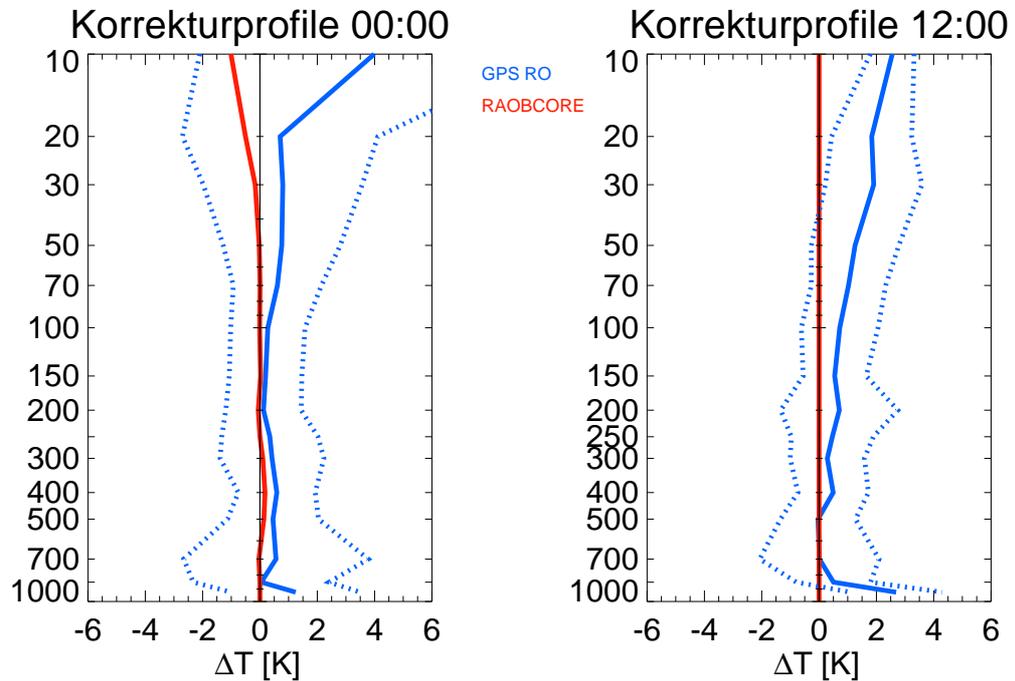


Abbildung 5.33: Vergleich der Korrekturprofile aus Radiookkultationsdaten (blau) mit der RAOBCORE Klimatologie Korrektur (rot) für die Station 89512 Novolazarevskaya.

die Korrekturen im unteren Bereich gut übereinstimmen, in den obersten Schichten 20 hPa und 10 hPa machen beide Verfahren große Korrekturen, allerdings mit unterschiedlichem Vorzeichen. Für das 12:00 UTC Profil macht RAOBCORE keine Klimatologiekorrektur, die Korrekturen aus GPS Radiookkultationsdaten sind in den unteren Schichten klein und werden nach oben immer größer, bis zu 2,5 K.

## 5.8 Mirnyy

Die russische Station Mirnyy Nummer 89592 liegt auf 66,55° S und 93,02° O. Der erste Bruch wird in Experiment 4 und 6 am 21.9.2001 und in Experiment 9 am 24.9.2001 in der 00:00 UTC Zeitserie korrigiert. Es sind Maxima in der Teststatistik für 100 hPa und 200 hPa (Abbildung 5.34 Seite 85) sowie im Troposphären- und Stratosphärenmittel zu sehen.

Der Vergleich der Bruchprofile für RAOBCORE und RICH zeigt für die 00:00

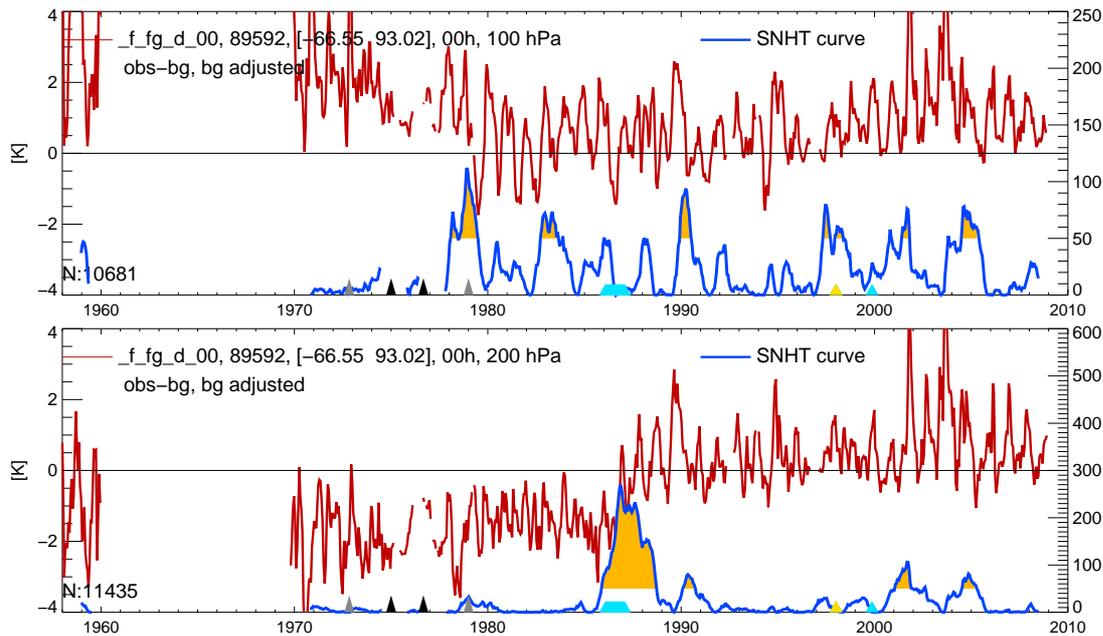


Abbildung 5.34: 00:00 UTC Innovationszeitserien in 200 hPa, und 100 hPa mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 der Station 89592 Mirnyy.

UTC Beobachtungen (Abbildung 5.35 Seite 86) dass die RICH Korrekturen für die Niveaus unterhalb von 100 hPa größer sind als die RAOBCORE Korrekturen. In 100 hPa und 30 hPa sind die Korrekturen fast gleich und in 50 hPa sind die Korrekturen zwar klein, gehen aber in unterschiedliche Richtungen. In 50 hPa sehen die mit RAOBCORE korrigierten Innovationszeitreihen plausibler aus, in 200 hPa und 850 hPa sind die mit RICH korrigierten Innovationszeitreihen besser. Für die RICH Korrekturen werden zehn Stationen verwendet, davon fünf antarktische aber auch drei tropische. Die Korrektur scheint trotzdem recht gut abgesichert zu sein und sich an den weniger weit entfernten antarktischen Stationen zu orientieren. Die RAOBCORE Korrektur liegt in den unteren Niveaus außerhalb der von den umliegenden Stationen vorgegebenen Bandbreite. In der 12:00 UTC Zeitserie macht RAOBCORE im Gegensatz zu RICH keine Korrektur. RICH errechnet sogar in manchen Niveaus sehr große Korrekturen bis zu 2 K. Die RICH Korrekturen für die 12:00 UTC Zeitreihen sind, aufgrund der wenigen antarktischen Stationen, die regelmäßig 12:00 UTC Aufstiege haben, oft problematisch. Die verwendeten Stationen sind überwiegend nicht antarktische Stationen, was sich hauptsächlich auf die höheren Niveaus auswirken dürfte.

In der Differenzzeitreihe der korrigierten Innovationen zu einem Mittel über die antarktischen Stationen ist in der 00:00 UTC Zeitreihe 2004 noch ein Maximum in der Teststatistik zu sehen.

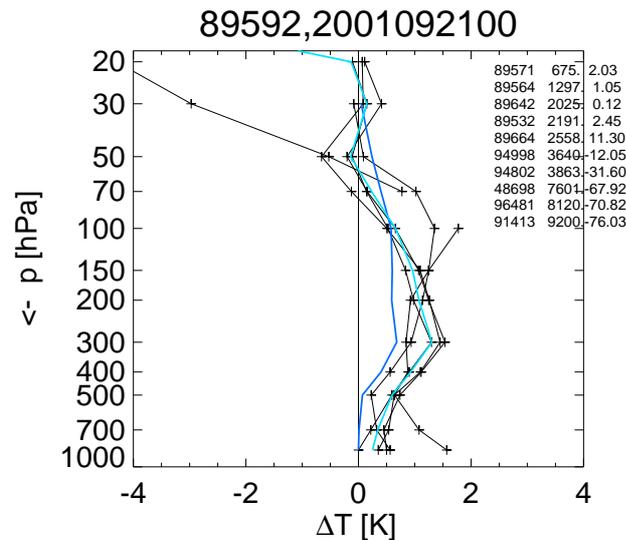


Abbildung 5.35: Profil der RAOBCORE Experiment 4 (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den 21.9.2001 an der Station 89592 Mirnyy.

Am 1.12.1997 ist eine Änderung der Bodenstation und eine fehlerhafte Strahlungskorrektur in den Metadaten verzeichnet. Dort findet sich auch wieder ein Eintrag für den 13.10.1999, der, wie schon in Abschnitt 5.1 (Seite 51) beschrieben wurde, feststellt, dass aktuell die MARS-2-1 Sonde in Verwendung ist, aber nicht unbedingt dass ein Radiosondenwechsel stattgefunden hat. Am 5.8.1997 wird ein Bruch in beiden Zeitserien gefunden. In der 00:00 UTC Zeitserie sind in 100 hPa und 50 hPa (Abbildung 5.34) sowie im Troposphärenmittel Maxima in der Teststatistikzeitserie zu sehen. Die 12:00 UTC Zeitserie hat zu diesem Zeitpunkt zu viele Lücken, als dass eine Teststatistikkurve dargestellt werden könnte, es wird aber in den Experimenten 4 und 6 eine Korrektur gemacht. Der Vergleich der Korrekturprofile für die 12:00 UTC Zeitserie von RAOBCORE und RICH zeigt eine gute Übereinstimmung der Korrekturen zwischen 200 hPa und 300 hPa, in allen anderen Niveaus ist die RICH Korrektur wesentlich größer als die RAOBCORE Korrektur. Die Differenzprofile zu den umliegenden Stationen zeigen, dass es nicht sehr viele gute Vergleichsprofile gibt. Ein Vergleich der mit RAOBCORE Experiment 6 und RICH korrigierten Zeitserien zeigt, dass in den höheren Schichten die RAOBCORE Korrekturen besser sind, in den unteren Schichten zeigen RAOBCORE und RICH Korrekturen ähnliche Ergebnisse.

Am 4.6.1991 wird ein Bruch in der 12:00 UTC Zeitserie gefunden. In der Teststa-

tistik der Innovationszeitserien ist nicht viel zu sehen. In der Teststatistik für das Mittel über die Stratosphäre, ist ein Maximum zu sehen, das mit einem Wert von etwa 23 nicht besonders hoch ist. Das dominantere Maximum mit einem Wert von 42 ist im Jahr 1989 zu sehen. In der Teststatistik für die mittlere Differenzzeitreihe 12:00 UTC - 00:00 UTC gemittelt über die Stratosphäre ist ein Maximum im Jahr 1991 zu sehen, das mit 9,5 auch nicht überragend hoch ist. Wo allerdings signifikante Maxima zu sehen sind, sind die Teststatistikzeitserien für die Differenzen zwischen der Station Mirnyy und einem Mittel aus umliegenden Stationen.

In den Experimenten 6 und 9 wird ein zusätzlicher Bruch am 22.4.1990 gefunden, in Experiment 4 ist er nicht genügend signifikant. In den Zeitreihen der Teststatistik für die Innovationen in verschiedenen Druckniveaus zum Beispiel Abbildung 5.34 Seite 85 sind signifikante Maxima zu sehen. Die Korrekturen aus Experiment 6 und 9 unterscheiden sich besonders in der Troposphäre.

Ein weiterer Bruch wird am 9.12.1986 in den Zeitreihen beider Beobachtungstermine gefunden. Für dieses Jahr ist ein Radiosondenwechsel zur MARS Sonde dokumentiert. Signifikante Maxima sind in der Teststatistik für die 00:00 UTC Innovationszeitserie in 200 hPa und 50 hPa (Abbildung 5.34 Seite 85) sowie im Stratosphären- und Troposphärenmittel zu sehen. Bei den 12:00 UTC Zeitserien sind nur in den Teststatistikzeitserien für die Differenzen zwischen der Station Mirnyy und einem Mittel aus umliegenden Stationen signifikante Maxima zu sehen.

Der nächste Bruch wird am 7.12.1984 in der 12:00 UTC Zeitserie gefunden, wobei diese Zeitserie zu diesem Zeitpunkt nicht besonders vollständig ist. Ein Maximum ist nur in der Teststatistikzeitserie für die Differenz zwischen der Station Mirnyy und einem Mittel aus umliegenden Stationen im Troposphärenmittel und in 400 hPa und 500 hPa in der 00:00 UTC Zeitserie zu sehen, in der 12:00 UTC Zeitreihe gibt es zu wenig Daten für eine Teststatistik. Es werden vor allem in den oberen Schichten in Experiment 4 und 6 große Korrekturen gemacht. Ein Vergleich der Innovationszeitreihen vor und nach der Korrektur zeigt, dass die Korrekturen aus Experiment 4 und 6 an dieser Stelle eher schaden als nützen. Die RICH Korrekturen sind bei diesem Bruch den RAOBCORE Korrekturen ähnlich, wenn auch in 30 hPa etwas kleiner. In Experiment 9 sind die Korrekturen 1984 sehr klein.

Am 18.2.1980 wird in Experiment 4 ein Bruch in den Zeitserien für beide Beobachtungstermine gefunden. Signifikante Maxima gibt es in den Teststatistiken für das Troposphärenmittel des 00:00 UTC Beobachtungstermins und für das Stratosphärenmittel der Differenzzeitreihen zwischen der Station Mirnyy und einem Mittel aus umliegenden Stationen des 12:00 UTC Beobachtungstermins. Die Korrekturen sind nicht besonders groß. Der letzte Bruch wird am 11.2.1961 am Beginn einer mehrjährigen Datenlücke in den Zeitserien beider Beobachtungstermine gefunden.

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1958-2006) | Experiment 4<br>(1958-2006) | Experiment 6<br>(1958-2008) | Experiment 9<br>(1958-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | 0,35                        | 0,08                        | 0,17                        | 0,03                        |
| 50 hPa      | 0,06                        | -0,25                       | -0,36                       | -0,37                       |
| 100 hPa     | -0,36                       | -0,38                       | -0,59                       | -0,7                        |
| 200 hPa     | -0,08                       | -0,6                        | -0,5                        | -0,43                       |
| 850 hPa     | 0,05                        | 0,05                        | 0,1                         | 0,1                         |

Trends an der Station Mirnyy in K Dekade<sup>-1</sup>.

Der Vergleich mit MSU Satellitendaten (Abbildung 5.36) zeigt, dass die RAOB-CORE Korrekturen eine deutliche Verbesserung darstellen. Die RICH Korrekturen

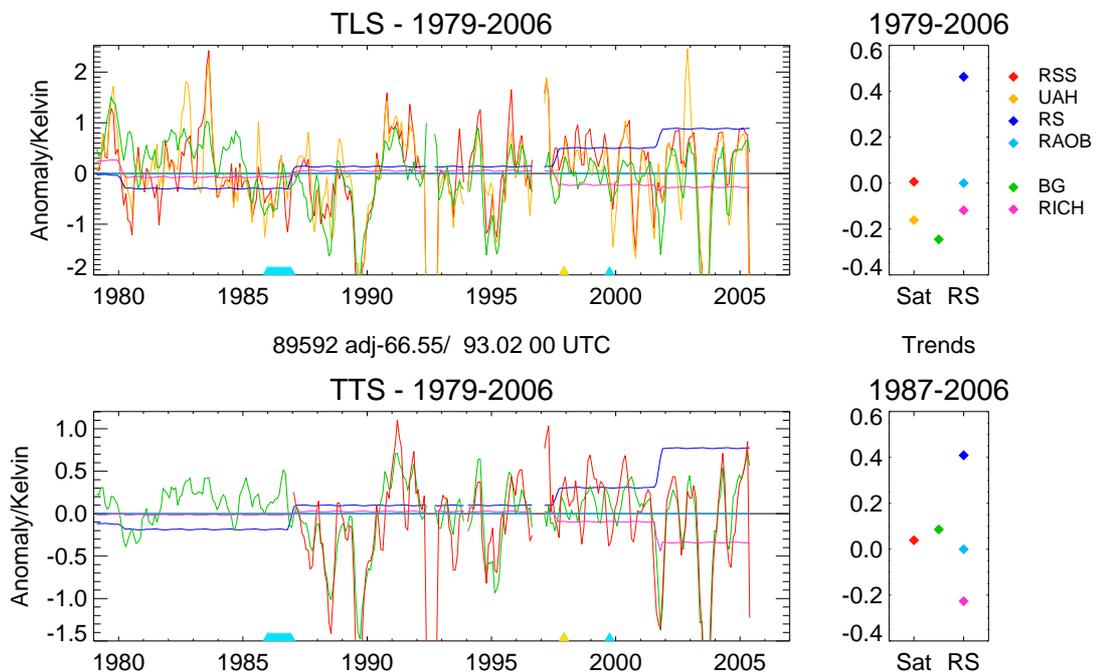


Abbildung 5.36: Zeitreihen der Temperaturanomaliedifferenzen bezüglich der RAOBCORE korrigierten Daten für RSS (rot), UAH (gelb), ERA Backgroundvorhersage (grün), originale Radiosondendaten (dunkelblau) und RICH korrigierte Radiosondendaten (pink) in zwei verschiedenen Schichten (TLS und TTS) an der Station Mirnyy.

bringen auch Verbesserungen, sind aber ab 1997 etwas zu groß.

Die Differenzprofile zu GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) (Abbildung 5.37 Seite 89) zeigen einen Bias in allen Schichten. Die 00:00 UTC Messungen

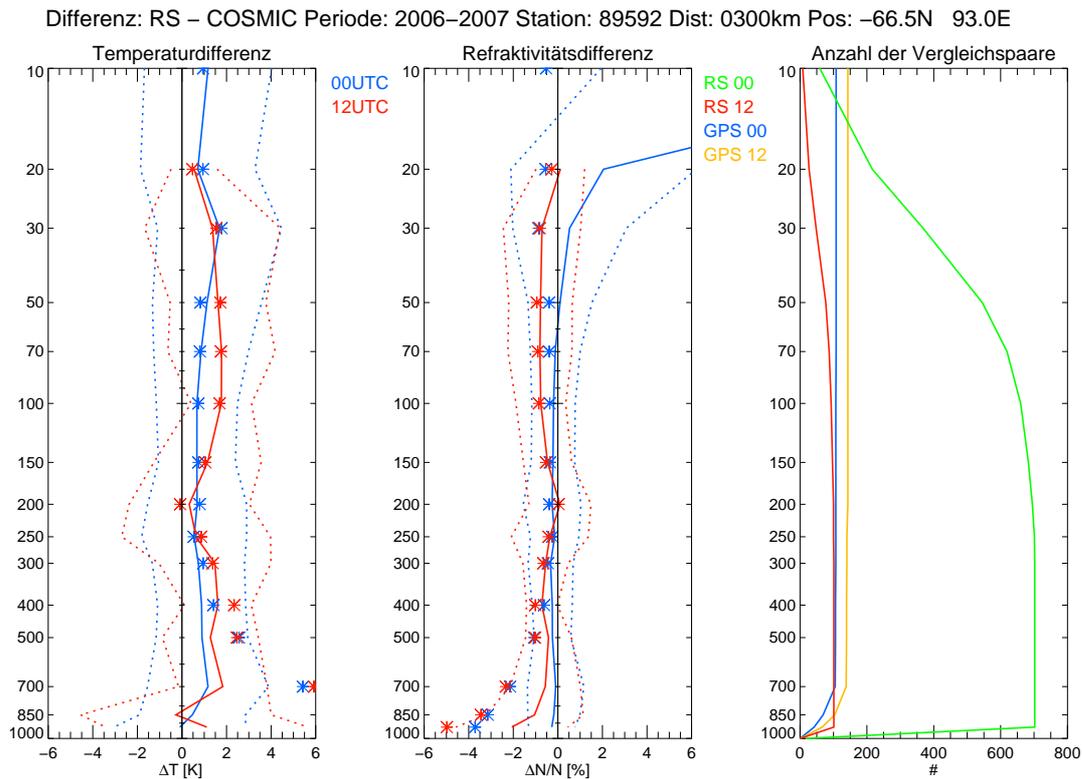


Abbildung 5.37: Mittleres Profil der Temperatur- und Refraktivitätsdifferenzen zwischen der Station 89592 Mirnyy und COSMIC GPS Radiokkultationsdaten, sowie die Anzahl der jeweiligen Beobachtungen.

der Radiosonden haben in der Troposphäre etwa 1 K höhere Temperaturen als die Temperaturen aus Radiokkultationsdaten, zwischen 250 hPa und 100 hPa ist die Differenz etwas kleiner, aber immer noch größer als 0,5 K und oberhalb wird die Differenz der Temperaturen wieder größer. Die größte Differenz gibt es in 30 hPa mit 2 K. Die 12:00 UTC Temperaturen der Radiosonden sind in der Troposphäre 1,5 K höher als die aus Radiokkultationsdaten gewonnenen Temperaturen. In 200 hPa ist die Differenz mit 0,5 K am kleinsten, oberhalb ist sie 1,5 K bis 2 K.

Vergleicht man die Korrekturprofile aus GPS Radiokkultationsdaten mit der RAOBCORE Klimatologiekorrektur (Abbildung 5.38 Seite 90), sieht man für die 00:00 UTC Profile eine sehr gute Übereinstimmung in Höhen oberhalb von 300 hPa, unterhalb ist die RAOBCORE Klimatologiekorrektur kleiner. Für das 12:00 UTC Profil ist die Übereinstimmung nicht ganz so gut, allerdings beruhen die Berechnungen auf wesentlich weniger Daten. Die Korrekturen aus Radiokkultationsdaten schwanken stärker mit der Höhe, auch die Standardabweichung schwankt mit der Höhe. Die RAOBCORE Klimatologiekorrekturen sind über weite Höhen-

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

Vergleich: RAOBCORE - COSMIC Korrekturen Station: 89592 Pos: -66.5N 93.0E

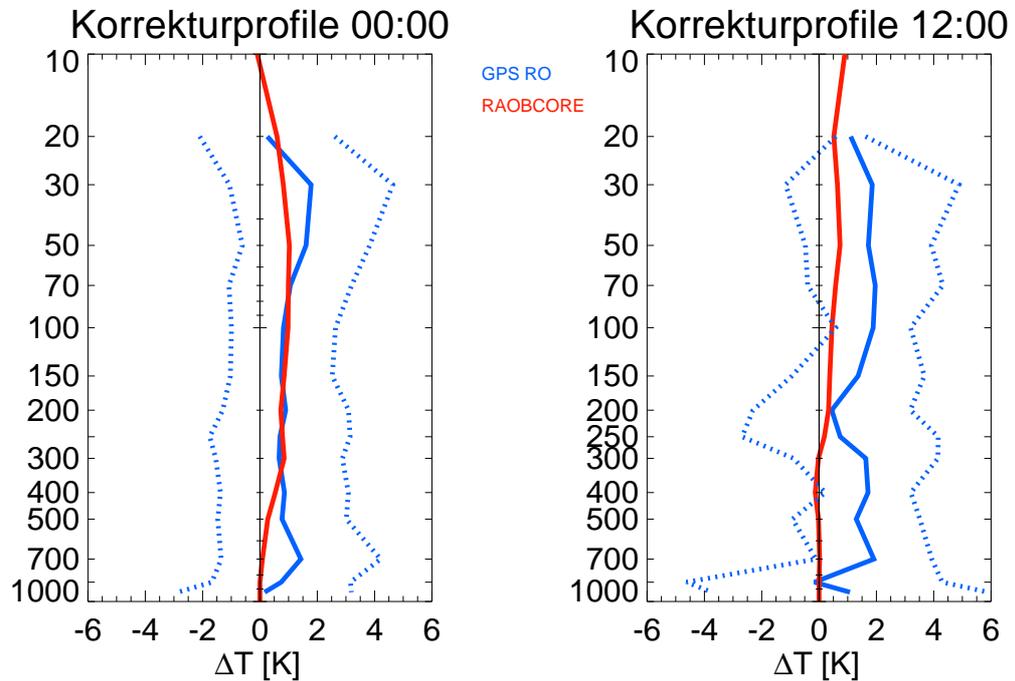


Abbildung 5.38: Vergleich der Korrekturprofile aus Radiookkultationsdaten (blau) mit der RAOBCORE Klimatologiekorrektur (rot) für die Station 89592 Mirnyy.

bereiche nur etwa halb so groß wie die Korrekturen aus Radiookkultationsdaten.

## 5.9 Halley Bay

Die britische Station Halley Bay 89022 liegt auf  $75,5^{\circ}$  S und  $26,65^{\circ}$  W. An der Station Halley Bay wurde (mit wenigen Ausnahmen) immer nur eine Messung pro Tag gemacht, die 12:00 UTC Messung. Daher gibt es auch nur in der 12:00 UTC Zeitserie Brüche.

In Experiment 6 wird der erste Bruch am 23.1.2007 gefunden, in den Experimenten 4 und 9 wird dieser Bruch nicht gefunden. In den Teststatistikzeitserien für die einzelnen Druckniveaus werden zum Teil signifikante Maxima gefunden (Abbildung 5.39), zieht man das Mittel über alle antarktischen Stationen ab oder betrachtet Differenzzeitreihen zu einem Mittel aus umliegenden Stationen, so sind keine signifikanten Maxima der Teststatistik zu sehen. Daher stellt sich die Frage,

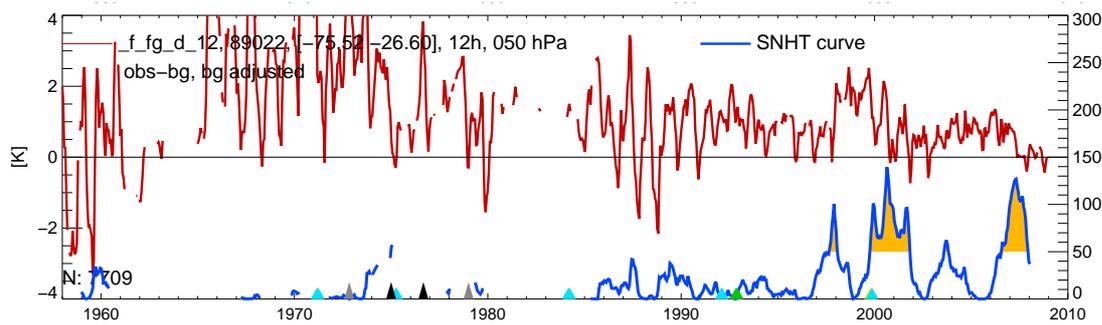


Abbildung 5.39: 12:00 UTC Innovationszeitserie mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 50 hPa für die Station 89022 Halley Bay.

ob diese Korrektur notwendig ist.

Anfang 2006 wird ein Radiosondenwechsel über GTS gemeldet. Der nächste Bruch, in den Experimenten 4 und 9 der erste, wird am 14.12.2002 gefunden. Es wird um den Jahreswechsel 2002/2003 auch ein Radiosondenwechsel über GTS gemeldet. Ein Maximum in der Teststatistik, wenn auch kein besonders hohes, ist in der 200 hPa Innovationszeitserie zu sehen (Abbildung 5.40 Seite 91). Ein

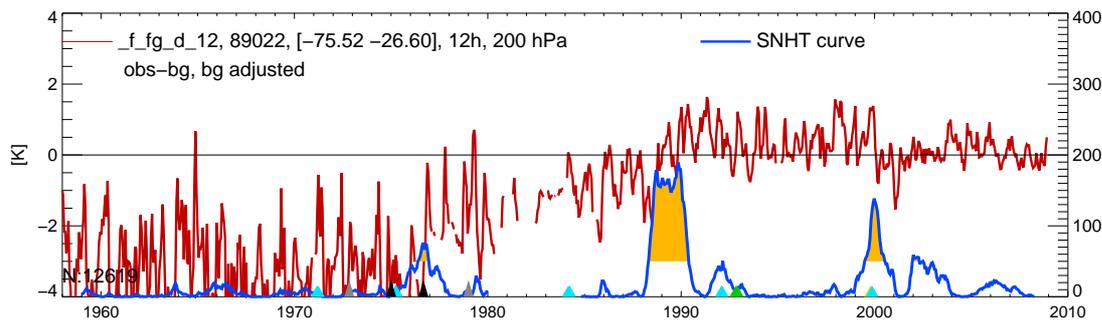


Abbildung 5.40: Wie Abbildung 5.39 für die 200 hPa Druckfläche.

signifikantes Maximum gibt es in der Teststatistik für das Troposphärenmittel.

In den Jahren 2001 und 2000 werden wieder Radiosondenwechsel über GTS gemeldet, laut Marshall (2002) war letzterer ein Wechsel von Intellisonde 4A/5A zu Vaisala RS 80. Am 1.1.2000 wird ein Bruch gefunden. Es gibt signifikante Maxima in den Teststatistikzeitserien für alle Niveaus oberhalb von 200 hPa, sowie im Stratosphären- und im Troposphärenmittel.

Am 16.9.1999 ist eine Änderung der Bodenstation verzeichnet und am 13.10.1999 der Betrieb der AIR-Intellisonde-1680, was, wie schon in Abschnitt 5.1 (Seite 51) erläutert, nur auf nicht besonders gute Dokumentation davor schließen lässt, aber nicht unbedingt auf einen Radiosondenwechsel. Laut Marshall (2002) wurden In-

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

tellisonde 4A und 5A zwischen 1992 und 2000 verwendet.

Am 11.12.1997 wird ein Bruch gefunden ohne Metadateneintrag. Signifikante Maxima sind in den Teststatistikzeitserien für die Innovationen in 100 hPa und 50 hPa sowie im Stratosphären- und Troposphärenmittel zu sehen.

Im Jänner 1992 gibt es einen Wechsel zur AIR Sonde und im Oktober 1992 ein Problem mit der Strahlungskorrektur. Es wird kein Bruch gefunden und in den Innovationszeitserien (Abbildungen 5.39 und 5.40) ist nichts Auffälliges zu sehen. Nur in den Differenzzeitreihen zu einem Mittel aus umliegenden Stationen ist in 200 hPa ein signifikantes Maximum zu sehen (Abbildung 5.41).

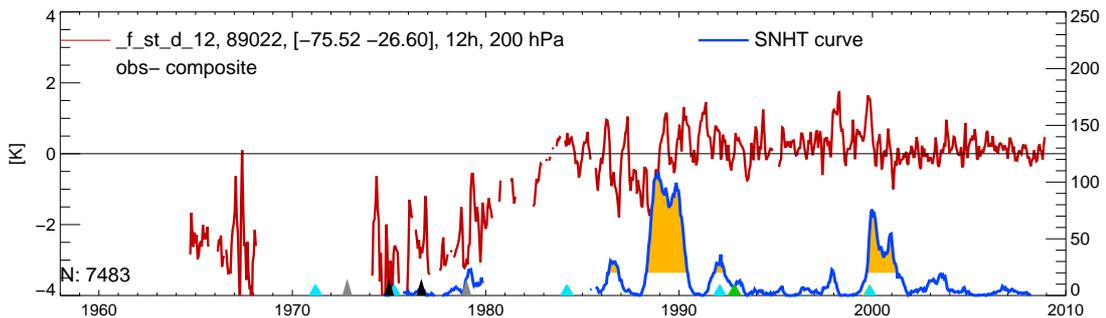


Abbildung 5.41: 12:00 UTC Differenzzeitreihe der Station 89022 Halley Bay zu einem Mittel aus umliegenden Stationen in 200 hPa.

Im Jänner 1984 ist im CARDS der Beginn eines Problems verzeichnet und im Jänner 1988 das Ende dieses Problems. Die Art des Problems ist leider nicht näher spezifiziert, aber in den Innovationszeitreihen ist in verschiedenen Druckniveaus in diesem Zeitraum eine trendartige Veränderung zu sehen, die sich auch in hohen, aber von Niveau zu Niveau unterschiedlichen Werten in der Teststatistik wieder spiegelt. Sogar in 850 hPa ist ein Maximum zu sehen, das einen Wert von 50 erreicht. Für das Troposphärenmittel liegt die Teststatistik über diese vier Jahre fast immer über 100, das absolute Maximum mit 250 ist aber erst 1989 zu sehen. Zu diesem Zeitpunkt gibt es auch ein Maximum in der Teststatistik für das Stratosphärenmittel.

Eine Korrektur gibt es am 28.11.1988. Diese Korrektur bringt zwar Verbesserungen, löst das Problem aber nicht vollständig, da eine Veränderung, die sich über einen längeren Zeitraum hinzieht, nicht gut korrigiert werden kann. Die RICH Korrekturen unterscheiden sich stark von den RAOBCORE Korrekturen. Im Vergleich zum Mittel über die antarktischen Stationen zeigt sich, dass die RAOBCORE Korrektur aus Experiment 6 vor allem in 100 hPa problematisch ist. Die Korrekturen aus Experiment 9 wirken sich sehr positiv aus.

In Experiment 9 wird ein zusätzlicher Bruch am 1.8.1986 gefunden. Es sind signifikante Maxima in der Teststatistik für das 100 hPa und das 30 hPa Niveau zu

sehen, in der Teststatistik für die Differenz zum Mittel aus umliegenden Stationen sind in 200 hPa und 100 hPa signifikante Maxima zu sehen. Für die Differenzzeitreihe zum Mittel über die antarktischen Stationen sind in der Teststatistik signifikante Maxima in 100 hPa und 50 hPa zu sehen. Die Korrekturen bringen Verbesserungen wenn man den Vergleich mit dem Antarktismittel betrachtet.

Im Februar 1984 ist ein Radiosondenwechsel zur VAISALA-RS80 Sonde im CARDS verzeichnet, zu dem auch ein zeitlich passender Bruch am 1.2.1984 gefunden wird. Zu dieser Zeit wurde nur unregelmäßig gemessen, wodurch die Teststatistikzeitserien eine Lücke haben. In der Teststatistik für das Troposphärenmittel ist ein signifikantes Maximum zu sehen.

Ein weiterer Bruch wird am 26.12.1977 gefunden. In der Teststatistik für die Innovationszeitreihen der verschiedenen Druckniveaus, zum Beispiel Abbildung 5.40 (Seite 91), sind zwei Maxima zu sehen: eines im Jahr 1979 und eines im Jahr 1976. Sie sind in unterschiedlichen Niveaus unterschiedlich ausgeprägt. In der Teststatistik für das Stratosphärenmittel ergibt sich dann das Maximum am Ende des Jahres 1977 das schließlich zur Korrektur zu diesem Zeitpunkt führen dürfte. Leider ist dadurch in der korrigierten Zeitserie nicht viel Verbesserung erkennbar. In Experiment 9 wird dieser Bruch nicht gefunden. Verglichen mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen oder dem Mittel aus umliegenden Stationen erscheint diese Korrektur nicht so wichtig. Die Maxima in der Teststatistik korrelieren auch mit Änderungen im Satellitenbeobachtungssystem (graue Dreiecke in den Zeitreihendarstellungen).

Im März 1975 ist ein Radiosondenwechsel zur VIZ Sonde im CARDS verzeichnet. Dazu passend wird ein Bruch am 1.3.1975 gefunden. Es sind auffällige Änderungen in den Innovationszeitreihen zu sehen, die sich aber nicht in Maxima in den Teststatistikzeitserien ausdrücken, wobei es in den höheren Schichten zu wenig Daten für eine Teststatistikzeitserie gibt. Ein signifikantes Maximum in der Teststatistik gibt es im Stratosphärenmittel. RAOBCORE und RICH Korrekturen unterscheiden sich stark, wobei die korrigierten Innovationszeitreihen für RAOBCORE glaubwürdiger erscheinen. Der Bruch wird in Experiment 9 nicht mehr gefunden. Es sind keine Maxima in der Teststatistik für die Differenzzeitreihen zum Mittel über die antarktischen- oder umliegenden Stationen zu sehen.

Im Februar 1971 gibt es einen Wechsel zur GRAW-M60 Sonde, wobei 1971 nichts Auffälliges in den Innovations- oder Teststatistikzeitserien zu sehen ist. Im Vergleich mit dem Mittel über die antarktischen Stationen sind auch keine Maxima in der Teststatistik zu sehen. In Experiment 9 wird am 31.1.1971 ein Bruch gefunden.

Ab dem 1.7.1957 ist im CARDS die Verwendung der KEW-MK-II Sonde verzeichnet, laut Marshall (2002) war es (seit 1960) die MK I Sonde. Marshall (2002) bezieht seine diesbezüglichen Informationen vom British Antarctic Survey.

Der Vergleich mit MSU Satellitendaten (Abbildung 5.42 Seite 94) zeigt, dass die

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

Korrekturen eine Verbesserung bringen, allerdings je nach Schicht ab dem Jahr 2000 oder 2003 nicht ganz ausreichend sind.

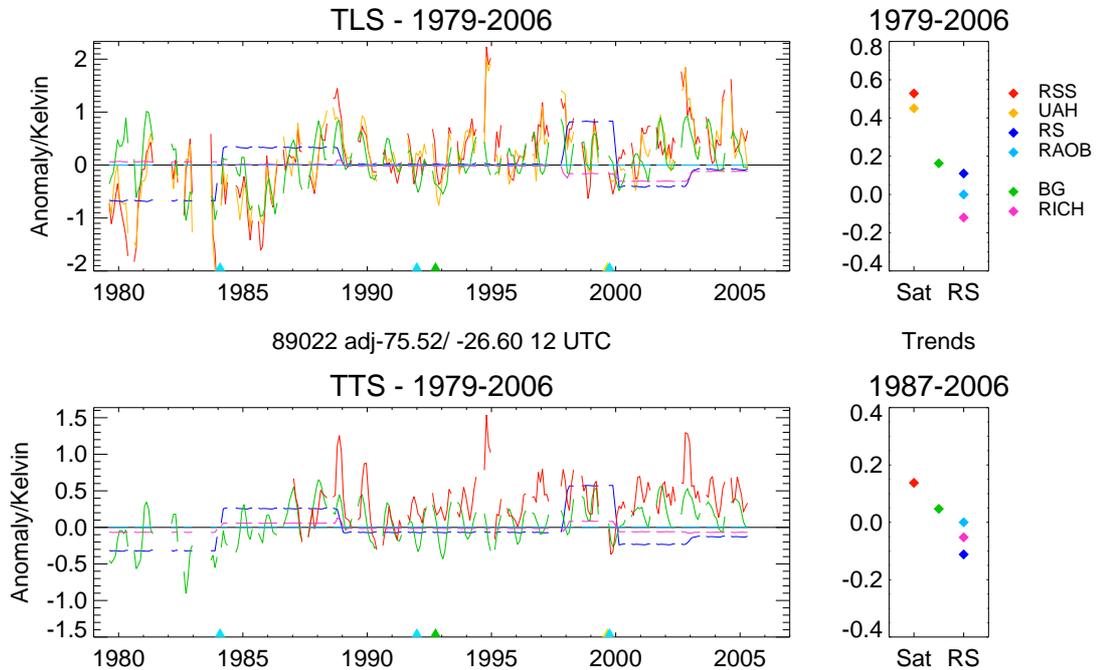


Abbildung 5.42: Links: Zeitreihen der Temperaturanomaliedifferenzen bezüglich der mit RAOBCORE korrigierten Radiosondendaten für RSS (rot), UAH (gelb), ERA Backgroundvorhersage (grün), originale Radiosondendaten (dunkelblau) und mit RICH korrigierte Radiosondendaten (pink) in zwei verschiedenen Schichten (TLS und TTS) an der Station Halley Bay. Rechts: Trends (1979-2006) der Anomaliedifferenzzeitreihen.

Das Differenzprofil zu COSMIC GPS Radiookkultationsdaten zeigt sehr gute Übereinstimmung zwischen den Radiosondentemperaturen und den Temperaturen aus Radiookkultationsdaten. Erst in 20 hPa gibt es eine größere Differenz, es geht allerdings auch die Anzahl der Messungen deutlich zurück.

### 5.10 Neumayer

Die deutsche Neumayer Station 89002 liegt auf  $70,67^\circ$  S und  $8,25^\circ$  W, auch bei dieser Station gibt es fast nur 12:00 UTC Messungen. Daten sind seit 1983 verfügbar. In den Jahren 2003, 2004 und 2006 werden Radiosondeechsel über GTS gemeldet.

Der erste Bruch wird in Experiment 4 am 1.1.2003 korrigiert. Im Jahr 2002 ist ein signifikantes Maximum in der Teststatistik für die Innovationszeitserie in 100 hPa (Abbildung 5.43 Seite 95) zu sehen und 2003 im Stratosphärenmittel. Beim Vergleich mit dem Antarktismittel oder einem Mittel aus umliegenden Sta-

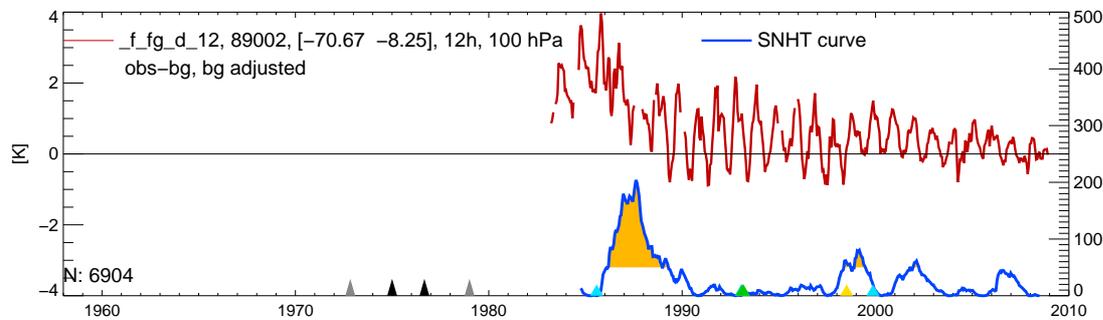


Abbildung 5.43: 12:00 UTC Innovationszeitserie mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 100 hPa für die Station 89002 Neumayer.

tionen (Abbildung 5.44) ist kein Maximum in der Teststatistik zu sehen.

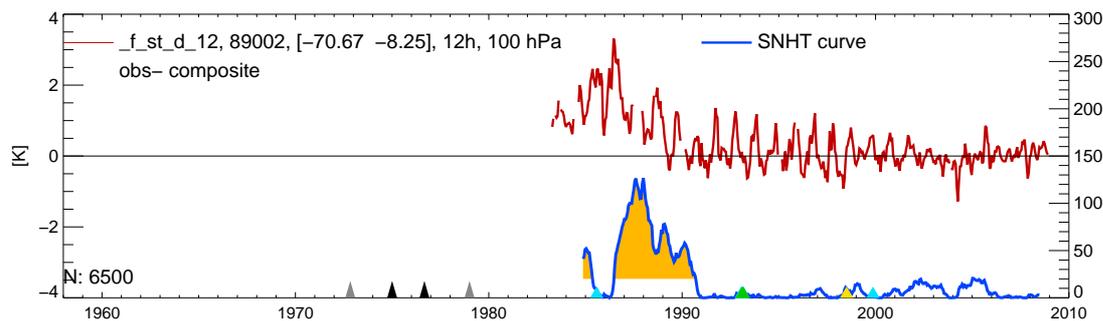


Abbildung 5.44: 12:00 UTC Differenzzeitreihe der Station 89002 Neumayer zu einem Mittel aus umliegenden Stationen in 100 hPa.

In den Experimenten 6 und 9 ist dieser Bruch nicht mehr signifikant und es wird daher keine Korrektur gemacht.

Am 1.6.1998 ist in den Metadaten eine neue Digicora Bodenstation verzeichnet und am 12.10.1999 wird festgestellt, dass noch immer Vaisala-RS80 Radiosonden verwendet werden. Dieser Eintrag bedeutet, wie schon in Abschnitt 5.1 (Seite 51) beschrieben, keinen Radiosondenwechsel.

Am 31.8.1997 wird in den Experimenten 6 und 9 ein Bruch gefunden. Signifikante Maxima sind in der Teststatistik für die 30 hPa Innovationszeitreihe (Abbildung 5.45) und in der Differenzzeitreihe zu einem Mittel umliegender Stationen

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

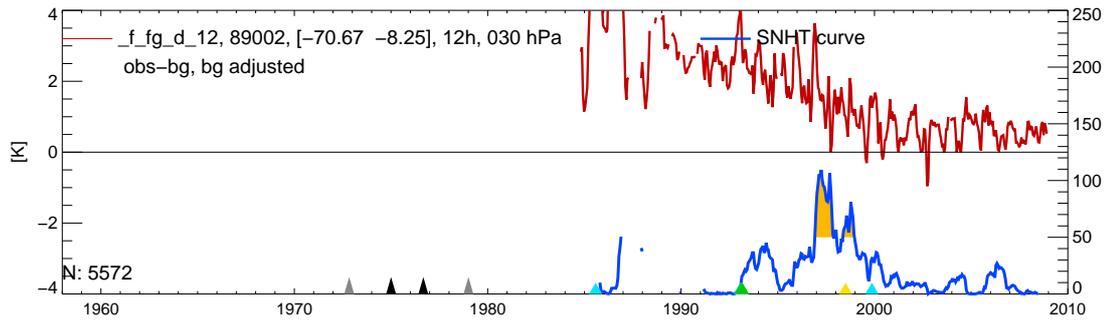


Abbildung 5.45: Wie Abbildung 5.43 für die 30 hPa Druckfläche.

(Abbildung 5.44) sowie im Troposphärenmittel zu sehen. Im Vergleich mit dem Antarktismittel sind ebenfalls Maxima in der Teststatistik zu sehen, allerdings keine signifikanten. Die Korrektur ist in Experiment 6 gut, in Experiment 9 ist sie in 850 hPa zu stark.

Im Jänner 1993 gibt es einen Radiosondenwechsel zur VAISALA-RS80 Sonde mit VRS80-1986 Strahlungskorrektur. Zu dieser Zeit wird kein Bruch gefunden und es ist auch nichts Auffälliges in der Zeitserie zu sehen. Im Dezember 1992 ist im CARDS die GRAW-M60 Sonde verzeichnet, die allerdings auch schon 1985 in den Metadaten steht. In Experiment 9 wird am 13.4.1992 eine Korrektur gemacht, die in den früheren Experimenten als nicht signifikant verworfen wird. Signifikante Maxima sind nur in der Teststatistik für das Stratosphärenmittel zu sehen. Es werden Korrekturen in der Größenordnung von 0,5 K in der Stratosphäre gemacht.

Der nächste Bruch wird in Experiment 4 am 30.3.1989 gefunden, in Experiment 6 wird der Bruch erst am 6.11.1989 gefunden, in Experiment 9 gar nicht. Es gibt dazu passende Maxima in der Teststatistik für die 200 hPa Innovationszeitreihe und in der 100 hPa Innovationszeitserie gibt es Werte über dem Signifikanzniveau, wobei das absolute Maximum 1987 zu sehen ist (Abbildung 5.43). In den Zeitserien für die Maxima der Teststatistik für Mittel über benachbarte Hauptdruckflächen in der Troposphäre und Stratosphäre gibt es ebenso signifikante Maxima wie im Vergleich zum Antarktismittel und zu einem Mittel über umliegende Stationen (Abbildung 5.44). Die RAOBCORE Korrekturen sind wesentlich besser als die RICH Korrekturen, die in den hohen Niveaus extrem groß werden, mehr als 3 K, wie auch im Vergleich der Korrekturprofile aus Experiment 4 zu sehen ist (Abbildung 5.46 Seite 97). (Die Abbildung für Experiment 6 sieht sehr ähnlich aus.) Die RAOBCORE Korrekturen sind vertikal sehr inhomogen, die RICH Korrekturen stützen sich auf elf umliegende Stationen von denen nur vier in der Antarktis liegen. Dementsprechend streuen auch die Differenzprofile zu den verwendeten umliegenden Stationen. Ein Vergleich mit dem Antarktismittel zeigt, dass die Korrektur 1989 gut ist, und in Experiment 9 fehlt.

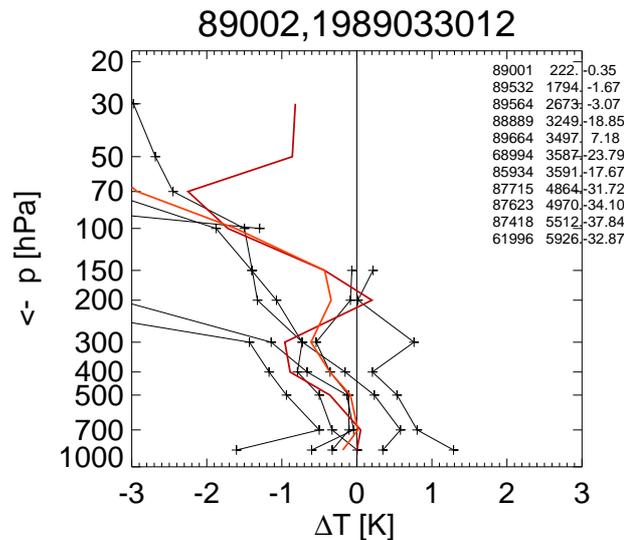


Abbildung 5.46: Profil der RAOBCORE Experiment 4 (dunkelrot) und RICH (hellrot) Korrekturen der 12:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den 30.3.1989 an der Station 89002 Neumayer.

1987 ist eine markante Änderung in den Innovationszeitreihen zu sehen, aber es wird in Experiment 4 kein Bruch gefunden. In Experiment 6 wird ein Bruch am 9.2.1987 und in Experiment 9 am 26.12.1987 gefunden. Es gibt ein Maximum von 250 in der Teststatistik für die 100 hPa Innovationszeitserie (Abbildung 5.43 Seite 95) und im Troposphärenmittel sind es immerhin 130. In der Teststatistik für die Differenzen zwischen der Station Neumayer und einem Mittel aus umliegenden Stationen sind auch Maxima zu sehen (Abbildung 5.44 Seite 95). Der Vergleich mit dem Antarktismittel spricht eher für das spätere Bruchdatum aus Experiment 9. In Experiment 4 zeigt die Zeitserie der Bruchwahrscheinlichkeiten für das Troposphärenmittel keine hohe Bruchwahrscheinlichkeit zu dieser Zeit. Da die Differenzzeitreihen zwischen der betrachteten Station und umliegenden Stationen erst bei ausreichender Bruchwahrscheinlichkeit im Troposphären- oder Stratosphärenmittel berücksichtigt werden, kommt es hier zu keiner Korrektur. In den Experimenten 6 und 9 gibt es ausreichend hohe Bruchwahrscheinlichkeiten in der Troposphäre und somit auch Korrekturen. In Experiment 6 sind die Korrekturen verglichen mit dem Antarktismittel in 100 hPa und 30 hPa zu groß, in Experiment 9 wirken sie plausibel.

Der nächste Bruch wird am 29.6.1985, passend zu einem Radiosondenwechsel zur GRAW-M60 Sonde an diesem Tag, gefunden. Es gibt ein signifikantes Maxi-

mum in der Teststatistik für das Troposphärenmittel der Differenz zwischen der Station Neumayer und einem Mittel aus umliegenden Stationen. Die Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH sind sehr unterschiedlich, wobei die verwendeten umliegenden Stationen sehr uneinheitlich sind. Betrachtet man den gleichen Bruch in Experiment 6, so fällt auf, dass eine zusätzliche antarktische Station verwendet wird, was bewirkt, dass sich das RICH Korrekturprofil massiv von dem aus Experiment 4 unterscheidet. Bei den RAOBCORE Korrekturen gibt es zwischen Experiment 4 und 6 ebenfalls große Unterschiede in 100 hPa. Die Korrektur in 100 hPa und 30 hPa erscheint im Vergleich mit dem Antarktismittel in Experiment 6 zu groß, in Experiment 9 sieht sie plausibel aus.

Der Vergleich mit COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) zeigt, dass die Station Neumayer im Mittel über die Jahre 2006 bis 2007 keinen nennenswerten Bias gegenüber diesen Daten hat.

### 5.11 Bellingshausen

Die russische Station Bellingshausen 89050 liegt auf  $62,20^\circ$  S und  $58,93^\circ$  W. Bei dieser Station sind kaum Messungen zum 12:00 UTC Termin vorhanden, daher gibt es nur Brüche in der 00:00 UTC Zeitserie.

Am 1.12.1997 ist eine fehlerhafte Strahlungskorrektur und eine neue Bodenstation in den Metadaten verzeichnet, es wird aber kein Bruch gefunden, was auch mit fehlenden Daten davor zu tun haben könnte.

Der erste Bruch wird am 13.5.1995 gefunden. Es sind in den Innovationszeitreihen (Abbildung 5.47) kurze Ausreißer nach oben zu sehen. Ein signifikantes Maximum ist in der Teststatistik für das 200 hPa Niveau, das Mittel über die Stratosphäre und die Troposphäre zu sehen. In der Zeitreihe für die Differenz zu einem Mittel aus umliegenden Stationen gibt es auch signifikante Maxima in der Teststatistik (Abbildung 5.48), wobei auch hier mit Ausnahme des 200 hPa Niveaus kaum eine Änderung des Mittelwerts zu sehen ist, sondern eher Ausreißer. Die Ausreißer nach oben und unten sind zu kurzfristig um korrigiert zu werden. Nach der Korrektur passen die Innovationen weniger gut zum Mittel über die antarktischen Stationen.

Am 1.9.1991 wird in Experiment 4 ein Bruch ohne Metadateneintrag gefunden, in Experiment 6 und 9 wird statt dessen einer am 8.6.1990 gefunden. In den Innovationszeitserien der einzelnen Druckniveaus sind keine Auffälligkeiten oder signifikante Maxima in der Teststatistik zu sehen aber in der Zeitserie der Teststatistik für das Mittel über die Stratosphäre gibt es ein signifikantes Maximum. 1990 gibt es auch ein Maximum in der Teststatistik für die Differenz zwischen der Station Bellingshausen und einem Mittel aus umliegenden Stationen in 200 hPa (Abbildung 5.48).

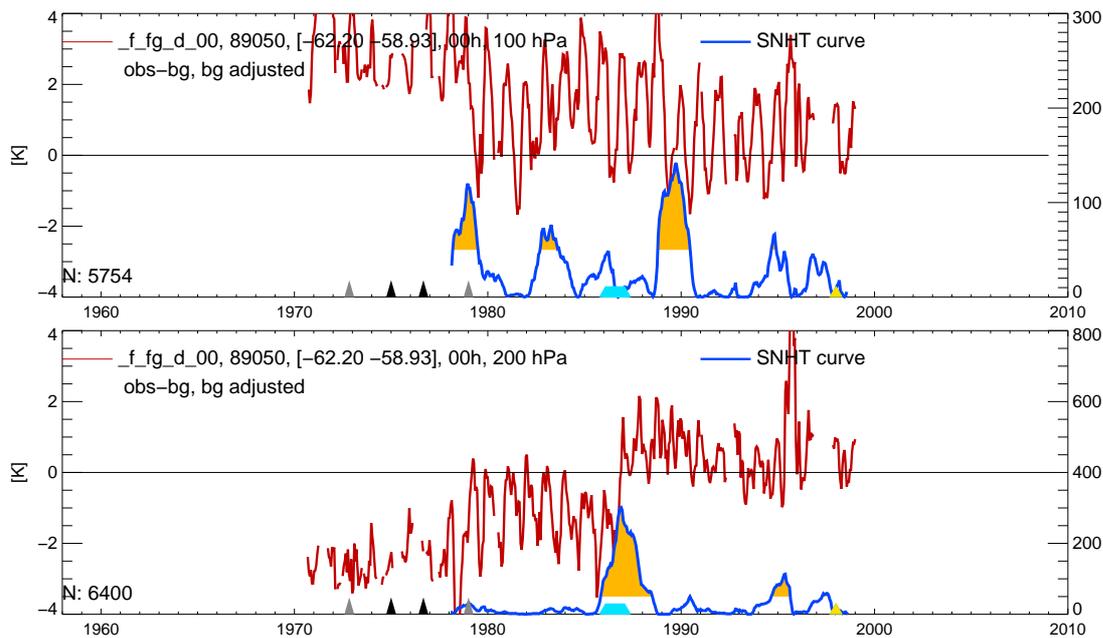


Abbildung 5.47: 00:00 UTC Innovationszeitserie mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 100 hPa und 200 hPa für die Station 89050 Bellingshausen.

Der nächste Bruch wird am 14.1.1989 gefunden, es gibt keinen Eintrag in den Metadaten. Dieser Bruch ist in Abbildung 5.47 (Seite 99) am besten in der 100 hPa Innovationszeitserie zu sehen und wird abgesehen vom 850 hPa Niveau gut korrigiert. Wenn man mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen vergleicht, ist die Korrektur in Experiment 6 und 9 in 30 hPa zu groß. Weitere signifikante Maxima sind in der Teststatistikzeitserie für das Stratosphären- und Troposphärenmittel und in der Differenzzeitreihe zu einem Mittel aus umliegenden Stationen in 100 hPa zu sehen.

Im Jahr 1986 ist ein Radiosondenwechsel zur MARS Sonde verzeichnet. Am 27.10.1986 wird in den Experimenten 4 und 6 ein Bruch gefunden. Dieser ist in der Innovationszeitserie (Abbildung 5.47 Seite 99) vor allem in 200 hPa mit einem Maximum von 300 in der Teststatistik und in 50 hPa mit einem Maximum von etwa 150 in der Teststatistik gut zu sehen. In 30 hPa wäre der Bruch mit einem Maximum von 200 in der Teststatistik schon im Jahr davor zu vermuten, wodurch in der korrigierten Innovationszeitreihe eine Inhomogenität bleibt, die aber in der Differenzzeitreihe zum Antarktismittel (Abbildung 5.49) nicht zu sehen ist und daher von der Backgroundvorhersage und dem Start der Assimilation von Daten des NOAA 9 Satelliten kommen dürfte. Auch im Stratosphären- und im Troposphärenmittel sind signifikante Maxima zu sehen. In Experiment 9 kann keine Korrektur

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

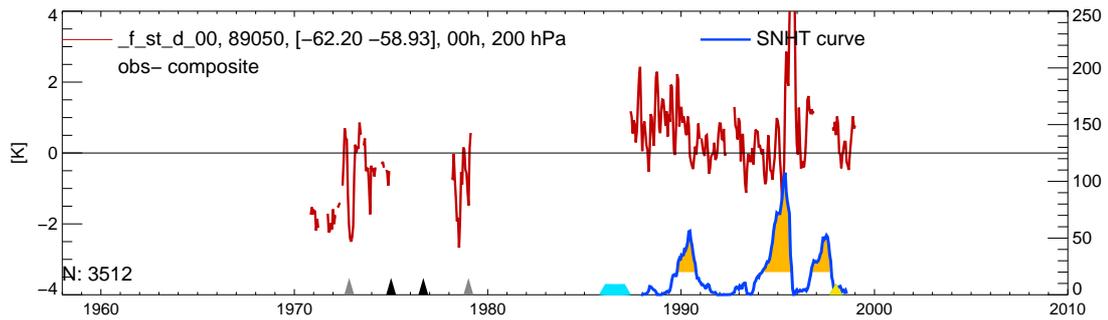


Abbildung 5.48: 00:00 UTC Differenzzeitserie zwischen der Station 89050 Bellingshausen und einem Mittel aus umliegenden Stationen in 200 hPa.

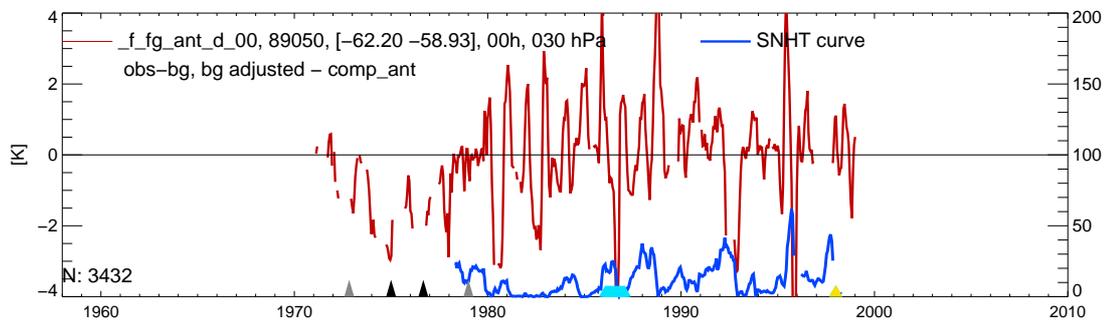


Abbildung 5.49: 00:00 UTC Differenzzeitserie zwischen den Innovationen der Station 89050 Bellingshausen und einem Mittel der Innovationszeitreihen aller antarktischer Stationen in 30 hPa.

gemacht werden, da nicht genug umliegende Stationen gefunden werden konnten, wie die Lücke in Abbildung 5.48 zeigt. Die RAOBCORE Korrekturen sind an dieser Station im Allgemeinen besser als die RICH Korrekturen.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1973-1998) | Experiment 4<br>(1973-1998) | Experiment 6<br>(1973-1998) | Experiment 9<br>(1973-1998) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | -0,1                        | 0,11                        | 0,03                        | 0,93                        |
| 50 hPa      | -0,32                       | -0,85                       | -0,59                       | 0,38                        |
| 100 hPa     | -0,76                       | -0,36                       | -0,55                       | -0,63                       |
| 200 hPa     | -0,25                       | -1,02                       | -0,84                       | -0,92                       |
| 850 hPa     | 0,3                         | 0,3                         | 0,3                         | 0,3                         |

Trends an der Station Bellingshausen in  $\text{K Dekade}^{-1}$ .

Der positive Trend von  $0,38 \text{ K Dekade}^{-1}$  in 50 hPa und  $0,93 \text{ K Dekade}^{-1}$  in

30 hPa in Experiment 9 hat mit einer, im Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen, nicht optimalen Korrektur im Jahr 1989 zu tun. Die unkorrigierten Trends erscheinen realistischer.

Die Station Bellingshausen liegt auf der antarktischen Halbinsel, weiter nördlich als die meisten anderen antarktischen Stationen und damit öfter außerhalb des Polarwirbels. Dadurch unterscheiden sich auch die Trends von den umliegenden Stationen und für die Korrekturen von RICH oder aus Experiment 9 ist es schwierig Nachbarstationen zu finden. Die nächsten Stationen, die RICH verwendet, liegen nicht in der Antarktis, es werden aber für die meisten Korrekturen viele antarktische Stationen verwendet. Es kommt dadurch zu einer starken Streuung der Differenzprofile zu den umliegenden Stationen. In Experiment 9 werden dagegen nur antarktische Stationen verwendet, was speziell für diese Station möglicherweise suboptimal ist.

## 5.12 Vice Commodore Mario Luis Olezza

Die argentinische Station Vice Commodore Mario Luis Olezza/Marambio 89055 liegt auf  $64, 23^\circ$  S und  $56, 72^\circ$  W. Diese Station hat allgemein sehr wenig Daten wie

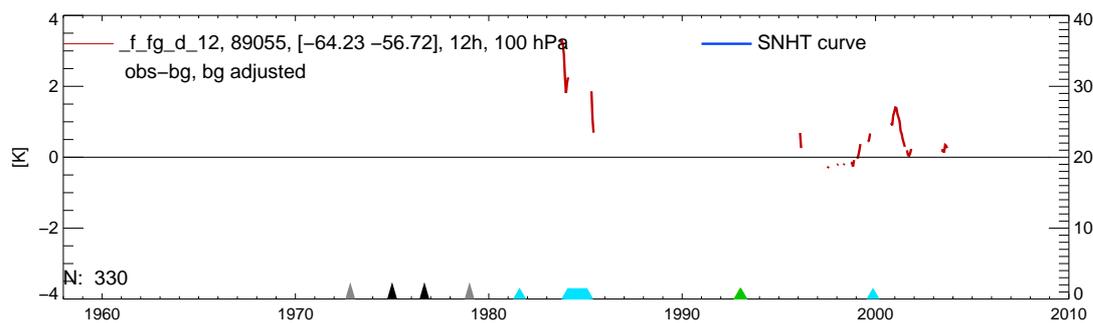


Abbildung 5.50: 12:00 UTC Innovationszeitserie mit globaler Backgroundkorrektur für ERA-40 in 100 hPa für die Station 89055 Vice Commodore Mario Luis Olezza.

in Abbildung 5.50 zu sehen ist. Dennoch werden am 4.1.1989 und am 4.2.1998 (in Experiment 9 nur am 4.2.1998) Brüche in der 12:00 UTC Zeitserie gefunden. Die Bruchprofile für den Bruch am 4.1.1989 zeigen, dass es in der Troposphäre noch recht gute Informationen von umliegenden Stationen gibt auch wenn die nächste Station bereits 1383 km weit entfernt ist, oberhalb werden die Informationen immer weniger und immer uneinheitlicher. Die Korrektur 1998 ist in Experiment 9 kleiner als in Experiment 6. Zwischen Experiment 4 und 6 ändern sich nur die Bruchgrößen ein wenig. In der 00:00 UTC Zeitserie gibt es noch weniger Daten.

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

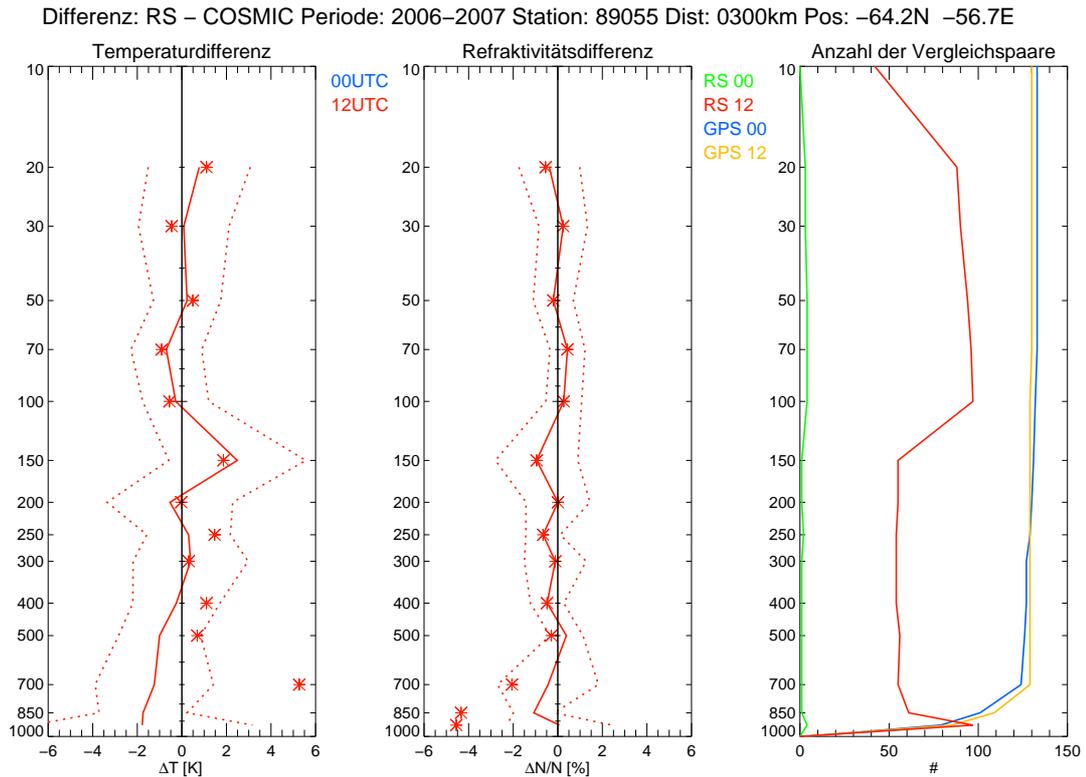


Abbildung 5.51: Mittleres Profil der Temperatur- und Refraktivitätsdifferenzen zwischen der Station 89055 Vice Commodore Mario Luis Olezza und COSMIC GPS Radiookkultationsdaten, sowie die Anzahl der jeweiligen Beobachtungen.

Es gibt geradezu ausführliche Metadaten: 4.7.1981 VAISALA-RS21 Sonde, 1984 Wechsel zu VAISALA-RS80 Sonde, 1.12.1992 Digicora Bodenstation und VRS80-1986 Strahlungskorrektur und wieder ein Eintrag für den 13.10.1999, der aber eigentlich nur das Vorherige bestätigt.

Abbildung 5.51 (Seite 102) zeigt einen Vergleich der Station Vice Commodore Mario Luis Olezza mit COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009). In der Troposphäre sind die Radiosondentemperaturen verglichen mit den Temperaturen aus Radiookkultationsdaten zu tief. In 150 hPa sind die Radiosondentemperaturen um mehr als 2 K höher als die Temperaturen aus Radiookkultationsdaten, sonst gibt es in der Stratosphäre gute Übereinstimmung. Die Anzahl der Vergleichspaare ist allerdings eher klein und schwankt mit der Höhe.

## 5.13 Dumont

Die französische Station Dumont 89642 liegt auf 66,67° S und 140,02° O. Es gibt für die 12:00 UTC Zeitserie fast keine Daten, wodurch die Brüche nur in der 00:00 UTC Zeitserie zu finden sind. Bei dieser Station stehen neben den Metadaten aus dem CARDS, die in RAOBCORE verwendet werden, auch eine Metadatentabelle aus David et al. (2009) zur Verfügung. Die beiden sind in manchen Bereichen unterschiedlich, die Metadaten aus David et al. (2009) erklären aber einige der gefundenen Brüche oder Maxima in der Teststatistik.

Der erste Bruch wird in Experiment 4 am 16.10.2002 gefunden, es findet ein Wechsel von der Vaisala RS80 zur Vaisala RS90 Radiosonde, sowie eine Änderung des verwendeten Ballontyps (David et al., 2009) statt. Es gibt ein markantes Maximum von 130 in der Zeitserie der Maxima der Teststatistik für die Mittel über benachbarte Hauptdruckflächen in der Stratosphäre und ein schwächeres, aber immer noch signifikantes, in der Zeitserie der Maxima der Teststatistik der Mittel über benachbarte Hauptdruckflächen in der Troposphäre. In Experiment 6 wird dieser Bruch nicht mehr gefunden. In Experiment 9 gibt es eine Korrektur am 1.10.2005. Seit November 2005 wird laut David et al. (2009) eine Modem M2K2-DC Sonde verwendet. Die Korrektur hat in den meisten Niveaus positive Auswirkungen, in 850 hPa wirkt sie sich negativ aus. Die Radiosondenwechsel 2002 und 2005 gehen zwar nicht aus der CARDS Datenbank hervor, allerdings melden die zwei neuesten Radiosondentypen ihren Typ über GTS, wodurch von RAOBCORE die entsprechenden a priori Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden (Abbildung 5.52).

Am 1.12.1997 ist eine neue Bodenstation und ein neuer Ballontyp (David et al., 2009) in den Metadaten verzeichnet. In der Teststatistikzeitserie für das Troposphärenmittel ist ein signifikantes Maximum zu sehen, die Bruchwahrscheinlichkeit beträgt 0,7 (Abbildung 5.54 Seite 105), es wird aber kein Bruch korrigiert. In der Differenzzeitreihe zum Antarktismittel (Abbildung 5.53) ist zu dieser Zeit eine Abnahme des Jahresgangs der Innovationen zu sehen. Möglicherweise hat die neue Bodenstation auch eine andere Strahlungskorrektur gemacht. Im Dezember 1992 ist eine neue Strahlungskorrektur in den Metadaten verzeichnet.

Im Jahr 1989 ist im CARDS ein Radiosondenwechsel zur VAISALA-RS80 Sonde verzeichnet, laut David et al. (2009) hat dieser schon im April 1986 stattgefunden. Am 23.12.1989 wird in Experiment 4 ein Bruch gefunden, in Experiment 6 und 9 ist er am 15.11.1989. Es gibt ein signifikantes Maximum in der Teststatistikzeitserie für 200 hPa.

Im Jahr 1986 ist ein Ausfall der Strahlungskorrektur verzeichnet, es wird kein Bruch gefunden. Am 30.6.1985 gibt es den ersten Metadateneintrag im CARDS, einen Radiosondenwechsel zur PHILIPS Sonde, die laut David et al. (2009) nicht verwendet worden ist. An diesem Tag wird in Experiment 4 und 6 ein Bruch

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

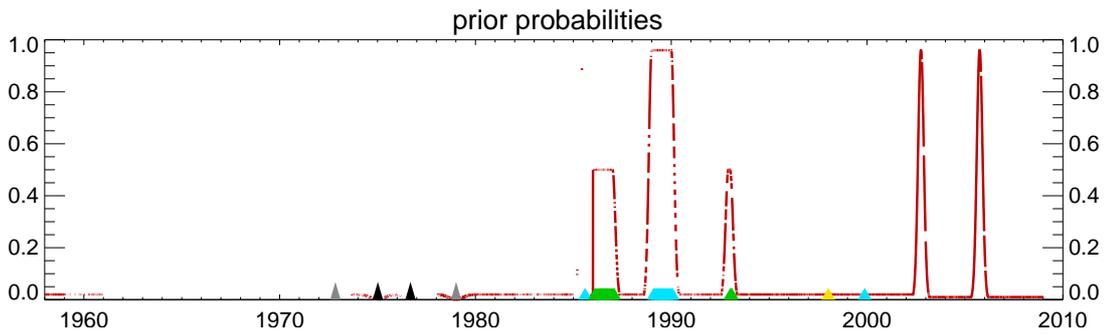


Abbildung 5.52: Zeitserie der a priori Bruchwahrscheinlichkeiten für die Station 89642 Dumont aufgrund von Metadaten. Blaue Dreiecke oder Trapeze auf der Zeitachse bezeichnen im CARDS dokumentierte Radiosondenwechsel, grüne Dreiecke und Trapeze Änderungen der Strahlungskorrektur, gelbe Dreiecke Änderungen der Bodenstation und graue Dreiecke große Änderungen im Beobachtungssystem der Reanalysen. Bei Radiosondenwechseln wird die a priori Wahrscheinlichkeit auf 0,96 gesetzt, bei Änderungen der Strahlungskorrektur auf 0,5, bei Änderungen im Beobachtungssystem auf 0, sonst auf 0,02 und ab 2003, wo die Radiosonden ihren Typ melden, auf 0,01.

gefunden, wobei signifikante Maxima in der Teststatistik für 100 hPa und im Troposphärenmittel zu sehen sind. In Experiment 9 wird dieser Bruch nicht gefunden, vermutlich, da es eine Lücke in der Zeitreihe gibt, vielleicht gibt es dort auch gar keinen Radiosondenwechsel (David et al., 2009).

1979 sind in den Kurven der Teststatistik der Differenz zum Antarktismittel (Abbildung 5.53) signifikante Maxima zu sehen. Im Troposphärenmittel erreicht die Teststatistik Werte über 200 und die Bruchwahrscheinlichkeit liegt für das Troposphärenmittel bei 0,7 (Abbildung 5.54 Seite 105), es wird in Experiment 4 und 6 keine Korrektur gemacht, in Experiment 9 gibt es eine Korrektur am 12.9.1979. In David et al. (2009) ist im November 1979 ein Wechsel zur Mesural FMO 1955 Sonde verzeichnet.

Der nächste Bruch wird am 22.2.1977 gefunden, hier beginnt eine Datenlücke. Die Teststatistik der Zeitreihen für die Innovationen in verschiedenen Druckniveaus ist aufgrund der Datenlücken in den Abbildungen nicht zu sehen aber im Stratosphären- und Troposphärenmittel gibt es signifikante Maxima. Der letzte Bruch wird am 11.2.1961 vor einer großen Datenlücke gefunden.

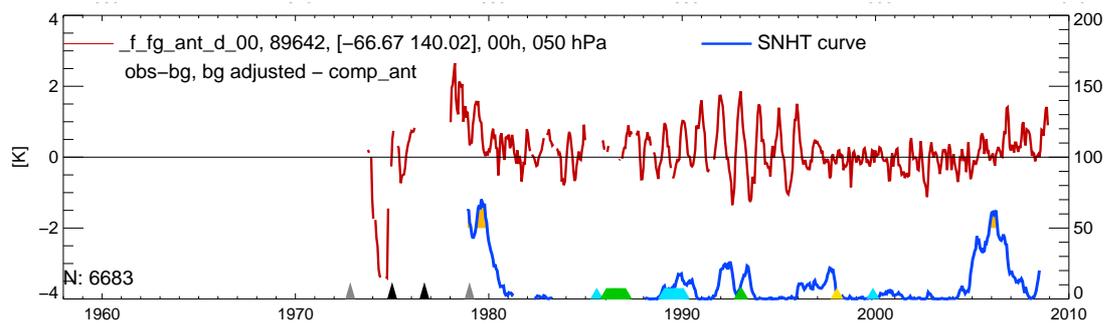


Abbildung 5.53: 00:00 UTC Zeitserie der Differenz der Innovationen der Station 89642 Dumont zu einem Mittel der antarktischen Stationen in 50 hPa.

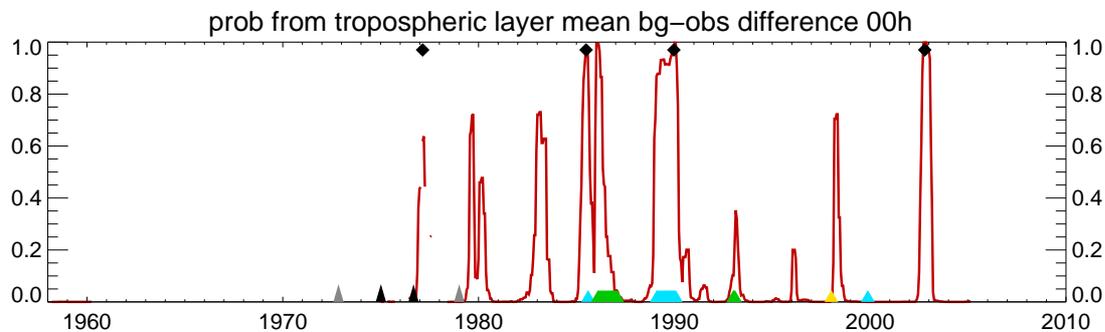


Abbildung 5.54: 00:00 UTC Zeitserie der Bruchwahrscheinlichkeit aus Experiment 4 für ein Mittel über die Troposphäre der Station 89642 Dumont.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1958-2006) | Experiment 4<br>(1958-2006) | Experiment 6<br>(1958-2008) | Experiment 9<br>(1958-2008) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | -0,06                       | -0,66                       | -0,61                       | -0,24                       |
| 50 hPa      | -0,23                       | -0,68                       | -0,56                       | -0,39                       |
| 100 hPa     | -0,71                       | -0,08                       | -0,23                       | -0,12                       |
| 200 hPa     | -0,35                       | -0,63                       | -0,59                       | -0,39                       |
| 850 hPa     | -0,06                       | -0,14                       | -0,14                       | -0,1                        |

Trends an der Station Dumont in K Dekade<sup>-1</sup>. In 50 hPa und 30 hPa gibt es erst ab 1978 Daten.

Das Differenzprofil zu COSMIC GPS Radiookkultationsdaten (Blaschek, 2009) zeigt, dass die Radiosondentemperaturen zwischen 0 und 0,5 K höher sind als die Temperaturen aus Radiookkultationsdaten. In 30 hPa steigt die Differenz auf 1 K.



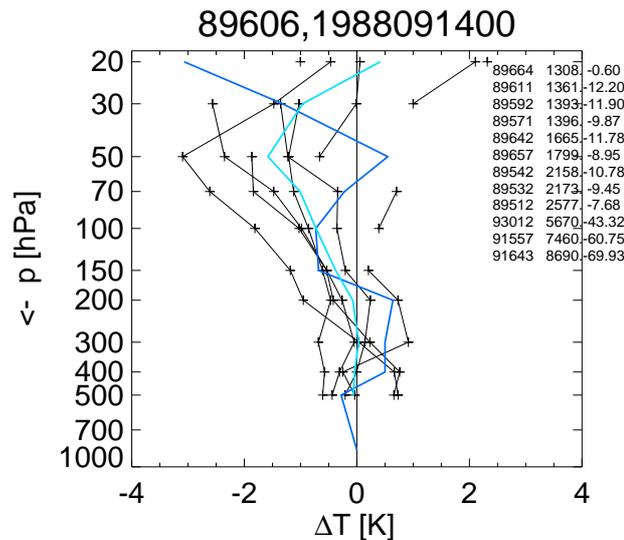


Abbildung 5.56: Profil der RAOBCORE Experiment 4 (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 14.9.1988 an der Station 89606 Vostok 2.

Innovationen mit dem Antarktismittel vergleicht, viel zu groß (Abbildungen 5.58 und 5.59). Mit den Korrekturen aus einem Mittel umliegender Stationen wie in Experiment 9 entsteht dieses Problem nicht, es wird in 30 hPa keine Korrektur gemacht, weil nicht genügend Stationen für ein Mittel in diesem Niveau verfügbar sind.

Der Vergleich der Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH ergibt ähnliches wie für den Bruch 1988. Der Anteil der antarktischen- an den verwendeten Stationen ist etwas geringer, die Korrekturen aus RAOBCORE Experiment 6 sind vertikal sehr inhomogen.

In der Teststatistik für die korrigierten Innovationszeitreihen ist in den oberen Niveaus noch ein Maximum im Jahr 1984 zu sehen, wo es keine Korrektur gibt.

Den nächsten Bruch gibt es in den Experimenten 4 und 6 am 4.5.1982. Hier beginnt eine Datenlücke und in der Zeitserie der Teststatistik für die Innovationszeitreihen in 50 hPa und 30 hPa (Abbildung 5.57 Seite 108) ist ein signifikantes Maximum zu sehen. In der Teststatistik für das Mittel über die Stratosphäre ist kein signifikantes Maximum zu sehen, in der für die Troposphäre schon. Durch die Korrektur wird das Maximum in der Teststatistik in 30 hPa größer und in 50 hPa kleiner, es bleibt aber signifikant (Abbildung 5.59 Seite 109). In Experiment 9 wird kein Bruch gefunden, da es natürlich auch in der Differenzzeitreihe zu einem Mit-

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

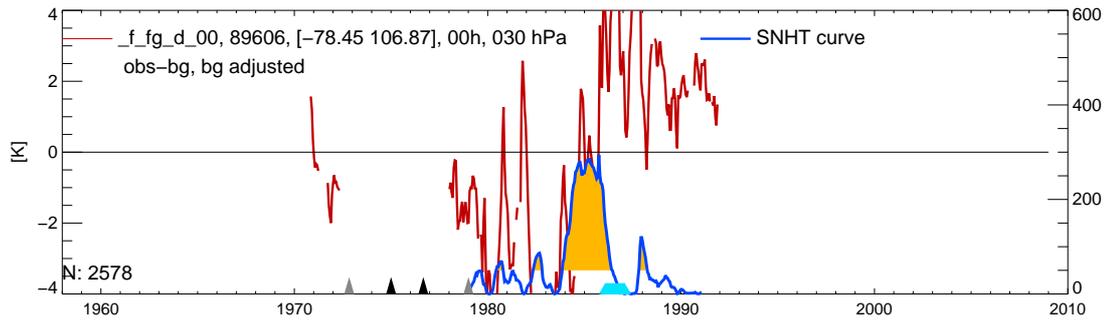


Abbildung 5.57: Wie Abbildung 5.55 für die 30 hPa Druckfläche.

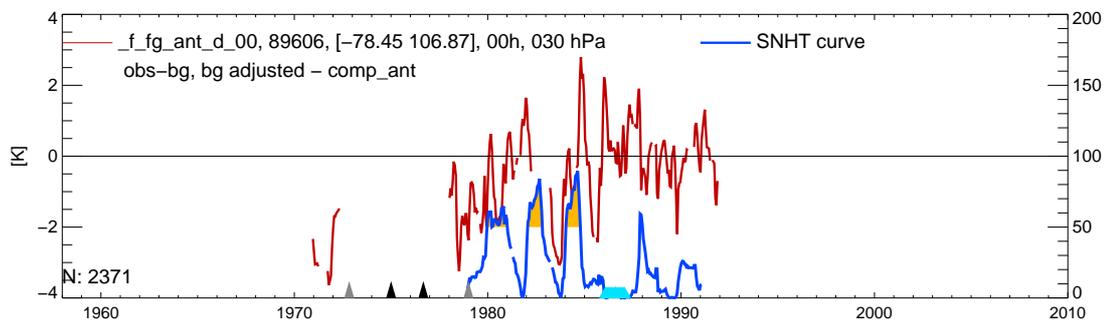


Abbildung 5.58: 00:00 UTC Zeitserie der Innovationen in 30 hPa wobei das Mittel über alle Stationen in der Antarktis abgezogen ist, an der Station 89606 Vostok 2.

tel aus umliegenden Stationen eine Datenlücke gibt. Auch hier zeigt ein Vergleich der Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH ein ähnliches Bild wie schon bei den Brüchen 1988 und 1986. Bemerkenswert ist bei der RICH Korrektur die Liste der verwendeten Stationen, in der auch zwei tropische Stationen zu finden sind (Abbildung 5.60 Seite 110).

Der nächste Bruch wird am 7.12.1979 gefunden. In der Zeitserie der Teststatistik für die 100 hPa Innovationszeitreihe (Abbildung 5.55 Seite 106) und für das Mittel über die Stratosphäre ist ein Maximum zu sehen. In der Teststatistik für das Mittel über die Troposphäre gibt es ein signifikantes Maximum mit 90, allerdings ist dieses nicht so scharf abgegrenzt wie in der Stratosphäre.

Die Korrektur scheint nicht besonders gut zu funktionieren. In 50 hPa kommt es zu einer Verschlechterung. In der Teststatistik für die ursprüngliche Innovationszeitreihe ist kein Maximum zu sehen, in der korrigierten Zeitreihe schon, dafür ist das Maximum im Jahr 1981 kleiner geworden. In der 100 hPa Zeitserie ist das Maximum in der Teststatistik kleiner geworden.

Der nächste Bruch wird am 29.10.1977 gefunden. Die Daten sind zu lückenhaft

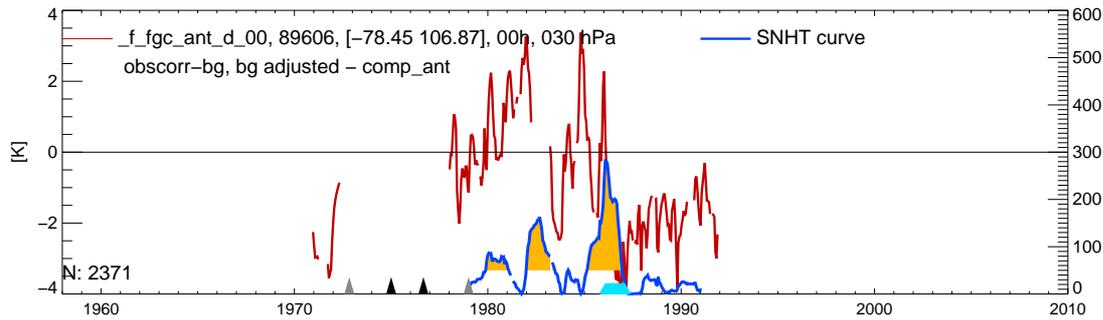


Abbildung 5.59: 00:00 UTC Zeitserie der mit Experiment 6 korrigierten Innovationen in 30 hPa, wobei das Mittel über alle Stationen in der Antarktis abgezogen ist, an der Station 89606 Vostok 2.

um in den Teststatistikzeitserien für die einzelnen Druckniveaus etwas erkennen zu können aber im Stratosphärenmittel gibt es ein signifikantes Maximum. Der letzte Bruch wird am 13.2.1961 gefunden, er liegt am Beginn einer mehrjährigen Datenlücke.

Die RICH Korrekturen unterscheiden sich stark von den RAOBCORE Korrekturen. Beim Vergleich der korrigierten Innovationszeitserien wirken die RAOBCORE Korrekturen besser, was in erster Linie daran liegen dürfte, dass die Korrekturen aus den Innovationen berechnet werden. Wenn man die Bruchprofile betrachtet, sind die RICH Profile vertikal viel homogener.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1958-1991) | Experiment 4<br>(1958-1991) | Experiment 6<br>(1958-1991) | Experiment 9<br>(1958-1991) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | 0,35                        | -1,37                       | -1,26                       | 0,58                        |
| 50 hPa      | -0,22                       | 0,00                        | -0,01                       | -0,16                       |
| 100 hPa     | -0,86                       | -0,72                       | -0,86                       | -0,6                        |
| 200 hPa     | -0,19                       | -0,96                       | -0,94                       | -0,76                       |

Trends an der Station Vostok 2 in K Dekade<sup>-1</sup>. In 50 hPa gibt es ab 1970 Daten, in 30 hPa ab 1978.

In 30 hPa gibt es bei dieser Station das Problem, dass zu vielen Zeitpunkten nicht genug umliegende Stationen genügend Daten haben um ein Mittel zu bilden, womit in Experiment 9 keine Korrekturberechnung möglich ist und diese Trends mit Vorbehalt zu betrachten sind.

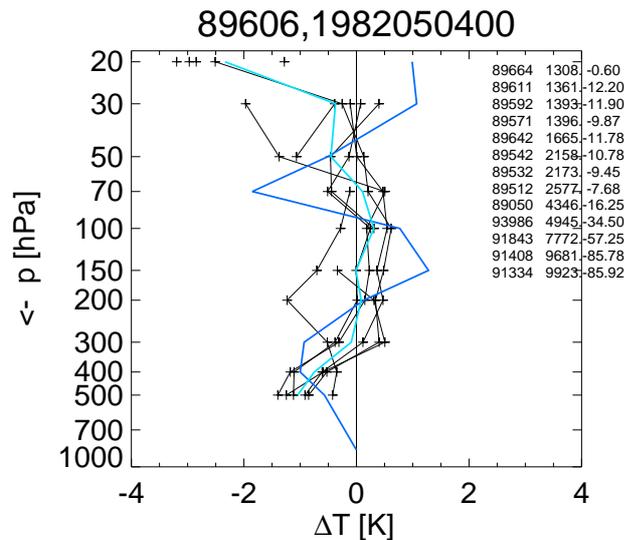


Abbildung 5.60: Profil der RAOBCORE (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 4.5.1982 an der Station 89606 Vostok 2.

## 5.15 Leningradskaya

Die russische Station Leningradskaya Nummer 89657 liegt auf  $69,6^{\circ}$  S und  $159,38^{\circ}$  O. Bei dieser Station gibt es Daten zum 00:00 UTC Beobachtungstermin von 1983 bis 1991 und wenig Daten für die 12:00 UTC Zeitserie, Brüche werden nur in der 00:00 UTC Zeitserie in Experiment 4 und 6 gefunden, in Experiment 9 werden keine Brüche korrigiert.

Im Jahr 1990 sind signifikante Maxima in den Teststatistikzeitserien für das Troposphärenmittel und 100 hPa zu sehen, dort wird allerdings kein Bruch korrigiert. Die Teststatistikzeitserie für die Differenz zwischen der Station Leningradskaya und einem Mittel aus umliegenden Stationen hat in 50 hPa und 100 hPa signifikante Maxima (Abbildung 5.61). In der Teststatistik für den Vergleich mit einem Mittel aus allen antarktischen Stationen gibt es keine signifikanten Maxima. Die Bruchwahrscheinlichkeit hat nur für die Troposphärenmittel der Innovationen und der Differenz zu einem Mittel aus umliegenden Stationen ein Maximum.

Am 28.3.1986 wird der erste Bruch gefunden. Dieser tritt im Bereich einer Datenlücke auf, Metadateneinträge sind keine verzeichnet. Der Bruch ist in den Teststatistikzeitserien für die Innovationen in 200 hPa, 50 hPa und 30 hPa sowie in der Zeitserie der Teststatistik für das Mittel über die Troposphäre zu sehen. In den Teststatistikzeitreihen für die Differenzzeitreihe zu umliegenden Stationen (Abbil-

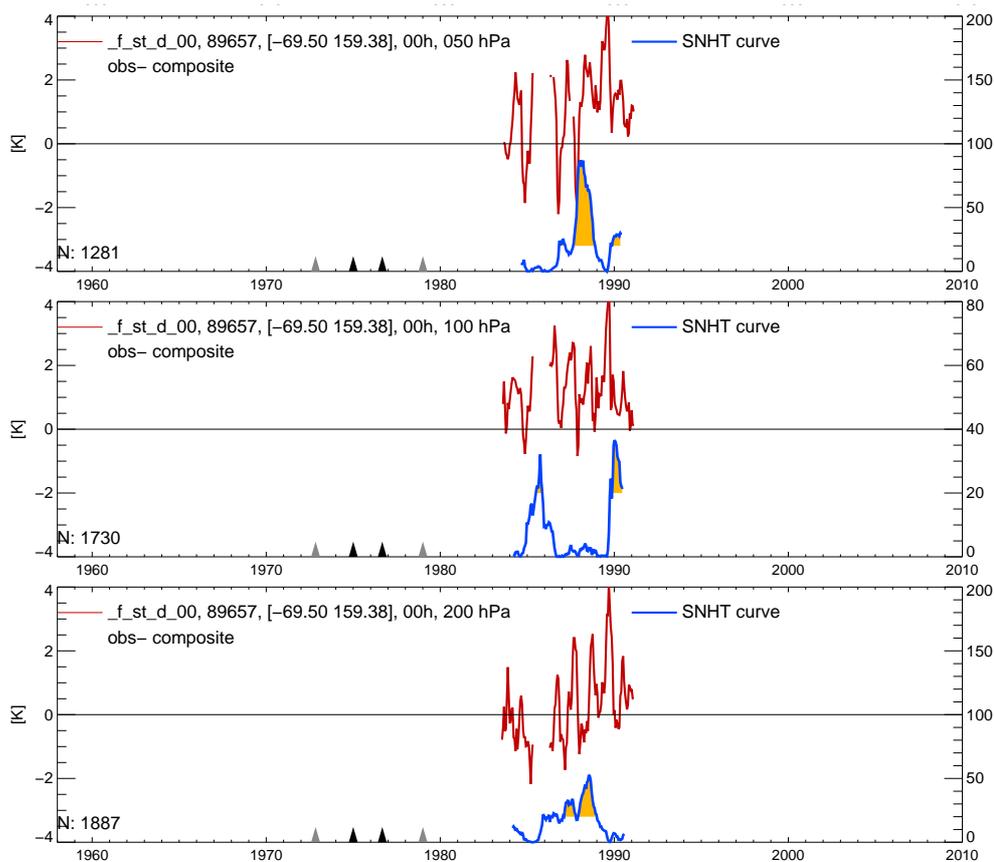


Abbildung 5.61: 00:00 UTC Differenzzeitserie der Station 89657 Leningradskaya zu einem Mittel aus umliegenden Stationen in 200 hPa, 100 hPa und 50 hPa.

Abbildung 5.61) sind keine signifikanten Maxima 1986 zu sehen, 1987 bis 1989 schon. Im Vergleich mit dem Antarktismittel ist nur in 850 hPa 1988 ein signifikantes Maximum zu sehen, die Korrektur 1986 bringt keine Verbesserung im Vergleich mit dem Antarktismittel. Die RICH Korrekturen sind kleiner als die RAOBCORE Korrekturen. Die Korrekturprofile zeigen bis 70 hPa Unterschiede von bis zu 1,5 K, oberhalb wird die Differenz größer, in 30 hPa etwa 3 K. RICH verwendet zehn Stationen, davon vier antarktische. Die RICH Korrektur für das 850 hPa Niveau hat keine positiven Effekte.

Der nächste Bruch wird am 7.5.1984 gefunden. Er ist in keiner der Teststatistikzeitserien der Innovationszeitreihen zu sehen, es wird aber trotzdem eine Korrektur vorgenommen. In der Teststatistikzeitserie für das Stratosphärenmittel ist das Maximum im Jahr 1984 zwar als nicht signifikant gekennzeichnet, in der Zeitserie der Bruchwahrscheinlichkeit wird die Wahrscheinlichkeit aber als groß genug

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

angegeben. Bei diesem Bruch sind sowohl die RAOBCORE als auch die RICH Korrekturen nicht besonders groß, haben aber in vielen Niveaus unterschiedliche Vorzeichen. RICH verwendet elf umliegende Stationen, davon sechs antarktische. Beim Vergleich mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen gibt es keine Verbesserung durch diese Korrektur.

Um seriöse Aussagen über die Trends in den Anomaliezeitreihen und deren Veränderung durch Korrekturen zu machen ist die Zeitreihe der Station Leningrads-kaya mit etwa acht Jahren zu kurz.

### 5.16 Molodezhnaya

Die russische Station Molodezhnaya Nummer 89542 liegt auf 67,67° S und 45,85° O. Am 1.12.1997 ist eine neue Bodenstation und eine fehlerhafte Strahlungskorrektur im CARDS verzeichnet, kurz darauf endet die Zeitserie. In mehreren Niveaus, besonders deutlich in 30 hPa, sind Ausreißer zu sehen.

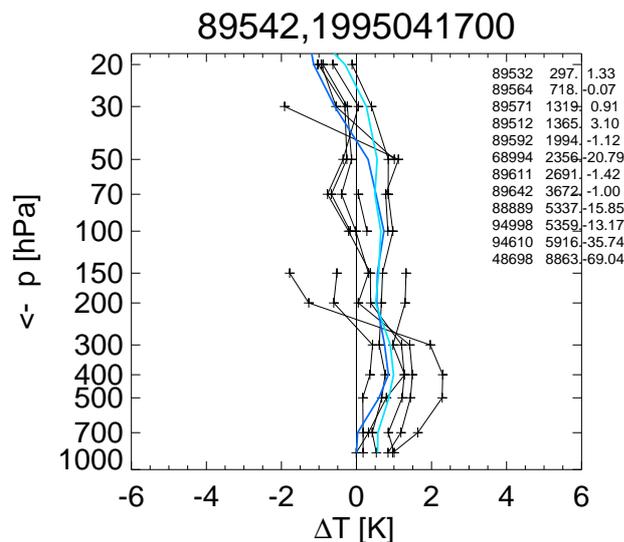


Abbildung 5.62: Profil der RAOBCORE (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 17.4.1995 an der Station 89542 Molodezhnaya.

Der erste Bruch wird am 17.4.1995 (18.4.1995 in Experiment 9) in der 00:00 UTC Zeitserie gefunden. Die 00:00 UTC Zeitserie hat hier eine Datenlücke und zum 12:00 UTC Beobachtungstermin haben seit 1992 nur mehr selten Messungen stattgefunden. In den Teststatistikzeitserien für den 00:00 UTC Beobachtungstermin

ist in den Innovationen in 100 hPa im Stratosphärenmittel und im Troposphärenmittel ein signifikantes Maximum zu sehen. Dieser Bruch wird von RAOBCORE gut korrigiert. Die Abbildung der Bruchprofile von RAOBCORE und RICH (5.62) zeigt keine sehr großen Unterschiede zwischen den beiden Korrekturverfahren. An der Liste der von RICH zur Berechnung der Korrektur verwendeten Nachbarstationen und ihren Entfernungen ist zu sehen, dass es hier immerhin zwei Stationen gibt, die weniger als 1000 km entfernt sind und noch einige andere, bei denen wenigstens die Breitendifferenz nicht zu groß ist.

Im Jahr 1989 ist im CARDS ein Radiosondenwechsel zur MARS Sonde verzeichnet, am 1.1.1989 wird ein Bruch gefunden. Dieser zeigt sich in signifikanten Maxima in der Teststatistik für die 00:00 UTC Innovationszeitserien in 850 hPa, 100 hPa und 30 hPa, für die 12:00 UTC Innovationszeitserien in 100 hPa und 30 hPa sowie in den Stratosphären- und Troposphärenmitteln für beide Beobachtungstermine. Die Korrekturen bringen Verbesserungen, aber in der 00:00 UTC Teststatistikzeitserie für die Innovationen in 100 hPa und in der 12:00 UTC Zeitserie in 850 hPa, 200 hPa, 100 hPa und 30 hPa bleiben kleinere, aber noch immer signifikante, Maxima in der Teststatistik bestehen. Die Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH für 00:00 UTC sind sehr ähnlich mit einer etwas größeren Differenz in 50 hPa. Ein Vergleich der Abbildungen der korrigierten Innovationen zeigt, dass die RAOBCORE Korrekturen in 50 hPa besser sind. RICH hat nur mehr eine Station in weniger als 1000 km Entfernung zur Verfügung, aber noch immer einige, die sich in ähnlicher Breite befinden. Die Korrekturprofile für 12:00 UTC zeigen ebenfalls die größte Differenz in 50 hPa. Ein Vergleich der korrigierten Innovationszeitreihen zeigt, dass die RAOBCORE Korrektur besser ist. In 850 hPa, wo RAOBCORE keine Korrektur macht aber RICH schon, ist die mit RICH korrigierte Variante besser.

Der nächste Bruch wird am 21.5.1987 gefunden. Maxima in der Teststatistik für die Innovationszeitreihen gibt es in der 00:00 UTC Zeitserie in 850 hPa, 200 hPa, im Stratosphären- und im Troposphärenmittel und in der 12:00 UTC Zeitserie in 100 hPa und im Stratosphärenmittel. Die RAOBCORE und RICH Korrekturprofile für 00:00 UTC sind wieder ähnlich, wobei die größten Differenzen in 200 hPa und in 30 hPa zu finden sind. In 200 hPa ist die RAOBCORE Korrektur deutlich besser, in 30 hPa sind sie ähnlich gut und in 850 hPa bringt die RICH Korrektur eine Verbesserung, während RAOBCORE keine Korrektur macht. Die Korrekturprofile für 12:00 UTC unterscheiden sich in erster Linie in den oberen Schichten.

Der nächste Bruch wird am 3.3.1985 gefunden. Es gibt ein signifikantes Maximum in den Teststatistikzeitserien für die Innovationen in 100 hPa, 50 hPa und 30 hPa in den 00:00 UTC Zeitserien und in 30 hPa und 50 hPa in der 12:00 UTC Zeitserie sowie in den Zeitreihen der Maxima der Teststatistiken für die Mittel über benachbarte Hauptdruckflächen in der Stratosphäre und Troposphäre zu beiden

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

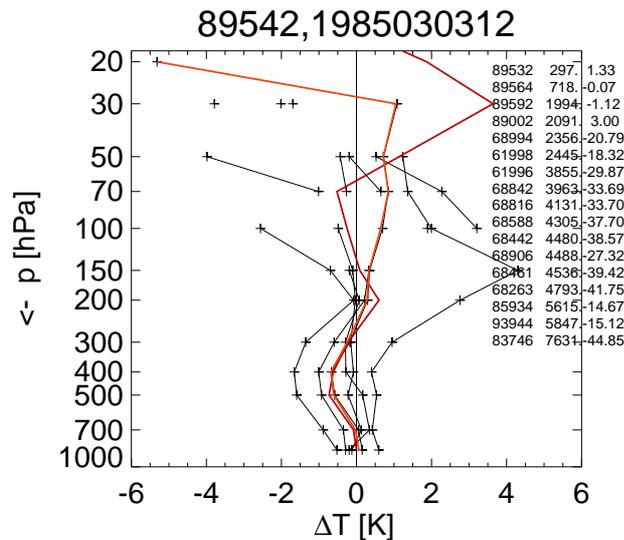


Abbildung 5.63: Profil der RAOBCORE (dunkelrot) und RICH (hellrot) Korrekturen der 12:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 3.3.1985 an der Station 89542 Molodezhnaya.

Beobachtungsterminen. In 100 hPa in der 00:00 UTC Zeitserie bleiben auch in der korrigierten Zeitreihe signifikante Maxima, in den oberen Schichten ist die Korrektur sehr gut. Der Vergleich der RAOBCORE und RICH Korrekturprofile zeigt für 00:00 UTC ähnliche Profile mit Ausnahme des 30 hPa Niveaus, die RAOBCORE Korrektur ist besser. Für die 12:00 UTC Zeitreihe gibt es oberhalb von 100 hPa nur mehr wenig Vergleichsstationen, vor allem keine, deren Daten für das ganze Profil verwendet werden. Dementsprechend unterscheiden sich die Korrekturen in den oberen Schichten stark von den RAOBCORE Korrekturen und bringen nicht so gute Ergebnisse (Abbildung 5.63).

Der nächste Bruch wird am 21.3.1983 (in Experiment 9 am 21.1.1983) gefunden. Signifikante Maxima in der Teststatistik gibt es für die 00:00 UTC Zeitserie in 100 hPa und im Troposphärenmittel, für die 12:00 UTC Zeitreihe in 100 hPa und 50 hPa und ebenfalls im Troposphärenmittel. Die Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH sind sehr ähnlich und vor allem für 00:00 UTC liegen auch die Differenzprofile zu umliegenden Stationen nahe beieinander.

Der nächste Bruch wird am 6.2.1974 gefunden. Signifikante Maxima in der Teststatistik sind für 12:00 UTC Innovationszeitreihe in 50 hPa und für 00:00 UTC im Troposphärenmittel zu sehen. Die 00:00 UTC Korrekturprofile unterscheiden sich vor allem in den unteren Schichten stark. Die 12:00 UTC Profile unterscheiden sich

stark in den oberen Schichten, wo wieder das Problem der nicht mehr vorhandenen umliegenden Stationen sichtbar wird.

Der letzte Bruch wird in Experiment 4 am 1.11.1971 sowohl in der 00:00 UTC als auch in der 12:00 UTC Zeitserie gefunden, in den Experimenten 6 und 9 gibt es diesen Bruch nicht mehr. Signifikante Maxima in der Teststatistik gibt es in der 00:00 UTC Innovationszeitserie in 50 hPa und im Troposphärenmittel. Bei diesem Bruch gibt es für 00:00 UTC große Unterschiede zwischen den Bruchprofilen von RAOBCORE und RICH, für 12:00 UTC sind die Unterschiede bedeutend kleiner, obwohl die nächste Station mit 1994 km wesentlich weiter entfernt ist als für das 00:00 UTC Profil mit 297 km.

Der Vergleich mit MSU Satellitendaten (Abbildung 5.64) zeigt, dass die RAOBCORE Daten gut mit den Satellitendaten übereinstimmen. Während zwei kurzer

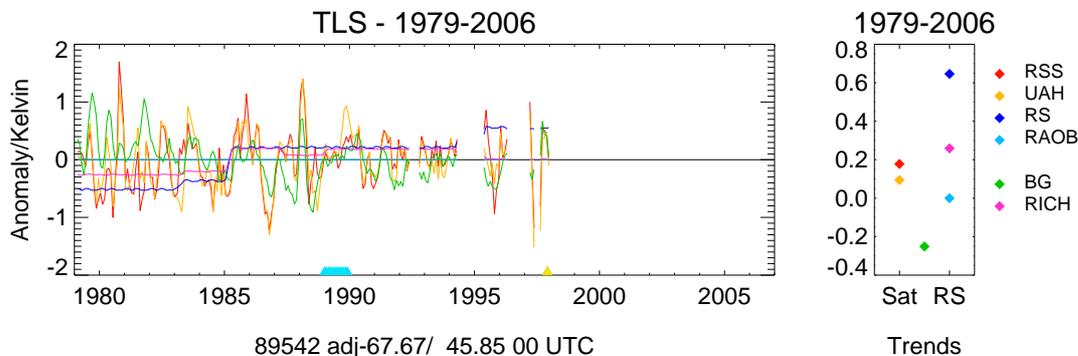


Abbildung 5.64: Links: 00:00 UTC Anomaliedifferenzen zwischen mit RAOBCORE korrigierten Radiosondendaten und RSS (rot), UAH (gelb), Backgroundvorhersage (grün), unkorrigierte Radiosondendaten (dunkelblau) und mit RICH korrigierten Radiosondendaten (pink) an der Station 89542 Molodezhnaya in der TLS Schicht. Rechts: Trenddifferenzen (1979-2006) zwischen den Datensätzen.

Perioden im Jahr 1985 und im Jahr 1990 sind die RICH Korrekturen und die originalen Radiosondendaten näher an den Satellitendaten. Vor 1985 weicht die Backgroundvorhersage etwas stärker von den Satellitendaten ab. Die RAOBCORE Daten sind näher an der Backgroundvorhersage und die RICH Daten näher an den Satellitendaten.

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1971-1996) | Experiment 4<br>(1971-1996) | Experiment 6<br>(1971-1996) | Experiment 9<br>(1971-1996) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | 0,26                        | -1,02                       | -0,83                       | -0,49                       |
| 50 hPa      | -0,33                       | -0,28                       | -0,46                       | -0,68                       |

## 5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

|         |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 100 hPa | -1,13 | -0,81 | -1,2  | -1,43 |
| 200 hPa | -0,45 | -1,25 | -1,19 | -0,69 |
| 850 hPa | -0,05 | 0,18  | 0,18  | -0,05 |

Trends an der Station Molodezhnaya in K Dekade<sup>-1</sup>.

### 5.17 S.A.N.A.E. Station

Die südafrikanische S.A.N.A.E. (South African National Antarctic Expeditions) Station Nummer 89001 liegt auf 70,30° S und 2,35° W. Der erste Bruch wird in Experiment 4 und 6 am 20.8.1988 gefunden, in Experiment 9 am 29.10.1988. Maxima sind in der Teststatistik für die 100 hPa und 200 hPa Innovationszeitserien sowie in den Zeitreihen der Maxima der Teststatistiken für die Mittel über die Innovationen benachbarter Hauptdruckflächen in der Stratosphäre und Troposphäre zu sehen. In der 12:00 UTC Zeitserie gibt es in 30 hPa etwas später ein Maximum. Die 00:00 UTC Profile der RICH und RAOBCORE Korrekturen unterscheiden sich stark. Für die RICH Korrektur werden hauptsächlich antarktische Stationen verwendet (fünf von sechs), was für die RICH Korrektur spricht, die korrigierten Innovationszeitreihen sehen mit RAOBCORE besser aus, da die Innovationen zur Korrektur verwendet werden. Die 12:00 UTC Profile unterscheiden sich zumindest unterhalb des 100 hPa Niveaus nicht ganz so stark, wobei die Unterschiede im Ergebnis trotzdem groß sind. Die RICH Profile sind vertikal homogener als die RAOBCORE Profile.

Im Jänner 1986 gibt es einen Wechsel zur VAISALA RS80 Sonde. Dazu passend wird ein Bruch am 13.1.1986 gefunden. In den Zeitreihen der Teststatistik für die 00:00 UTC Innovationszeitreihen (Abbildung 5.65) sind Maxima vor und nach diesem Termin zu sehen aber nicht genau zu dieser Zeit. In der 12:00 UTC Zeitserie sind sehr wohl signifikante Maxima zu diesem Zeitpunkt vorhanden, sowie in der 12:00 UTC Zeitserie der Maxima der Teststatistiken für die Mittel benachbarter Hauptdruckflächen in der Troposphäre. Auch hier unterscheiden sich die Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH stark. Bei der 00:00 UTC Korrektur (Abbildung 5.66) folgt die RICH Korrektur stark dem Differenzprofil zu einer Station, wahrscheinlich der nächst gelegenen (Novolazarevskaya). Die RAOBCORE Korrekturprofile sind vertikal inhomogener, folgen aber einer Mehrheit der von RICH verwendeten umliegenden Stationen, die großteils in der Antarktis liegen (acht von elf). Beim Bruchprofil für 12:00 UTC ist zu sehen, dass es für die obersten Niveaus keine Korrekturen mehr gibt. In den untersten Niveaus sind die Korrekturen klein und sehr ähnlich. Nur fünf von dreizehn für die RICH Korrektur verwendeten Stationen sind antarktische Stationen. Die Differenzprofile zu den

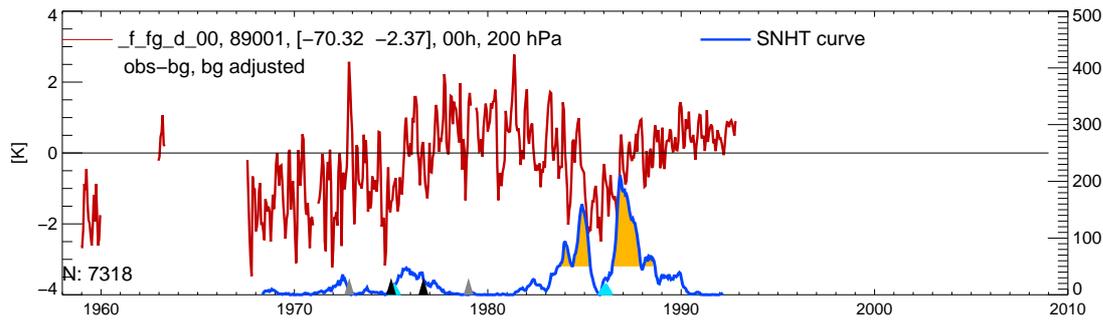


Abbildung 5.65: 00:00 UTC Zeitserie der Innovationen mit globaler Background-korrektur für ERA-40 in 200 hPa an der Station 89001 S.A.N.A.E..

verschiedenen umliegenden Stationen streuen stark und die RICH Korrektur ist nicht mehr ganz so vertrauenswürdig. In 100 hPa ist beim Vergleich der korrigierten Innovationszeitserien der größte Unterschied zu sehen, wobei die RAOBCORE Korrektur besser ist.

Der nächste Bruch wird am 16.7.1979 gefunden. Ein signifikantes Maximum ist in der Teststatistik für die 00:00 UTC Innovationszeitserie in 100 hPa zu sehen, auch wenn das Mittel über alle antarktischen Stationen abgezogen wird (Abbildung 5.67). In den höheren Schichten sind die Daten lückenhaft und daher keine Teststatistik zu sehen, die 12:00 UTC Zeitserie hat gar keine Daten. Die Korrekturprofile von RAOBCORE und RICH sind extrem unterschiedlich (Abbildung 5.68). Die RAOBCORE Korrektur liegt größtenteils außerhalb aller Differenzprofile zu umliegenden Stationen. Sieben von acht der verwendeten RICH Stationen liegen in der Antarktis. Die RICH Korrektur ist bei diesem Bruch vertrauenswürdiger, die RAOBCORE Korrektur ist möglicherweise von der großen Änderung im Beobachtungssystem der Reanalysen 1979 beeinflusst.

Anfang des Jahres 1975 gibt es einen Radiosondenwechsel von VAISALA RS13 zu VAISALA RS21. Es wird kein Bruch gefunden, aber ein signifikantes Maximum im Stratosphärenmittel für die 00:00 UTC Zeitserie, das auch in der Teststatistik für die Differenz zwischen der Station S.A.N.A.E. und einem Mittel aus umliegenden Stationen zu sehen ist und zu einer Bruchwahrscheinlichkeit von 0,85 für das Stratosphärenmittel und 0,75 für das Stratosphärenmittel der Differenz zwischen der Station S.A.N.A.E. und einem Mittel aus umliegenden Stationen führt.

Am 3.8.1968 wird ein Bruch in der 12:00 UTC Zeitserie gefunden. Hier beginnt in der 12:00 UTC Zeitserie eine mehrjährige Datenlücke, während es ab dieser Zeit zum 00:00 UTC Termin regelmäßige Messungen gibt. Der letzte Bruch wird am 13.12.1960 in der 00:00 UTC Zeitserie am Beginn einer Datenlücke gefunden.

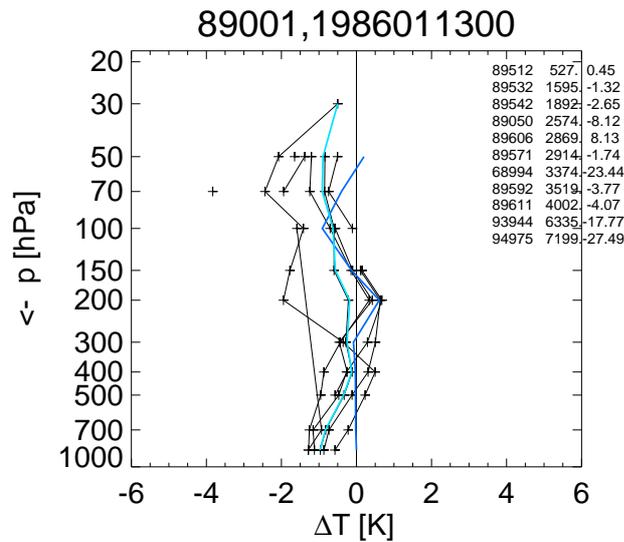


Abbildung 5.66: Profil der RAOBCORE (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 13.1.1986 an der Station 89001 S.A.N.A.E..

| Druckniveau | unkorrigiert<br>(1958-1992) | Experiment 4<br>(1958-1992) | Experiment 6<br>(1958-1992) | Experiment 9<br>(1958-1992) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 30 hPa      | 1,09                        | 0,81                        | 0,8                         | 1,07                        |
| 50 hPa      | 0,01                        | 0,03                        | 0,22                        | -0,1                        |
| 100 hPa     | -0,52                       | 0,27                        | 0,16                        | -0,52                       |
| 200 hPa     | -0,17                       | -0,31                       | -0,3                        | -0,16                       |
| 850 hPa     | 0,32                        | 0,32                        | 0,32                        | 0,32                        |

Trends an der S.A.N.A.E. Station in  $K \text{ Dekade}^{-1}$ . In 50 hPa gibt es seit 1968 Daten, in 30 hPa seit 1971.

## 5.18 Islas Orcadas

Die argentinische Station Islas Orcadas Nummer 88968 liegt auf  $60,75^\circ \text{ S}$  und  $44,72^\circ \text{ W}$ . Diese Station hat schon sehr früh und sehr viele Metadateneinträge im CARDS. Im Jahr 1984 ist ein Wechsel zur VAISALA RS80 Sonde in den Metadaten verzeichnet, es enden die regelmäßigen Messungen.

Der erste Bruch wird in Experiment 4 und 6 am 6.8.1982 gefunden. Es ist eine kleine Datenlücke zu erkennen und signifikante Maxima in der Teststatistik für

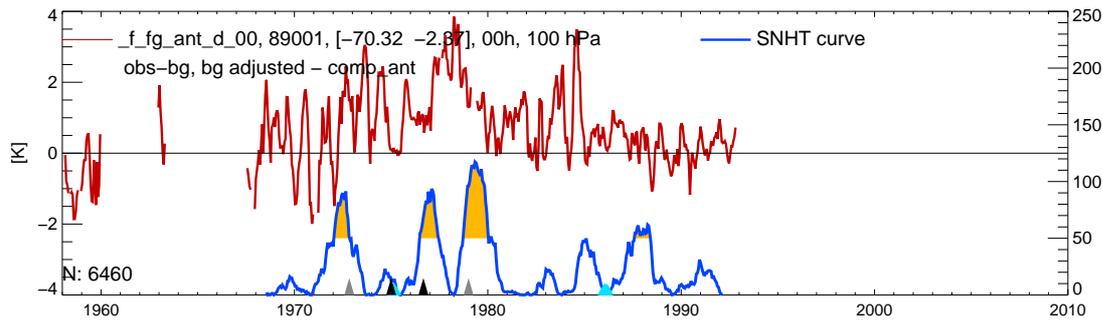


Abbildung 5.67: 00:00 UTC Differenzzeitserie der Innovationen zum Mittel der Innovationen der antarktischen Stationen in 100 hPa an der Station 89001 S.A.N.A.E..

die Innovationen in 200 hPa und 50 hPa (Abbildung 5.69 Seite 121) sowie für das Mittel über die Troposphäre. Dieser Bruch wird gut korrigiert, wie Abbildung 5.70 (Seite 121) zeigt. In Experiment 9 wird er nicht mehr gefunden, es kann für den benötigten Zeitraum kein Mittel aus umliegenden Stationen berechnet werden. Eine Korrektur wäre hier nicht schlecht, aber in Experiment 9 geht das nicht ohne genügend Nachbarstationen.

Am 19.3.1980 wird ein Bruch in Experiment 4 und 6 gefunden. In der Zeitreihe der Teststatistik für die Innovationen ist in 200 hPa ein signifikantes Maximum zu sehen (Abbildung 5.69), ebenso in der Teststatistik für das Troposphärenmittel. Abbildung 5.70 zeigt die korrigierte Innovationszeitreihe mit Teststatistik. Diese vermittelt den Eindruck, dass die Korrektur eher zu einer Verschlechterung als zu einer Verbesserung führt, auch bei diesem Bruch gibt es in Experiment 9 keine Korrektur.

Der nächste Bruch wird am 26.9.1975 am Beginn einer etwa zweijährigen Datenlücke gefunden, während der im Jahr 1976 ein Radiosondenwechsel zur VAISALA RS21 dokumentiert ist. Es werden große Korrekturen gemacht, die aber zu mehr Inhomogenität führen. In Experiment 9 gibt es den Bruch am 26.9.1975 nur in der 00:00 UTC Zeitreihe, in der 12:00 UTC Zeitreihe ist er schon am 30.4.1975. Die Korrekturen aus Experiment 9 sind viel kleiner als die aus den Experimenten 4 und 6. Im Jahr 1972 ist ein Radiosondenwechsel zur VAISALA RS18 dokumentiert, seit dieser Zeit gibt es regelmäßig Messungen an dieser Station.

Im Jahr 1971 ist ein Radiosondenwechsel zu VAISALA RS15 dokumentiert. In diesem Jahr wird am 18.10. der letzte Bruch in Experiment 4 und 6 gefunden. Es gibt zu dieser Zeit kaum Messungen und deshalb auch keine Korrektur in Experiment 9. Die frühesten Metadateneinträge sind im Jahr 1964 ein Wechsel zur VAISALA RS13 Sonde und am 1.7.1957 der Beginn der Messungen mit der VAISALA RS11 Sonde.

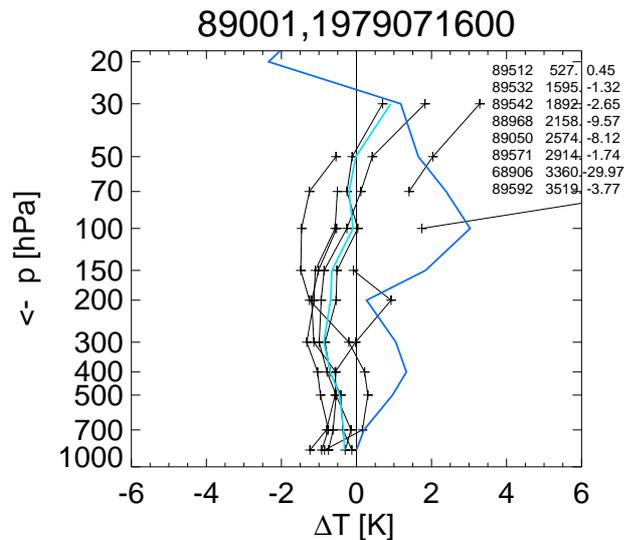


Abbildung 5.68: Profile der RAOBCORE (dunkelblau) und RICH (hellblau) Korrekturen der 00:00 UTC Zeitserie und Differenzprofile zu den von RICH verwendeten umliegenden Stationen für den Bruch am 16.7.1979 an der Station 89001 S.A.N.A.E..

Durch die Korrekturen werden die positiven Trends in der Stratosphäre in Experiment 4 geschwächt und in Experiment 9 verstärkt, wobei das nicht sehr aussagekräftig ist, da es nur für knapp zwanzig Jahre Daten gibt und selbst in diesem Zeitraum große Datenlücken sind.

## 5.19 Argentine Island

Die britische Station Argentine Island Nummer 88952 liegt auf 65, 25° S und 64, 27° W. Diese Station hat nur zum 12:00 UTC Termin Messungen, die schon sehr früh regelmäßig vorhanden sind. In Experiment 9 werden keine Korrekturen gemacht, weil es nicht möglich ist ein Mittel aus umliegenden Stationen zu bilden.

Im Jahr 1979 sind in 100 hPa, 50 hPa, 30 hPa und im Troposphärenmittel signifikante Maxima in der Teststatistik zu sehen (Abbildung 5.71), es wird keine Korrektur gemacht. Es gibt auch hohe Werte für die Bruchwahrscheinlichkeit, aber zu wenig Daten von umliegenden Stationen um eine Teststatistik für die Differenz zwischen der Station Argentine Island und umliegenden Stationen zu berechnen. Das ist ein möglicher Grund dafür, dass keine Korrektur gemacht wird, ein anderer ist, dass es zu diesem Zeitpunkt auch große Änderungen in den Satellitendaten gibt.

Im Jahr 1976 ist ein Wechsel zur VAISALA RS21 Sonde in den Metadaten

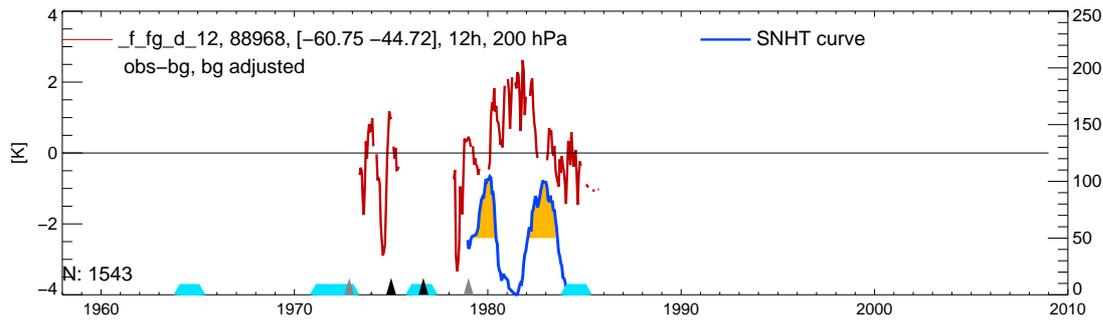


Abbildung 5.69: 12:00 UTC Innovationszeitserie mit korrigiertem Background für ERA-40 in 200 hPa für die Station 88968 Islas Orcadas.

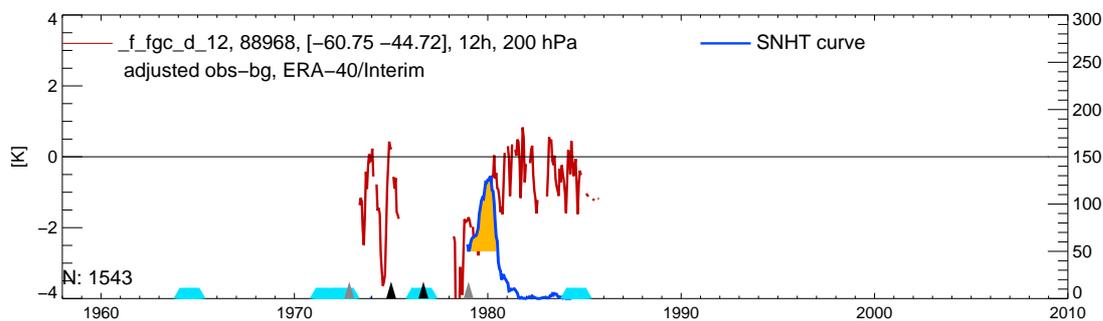


Abbildung 5.70: 12:00 UTC Zeitserie der mit RAOBCORE korrigierten Innovationen in 200 hPa für die Station 88968 Islas Orcadas.

verzeichnet und am 3.11.1976 wird ein Bruch gefunden. Es ist ein Maximum in der Teststatistik für die Innovationszeitreihe in 100 hPa (Abbildung 5.71), sowie für das Mittel über die Troposphäre zu sehen. Das Maximum in der Teststatistik für das Stratosphärenmittel ist nicht signifikant.

Der nächste Bruch wird am 8.7.1974 gefunden. Es sind Maxima in der Teststatistik der Innovationszeitreihen für 100 hPa und 50 hPa (Abbildung 5.71), sowie für das Stratosphären- und das Troposphärenmittel zu sehen, wobei die Maxima in den einzelnen Niveaus nicht besonders hoch sind, in den Schichtmitteln schon.

Im Jahr 1972 gibt es einen Wechsel zur VAISALA RS18 Sonde. Der letzte Bruch wird am 30.3.1972 passend zu letztgenanntem Wechsel gefunden. Es sind keine signifikanten Maxima in der Teststatistik für die Innovationszeitreihen für verschiedene Druckniveaus zu sehen aber im Troposphärenmittel und in den Teststatistiken für die Differenzzeitreihen zu einem Mittel der umliegenden Stationen gibt es signifikante Maxima.

5 Analyse der Zeitserien in der Antarktis

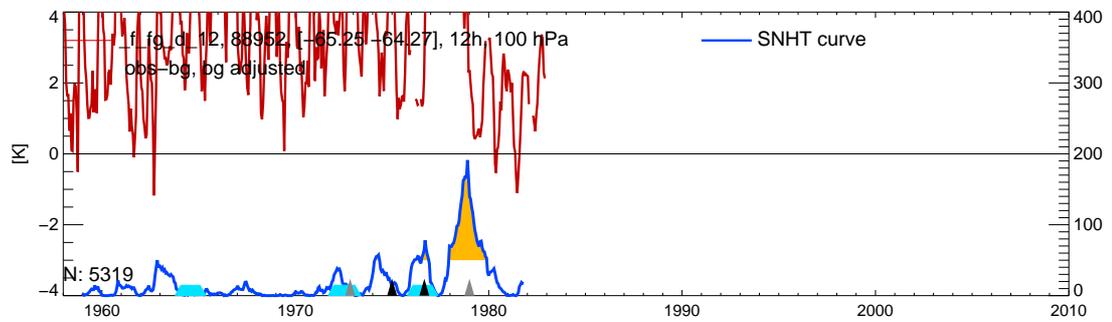


Abbildung 5.71: 12:00 UTC Zeitserie der Innovationen in 100 hPa für die Station 88952 Argentine Island.

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

In dieser Arbeit wurden die antarktischen Radiosondenstationen und ihre Brüche umfassend analysiert und mit unabhängigen Datensätzen wie MSU und GPS Radiookkultationsdaten verglichen. Statt ERA-40 Innovationen werden in RAOBCORE ab 1989 ERA-Interim Innovationen verwendet, was bereits wesentliche Verbesserungen für die Homogenisierung von antarktischen Radiosondendaten bringt, da ERA-Interim in diesem Bereich deutlich homogener ist (Experiment 6). Eine wichtige Verbesserung konnte durch die Änderung des Bruchkorrekturverfahrens in RAOBCORE für antarktische Stationen erzielt werden. Die Bruchgrößen werden für antarktische Stationen statt aus Innovationen aus einem Mittel aus mindestens fünf umliegenden antarktischen Stationen berechnet (Experiment 9). Durch diese Änderungen konnten Verbesserungen der Konsistenz der Trends an den einzelnen Stationen erreicht werden, wobei sich die räumlich gemittelten Trends kaum ändern.

In Abbildung 6.1 sind die 00:00 UTC Trends der unkorrigierten und in Abbildung 6.2 die mit Experiment 9 und Experiment 6 korrigierten Zeitreihen von 1979-2008 in 100 hPa für alle Stationen zu sehen, bei denen im Zeitraum 1979-2008 nicht mehr als drei Jahre Daten fehlen. Durch die Korrekturen aus Experiment 9 werden die Trends benachbarter Stationen ähnlicher, das heißt, die räumliche Homogenität der Trends nimmt zu. Bei Experiment 6 wird die räumliche Homogenität der Trends verglichen mit den unkorrigierten Daten nicht größer.

In Abbildung 6.3 werden die 00:00 UTC Trends in 100 hPa für RICH Daten aus Experiment 6, die auch schon in Kapitel 5 verwendet worden sind, mit RICH Daten aus Experiment 9 verglichen. Eigentlich wäre zu erwarten, dass RAOBCORE und RICH in Experiment 9 ähnlicher sind als in Experiment 6, da die Korrekturen jeweils aus einem Mittel umliegender Stationen berechnet werden. Dies ist, zumindest der vorliegenden Abbildungen nach zu urteilen, nicht der Fall. In Experiment 6 sind die RICH Trends räumlich homogener als die RAOBCORE Trends, in Experiment 9 ist es umgekehrt. Die Trends aus RICH Experiment 9 sind auch räumlich inhomogener als die unkorrigierten Daten. Besonders groß sind die Unterschiede bei den Trends der Station 89571 Davis.

Für die Vertikalprofile der Temperaturtrends (1979-2006) südlich von 60° S (Ab-

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

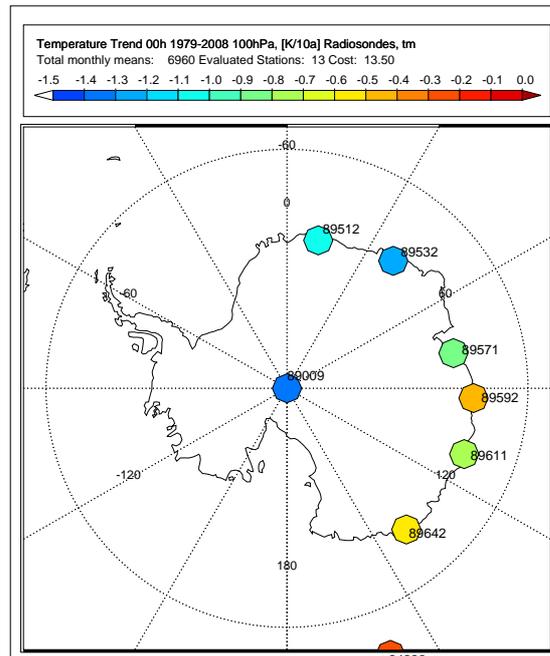


Abbildung 6.1: 00:00 UTC Trends in 100 hPa (1979-2008) der unkorrigierten Daten für alle Stationen bei denen in diesem Zeitraum in der 00:00 UTC Zeitreihe nicht mehr als drei Jahre Daten fehlen. 89592 Mirnyy, 89512 Novolazarevskaya, 89532 Syowa, 89009 Amundsen/Scott, 89571 Davis, 89611 Wilkes/Casey, 89642 Dumont.

bildung 6.4) werden die Trends aller Stationen, bei denen 1979-2006 nicht mehr als drei Jahre Daten fehlen, auf den einzelnen Druckniveaus gemittelt. Die Standardabweichung beinhaltet sowohl die Variabilität der Trends im betrachteten Gebiet, als auch die Fehler der Trends. Die Trendprofile zeigen für die unkorrigierten Daten in der oberen Troposphäre keine Trends, mit den korrigierten Daten, mit Ausnahme von RICH Experiment 9, positive Trends, die in 400 hPa am stärksten sind mit etwa  $0,15 \text{ K Dekade}^{-1}$ , bei RICH Experiment 6 etwas weniger. In der unteren Stratosphäre sind starke negative Trends zu sehen, die mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Die stärksten negativen Trends sind für die unkorrigierten und die mit RAOBCORE Experiment 6 und 9 korrigierten Daten in 100 hPa, für die mit RAOBCORE Experiment 4 korrigierten in 200 hPa zu sehen. Die Trendprofile der verschiedenen RAOBCORE Versionen sind recht ähnlich, vor allem wenn man bedenkt, dass die Streuung sehr groß ist.

Das Trendprofil von RICH Experiment 6 ist sehr ähnlich dem der unkorrigierten Daten, nur dass es in der oberen Troposphäre einen schwachen positiven Trend

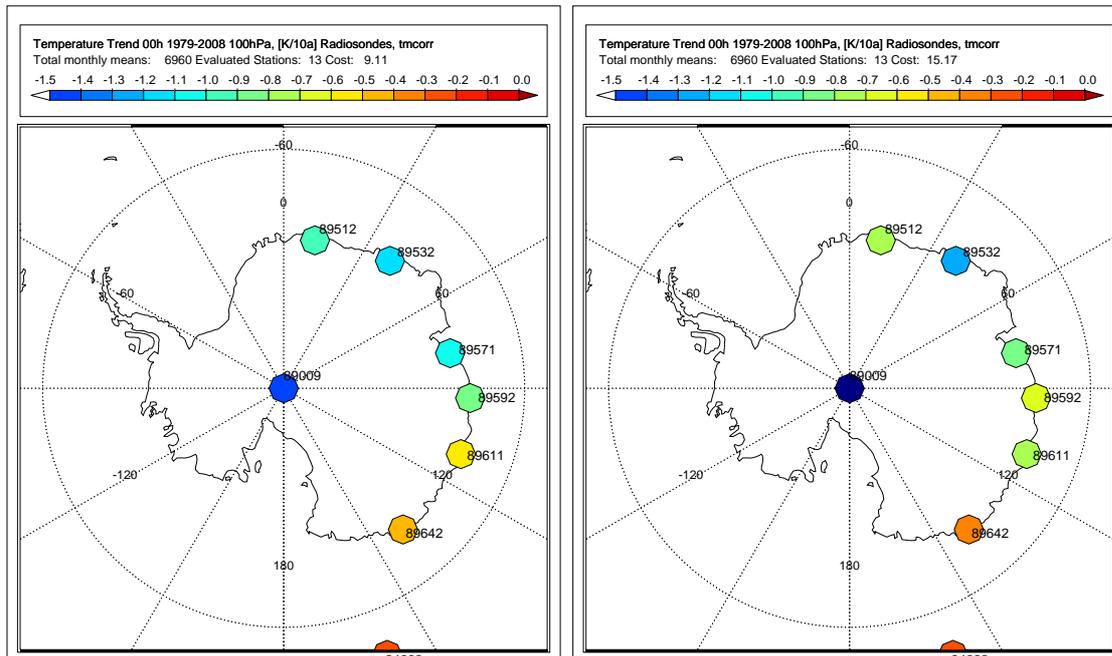


Abbildung 6.2: Links mit RAOBCORE Experiment 9, rechts mit Experiment 6 korrigierte 00:00 UTC Trends in 100 hPa (1979-2008).

gibt, der in den unkorrigierten Daten nicht zu sehen ist. Das Trendprofil aus RICH Experiment 9 hat einen ganz anderen Verlauf als die Profile aus den anderen Experimenten. Die Trends sind auch in der Troposphäre negativ, etwa  $-0,15 \text{ K Dekade}^{-1}$ , und der stärkste negative Trend ist in 50 hPa mit  $-0,9 \text{ K Dekade}^{-1}$  zu sehen. Der Verlauf erscheint untypisch und wenig glaubwürdig.

Randel et al. (2009) finden in älteren RICH Daten (ohne ERA-Interim) unterhalb von 300 hPa keinen Trend (1979-2007) und in der Stratosphäre negative Trends mit einem Maximum in 70 hPa bei etwa  $-0,7 \text{ K Dekade}^{-1}$ . Zwischen 150 hPa und 250 hPa sind die Trends in RAOBCORE Experiment 9 etwas stärker negativ als in Randel et al. (2009) und in den unkorrigierten Daten.

Durch die Korrekturen werden bei der Station Amundsen/Scott die negativen Temperaturtrends in der Stratosphäre verstärkt, wobei die Unterschiede zwischen den Experimenten 4 und 9 klein sind, gleichzeitig werden die Trends vertikal homogener, was als positives Zeichen gewertet werden kann. Die Innovationszeitreihen passen nach den Korrekturen aus Experiment 9 besser zum Antarktismittel als mit den Korrekturen aus Experiment 6.

Für die Station Syowa wird in Experiment 9 eine Korrektur zu einem Bruch im Jahr 1987 berechnet, für den es in früheren Experimenten keine Korrektur gibt.

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

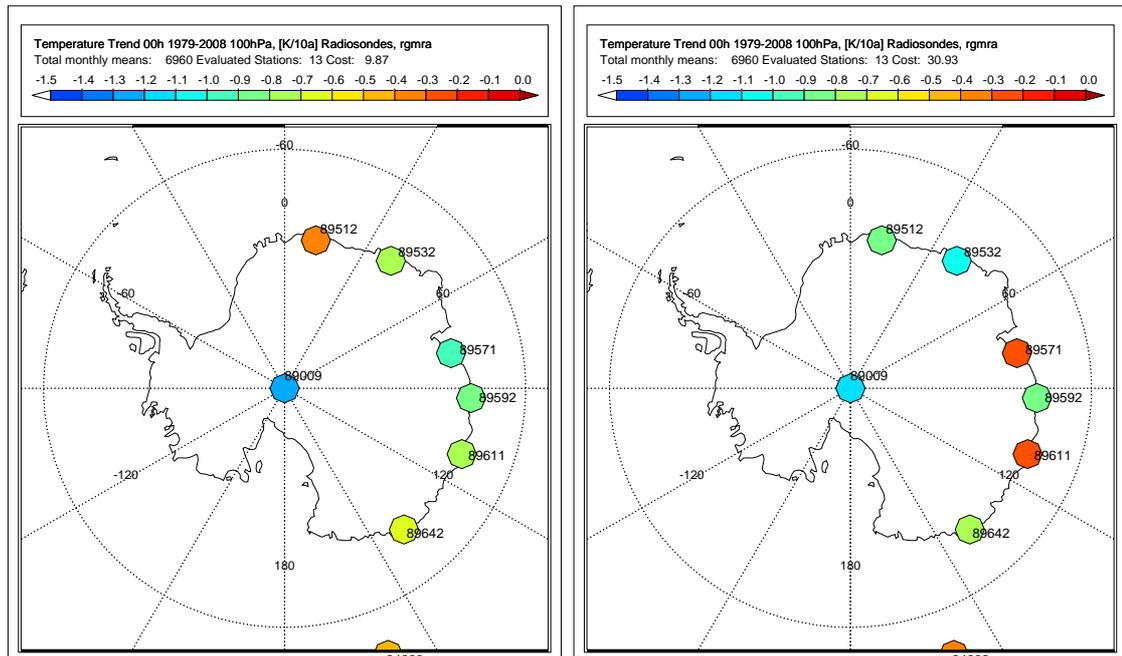


Abbildung 6.3: Links mit RICH Experiment 6, rechts mit RICH Experiment 9 korrigierte 00:00 UTC Trends in 100 hPa (1979-2008).

Das stellt eine Verbesserung dar, da Maxima in der Teststatistikzeitserie zu sehen sind und ein Radiosondenwechsel im CARDS dokumentiert ist. Die Korrektur 1985 gibt es nicht mehr, was plausibel wirkt, da es zu dieser Zeit eine große Inhomogenität in der Backgroundvorhersage durch den Start von NOAA 9 gibt. Die Trends werden mit den Korrekturen weniger stark negativ, wobei die Korrekturen aus Experiment 9 wesentlich stärkere Auswirkungen auf die Trends haben. So ist der Trend in 30 hPa von  $-0,62 \text{ K Dekade}^{-1}$  (1958-2008) nach der Korrektur aus Experiment 9 nicht mehr signifikant. Diese Version passt jedoch besser zu den umliegenden Stationen, die ebenfalls keinen oder fast keinen Trend in 30 hPa haben.

Bei der Station Mawson werden die negativen Trends in der Stratosphäre durch die Homogenisierung verstärkt. In Experiment 9 in den obersten Schichten stärker als in Experiment 4 und darunter weniger stark. Die Korrekturen aus Experiment 9 sind besser als die aus Experiment 6, wenn man mit dem Mittel über alle antarktischen Stationen vergleicht.

Bei der Station Davis wird in Experiment 9 im Jahr 1989 eine Korrektur für einen Bruch gemacht, der im Vergleich mit den MSU Daten zu sehen ist. Es gibt 1989 einen Radiosondenwechsel, in den früheren Experimenten war der Bruch jedoch nicht signifikant.

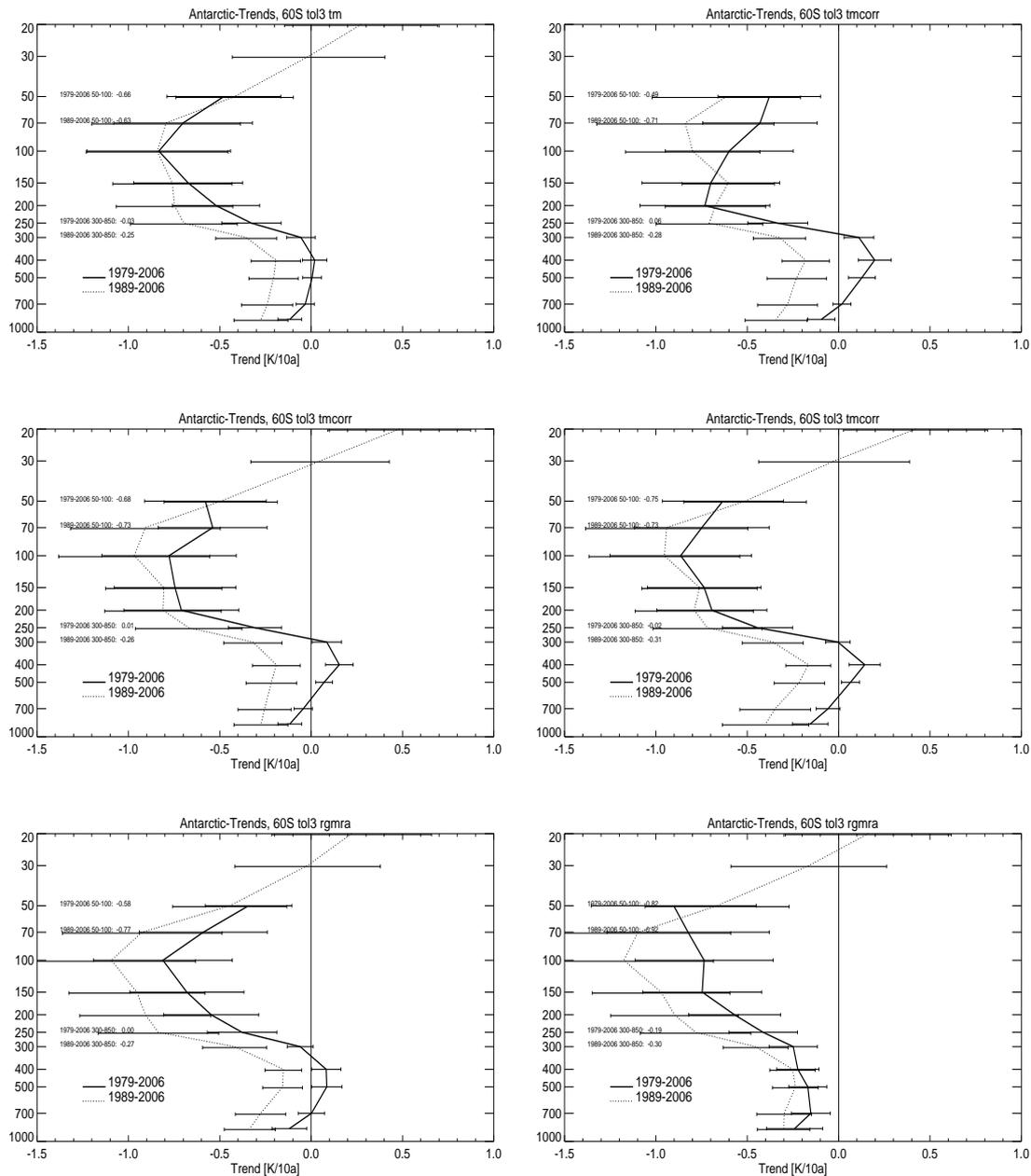


Abbildung 6.4: Vertikalprofile der Trends (1979-2006 durchgezogene Linie und 1989-2006 punktiert) südlich von 60° S. Die Fehlerbalken bezeichnen  $\pm 2\sigma$  des gemittelten Trends. Links oben aus unkorrigierten Radiosondentemperaturdaten, rechts oben mit RAOBCORE Korrekturen aus Experiment 4, mitte links mit RAOBCORE Korrekturen aus Experiment 6, mitte rechts mit RAOBCORE Korrekturen aus Experiment 9, unten links mit RICH Korrekturen aus Experiment 6 und unten rechts mit RICH Korrekturen aus Experiment 9.

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Trends in der Stratosphäre werden mit den Korrekturen aus Experiment 4 abgeschwächt und mit Experiment 9 verstärkt.

Bei der Station Wilkes/Casey werden in Experiment 9 Korrekturen gemacht, die in früheren Experimenten nicht gemacht werden aber mit Metadateneinträgen korrelieren.

Bei der Station Mc Murdo bewirken die Korrekturen starke Änderungen in den Trends der oberen Druckniveaus hin zu negativeren Trends, wobei die Änderung in Experiment 9 größer ist. Die Trends der korrigierten Versionen passen besser zu den umliegenden Stationen mit fast keinem Trend in 30 hPa, rund  $0,5 \text{ K Dekade}^{-1}$  in 100 hPa und 200 hPa und etwas dazwischen in 50 hPa. Die Trends werden durch die Korrekturen vertikal homogener, in Experiment 9 noch mehr als in den früheren Experimenten.

Die Trends der Station Mirnyy werden durch die Korrekturen stark verändert und passen besser zu den umliegenden Stationen. Die Trendprofile sind bei den unterschiedlichen Experimenten unterschiedlich. Dort, wo die Korrekturen aus den Experimenten 4 und 6 zu groß sind und keine Verbesserung bringen, sind die Korrekturen aus Experiment 9 sehr klein. Die RAOBCORE Klimatologiekorrektur für 12:00 UTC ist über weite Höhenbereiche nur halb so groß, wie die Differenz zu den Temperaturen aus Radiookkultationsdaten.

Bei der Station Halley Bay werden in Experiment 9 einige Brüche nicht gefunden, die in den anderen Experimenten gefunden werden.

Die Korrekturen verändern die Trends an der Station Bellingshausen stark, sie werden aber nicht vertikal homogener und passen auch nicht zum Mittel über die antarktischen Stationen. In Experiment 9 werden im Jahr 1989 Korrekturen in 30 hPa und 50 hPa gemacht, die bewirken, dass die Innovationen nicht mehr so gut zum Antarktismittel passen. Die Unterschiede der Trends zu anderen Stationen könnten aber auch real sein, wenn man bedenkt, dass die Station weiter nördlich auf der antarktischen Halbinsel liegt.

Bei der Station Dumont gibt es starke Veränderungen der Trends durch die Korrekturen. Die ursprünglichen Trends sind ähnlich der Trends einer Mehrheit der Stationen. Durch die Korrekturen gibt es, mit Ausnahme des 100 hPa Niveaus, mehr Abkühlung. Die Trends sind eher ähnlich den Trends an der Station Bellingshausen auf der antarktischen Halbinsel. Die Unterschiede zu den umliegenden Stationen in den Trends seit 1958 können auch durch die Länge der Zeitreihe beeinflusst werden. An der Station Dumont gibt es seit 1979 regelmäßig Messungen, davor sehr wenig.

Beim Vergleich der Bruchprofile von RAOBCORE und RICH zeigt sich bei der Station Vostok 2, dass die Profile der RAOBCORE Korrekturen aus den Experimenten 4 und 6 vertikal sehr inhomogen sind, da auch die Backgroundvorhersage inhomogen ist und in Experiment 9 gibt es in den oberen Niveaus oft zu wenig

umliegende Stationen für eine Korrektur. Die Trends wirken bei der Station Vostok 2 in der unkorrigierten Version plausibler.

Bei der Station Leningradskaya werden in Experiment 9 keine Korrekturen mehr gemacht. Die Zeitreihe ist sehr kurz.

Die Trends an der Station Molodezhnaya wirken unkorrigiert und mit Korrekturen aus Experiment 9 plausibler als mit Korrekturen aus Experiment 4. In den unkorrigierten Anomalien und mit Korrekturen aus Experiment 9 gibt es die stärkste Abkühlung in 100 hPa, bei Experiment 4 in 200 hPa gefolgt von 30 hPa mit mehr als  $-1 \text{ K Dekade}^{-1}$  was nicht gut zu den umliegenden Stationen passt.

Durch die Korrekturen aus Experiment 9 ändert sich an den Trends der Station S.A.N.A.E. fast nichts, bei den Korrekturen aus Experiment 4 gibt es Änderungen der Trends. Es gibt verglichen mit anderen Stationen starke positive Trends in 30 hPa.

Bei mehreren Stationen fällt auf, dass die 30 hPa Trends aus Experiment 9 stark von den anderen Experimenten und den Erwartungen abweichen. Das liegt daran, dass es in diesem Niveau für manche Brüche nicht mehr genug Vergleichsdaten von umliegenden Stationen gibt, sodass keine Korrektur berechnet werden kann.

# Literaturverzeichnis

- Alexandersson, Hans und Anders Moberg. Homogenization of Swedish Temperature Data. Part I: Homogeneity Test for Linear Trends. *International Journal of Climatology*, 17:24–34, 1997.
- Andrae, Ulf, Niko Sokka, und Kazutoshi Onogi. The radiosonde temperature bias corrections used in ERA-40. ERA-40 Project Report Series 15, ECMWF, 2004.
- Angell, James K. Effect of Exclusion of Anomalous Tropical Stations on Temperature Trends from a 63-Station Radiosonde Network, and Comparison with Other Analyses. *Journal of Climate*, 16:2288–2295, 2003.
- Anthes, Richard A. et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission - Early Results. *Bulletin of American Meteorological Society*, 89:313–333, 2008.
- Arguez, A. et al. State of the Climate in 2006. *BAMS*, June 2007:1–135, 2007.
- Austin, John, Neal Butchart, und Keith P. Shine. Possibility of an Arctic ozone hole in a doubled  $CO_2$  climate. *Nature*, 360:221–225, 1992.
- Blaschek, Michael. Vergleich von globalen Radiosondentemperaturen mit GPS Okkultationsmessungen. Master's thesis, Universität Wien, 2009.
- Braesicke, Peter und J. A. Pyle. Sensitivity of dynamics and ozone to different representations of SSTs in the Unified Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130:2033–2045, 2004.
- Caussinus, Henri und Olivier Mestre. Detection and Correction of Artificial Shifts in Climate. *Applied Statistics*, 53:405–425, 2004.
- Christy, John R. und William B. Norris. What may we conclude about global tropospheric temperature trends? *Geophysical Research Letters*, 31:L06211, 2004.
- Christy, John R., Roy W. Spencer, und William D. Braswell. MSU Tropospheric Temperatures: Dataset Construction and Radiosonde Comparisons. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17:1153–1170, 2000.

- Christy, John R., Roy W. Spencer, William B. Norris, William D. Braswell, and David E. Parker. Error Estimates of Version 5.0 of MSU-AMSU Bulk Atmospheric Temperatures. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20:613–629, 2003.
- David, Christine, P. Keckhut, A. Armetta, J. Jumelet, M. Marchand, and S. Bekki. Radiosondes stratospheric temperatures from 1957 to 2008 at Dumont d’Urville (Antarctica): trends and link with Polar Stratospheric Clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9:25687–25722, 2009.
- Dee, Dick und Sakari Uppala. Variational bias correction in ERA-Interim. *ECMWF Newsletter*, 119:21–29, 2009.
- Dee, Dick P. und Sakari Uppala. Variational bias correction in ERA-Interim. Technical Memorandum 575, ECMWF, October 2008.
- Durre, Imke, Thomas C. Peterson, and Russell S. Vose. Evaluation of the Effect of the Luers-Eskridge Radiation Adjustments on Radiosonde Temperature Homogeneity. *Journal of Climate*, 15:1335–1347, 2002.
- Elliott, William P., Rebecca J. Ross, and William H. Blackmore. Recent Changes in NWS Upper-Air Observations with Emphasis on Changes from VIZ to Vaisala Radiosondes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, July 2002:1003–1017, 2002.
- Free, Melissa, James K. Angell, Imke Durre, John Lanzante, Thomas C. Peterson, and Dian J. Seidel. Using First Differences to Reduce Inhomogeneity in Radiosonde Temperature Datasets. *Journal of Climate*, 17:4171–4179, 2004.
- Free, Melissa, Dian J. Seidel, und James K. Angell. Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing Climate (RATPAC): A new data set of large-area anomaly time series. *Journal of Geophysical Research*, 110:D22101, 2005.
- Free, Melissa et al. Creating Climate Reference Datasets CARDS Workshop on Adjusting Radiosonde Temperature Data for Climate Monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83:891–899, 2002.
- Gaffen, Dian J., Michael A. Sargent, R. E. Habermann, und John R. Lanzante. Sensitivity of Tropospheric and Stratospheric Temperature Trends to Radiosonde Data Quality. *Journal of Climate*, 13:1776–1796, 2000.
- Gillett, Nathan P. und David W. J. Thompson. Simulation of Recent Southern Hemisphere Climate Change. *Science*, 302:273–275, 2003.

## Literaturverzeichnis

- Haimberger, Leopold. Homogenization of radiosonde temperature time series using ERA-40 analysis feedback information. ECMWF ERA-40 Project Report Series 23, ECMWF, 2005.
- Haimberger, Leopold. Bias correction of conventional observations. In *Workshop on Bias Estimation and Correction in Data Assimilation*, 2006a.
- Haimberger, Leopold. Bias correction of radiosonde observations. In *GEO Workshop on Atmospheric Reanalysis*, 2006b.
- Haimberger, Leopold. Homogenization of Radiosonde Temperature Time Series Using Innovation Statistics. *Journal of Climate*, 20:1377–1403, 2007.
- Haimberger, Leopold und Ulf Andrae. Radiosonde bias corrections for the ERA-Interim reanalysis. Special project final report, checking the temporal homogeneity of ERA-40 observations and analysis using analysis feedback data, ECMWF, 2006.
- Haimberger, Leopold, Christina Tavalato, und Stefan Sperka. Toward Elimination of the Warm Bias in Historic Radiosonde Temperature Records - Some New Results from a Comprehensive Intercomparison of Upper-Air Data. *Journal of Climate*, 21:4587–4606, 2008.
- Hegerl, Gabriele C. und John M. Wallace. Influence of Patterns of Climate Variability on the Difference between Satellite and Surface Temperature Trends. *Journal of Climate*, 15:2412–2428, 2002.
- Ho, Shu-P. et al. A comparison of lower stratosphere temperature from microwave measurements with CHAMP GPS RO data. *Geophysical Research Letters*, 34: L15701, 2007.
- Jacobs, Stanley S. und Josefino C. Comiso. Climate Variability in the Amundsen and Bellingshausen Seas. *Journal of Climate*, 10:697–709, 1997.
- Jones, A. E. und J. D. Shanklin. Continued decline of total ozone over Halley, Antarctica, since 1985. *Nature*, 376:409–411, 1995.
- Karl, Thomas R. et al. Critical Issues for Long-Term Climate Monitoring. *Climatic Change*, 31:185–221, 1995.
- Kushner, Paul J., Isaac M. Held, und Thomas L. Delworth. Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Response to Global Warming. *Journal of Climate*, 14: 2238–2249, 2001.

- Lanzante, John R. resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and example, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*, 16:1197–1226, 1996.
- Lanzante, John R., Stephen A. Klein, und Dian J. Seidel. Temporal Homogenization of Monthly Radiosonde Temperature Data. Part I: Methodology. *Journal of Climate*, 16:224–240, 2003a.
- Lanzante, John R., Stephen A. Klein, und Dian J. Seidel. Temporal Homogenization of Monthly Radiosonde Temperature Data. Part II: Trends, Sensitivities, and MSU Comparison. *Journal of Climate*, 16:241–262, 2003b.
- Marshall, Gareth J. Trends in Antarctic Geopotential Height and Temperature: A Comparison between Radiosonde and NCEP-NCAR Reanalysis Data. *Journal of Climate*, 15:659–674, 2002.
- McCarthy, Mark P., Holly A. Titchner, Peter W. Thorne, S. F. B. Tett, Leopold Haimberger, und D. E. Parker. Assessing Bias and Uncertainty in the HadAT-Adjusted Radiosonde Climate Record. *Journal of Climate*, 21:817–832, 2008.
- Mears, Carl A. und Frank J. Wentz. The Effect of Diurnal Correction on Satellite-Derived Lower Tropospheric Temperature. *Science*, 309:1548–1551, 2005.
- Mears, Carl A. und Frank J. Wentz. Construction of the Remote Sensing Systems V3.2 atmospheric temperature records from the MSU and AMSU microwave sounders. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26:1040–1056, 2009.
- Mears, Carl A., Matthias C. Schabel, und Frank J. Wentz. A Reanalysis of the MSU Channel 2 Tropospheric Temperature Record. *Journal of Climate*, 16:3650–3664, 2003.
- Newman, P. A., J. A. Pyle, et al. *Polar Stratospheric Ozone: Past and Future*, chapter 3. WMO/UNEP, 2002.
- Peterson, Thomas C. et al. Homogeneity Adjustments of In Situ Atmospheric Climate Data: A Review. *International Journal of Climatology*, 18:1493–1517, 1998.
- Ramaswamy, Venkatachalam et al. Stratospheric Temperature Trends. *Reviews of Geophysics*, 39:71–122, 2001.
- Ramaswamy, Venkatachalam et al. Anthropogenic and Natural Influences in the Evolution of Lower Stratospheric Cooling. *Science*, 311:1138–1141, 2006.

## Literaturverzeichnis

- Randel, William J. und Fei Wu. Cooling of the Arctic and Antarctic Polar Stratospheres due to Ozone Depletion. *Journal of Climate*, 12:1467–1479, 1999.
- Randel, William J. und Fei Wu. Biases in Stratospheric and Tropospheric Temperature Trends Derived from Historical Radiosonde Data. *Journal of Climate*, 19:2094–2104, 2006.
- Randel, William J., Fei Wu, Samuel J. Oltmans, Karen Rosenlof, und Gerald E. Nedoluha. Interannual Changes of Stratospheric Water Vapor and Correlations with Tropical Tropopause Temperatures. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61:2133–2148, 2004.
- Randel, William J. et al. An Update of Observed Stratospheric Temperature Trends. *Journal of Geophysical Research*, 114:D02107, 2009.
- Santer, Benjamin D., T. M. L. Wigley, J. S. Boyle, Dian J. Gaffen, J. J. Hnilo, D. Nychka, D. E. Parker, und K. E. Taylor. Statistical significance of trends and trend differences in layer-average atmospheric temperature time series. *Journal of Geophysical Research*, 105:7337–7356, 2000a.
- Santer, Benjamin D., T. M. L. Wigley, Dian J. Gaffen, L. Bengtsson, C. Coutriaux, J.S. Boyle, M. Esch, J. J. Hnilo, P. D. Jones, G. A. Meehl, E. Roeckner, K. E. Taylor, und M. F. Wehner. Interpreting Differential Temperature Trends at the Surface and in the Lower Troposphere. *Science*, 287:1227–1231, 2000b.
- Santer, Benjamin D. et al. Influence of Satellite Data Uncertainties on the Detection of Externally Forced Climate Change. *Science*, 300:1280–1284, 2003.
- Santer, Benjamin D. et al. Identification of anthropogenic climate change using a second-generation reanalysis. *Journal of Geophysical Research*, 109:D21104, 2004.
- Santer, Benjamin D. et al. Amplification of Surface Temperature Trends and Variability in the Tropical Atmosphere. *Science*, 309:1551–1556, 2005.
- Santer, Benjamin D. et al. Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere. *International Journal of Climatology*, 28: 1703–1722, 2008.
- Seidel, Dian J., J. K. Angell, J. Christy, Melissa Free, S. A. Klein, John R. Lanzante, Carl Mears, Parker D., Schabel M., R. Spencer, A. Sterin, Peter Thorne, und F. Wentz. Uncertainty in Signals of Large-Scale Climate Variations in Radiosonde and Satellite Upper-Air Temperature Datasets. *Journal of Climate*, 17:2225–2240, 2004.

- Sherwood, Steven, John Lanzante, und Cathryn Mayer. Radiosonde Daytime Biases and Late-20th Century Warming. *Science*, 209:1556–1559, 2005.
- Sherwood, Steven C. Simultaneous detection of climate change and observing biases in a network with incomplete sampling. *Journal of Climate*, 20:4047–4062, 2007.
- Sherwood, Steven C., Cathryn L. Meyer, Robert J. Allen, und Holly A. Titchner. Robust Tropospheric Warming Revealed by Iteratively Homogenized Radiosonde Data. *Journal of Climate*, 21:5336–5350, 2008.
- Shindell, Drew T., David Rind, und Patrick Lonergan. Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations. *Nature*, 392:589–592, 1998.
- Shine, Keith P. et al. A comparison of model-simulated trends in stratospheric temperatures. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129:1565–1588, 2003.
- Simmons, Adrian, Sakari Uppala, Dick Dee, und Shinya Kobayashi. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, 110:25–35, 2007.
- Sperka, Stefan. Homogeneity adjustments of radiosonde temperature time series using composites of innovations from ERA-40. Master’s thesis, Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, 2007. URL [http://www.univie.ac.at/img-wien/dipldiss/dipl/DA\\_Sperka.pdf](http://www.univie.ac.at/img-wien/dipldiss/dipl/DA_Sperka.pdf).
- Steiner, A. K., G. Kirchengast, M. Borsche, U. Foelsche, und T. Schoengassner. A multi-year comparison of lower stratospheric temperatures from CHAMP radio occultation data with MSU/AMSU records. *Journal of Geophysical Research*, 112:D22110, 2007.
- Tavolato, Christina. Vergleich globaler korrigierter Radiosondentemperaturdatensätze mit MSU-Satellitendaten. Master’s thesis, Universität Wien, 2006. URL [http://www.univie.ac.at/theoret-met/files/DA\\_Tavolato.pdf](http://www.univie.ac.at/theoret-met/files/DA_Tavolato.pdf).
- Thompson, David W. J. und Susan Solomon. Interpretation of Recent Southern Hemisphere Climate Change. *Science*, 296:895–899, 2002.
- Thompson, David W. J., Mark P. Baldwin, und Susan Solomon. Stratosphere/Troposphere Coupling in the Southern Hemisphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 62:708–715, 2005.

*Literaturverzeichnis*

- Thorne, Peter W., David E. Parker, John R. Christy, und Carl A. Mears. Uncertainties in Climate Trends Lessons from Upper-Air Temperature Records. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86:1437–1442, 2005a.
- Thorne, Peter W., David E. Parker, Simon F. B. Tett, Phil D. Jones, Mark McCarthy, Holly Coleman, und Philip Brohan. Revisiting radiosonde upper air temperatures from 1958 to 2002. *Journal of Geophysical Research*, 110:D18105, 2005b.
- Tichner, Holly A., Peter W. Thorne, Mark P. McCarthy, Simon F. B. Tett, Leopold Haimberger, und David E. Parker. Critically Reassessing Tropospheric Temperature Trends from Radiosondes Using Realistic Validation Experiments. *Journal of Climate*, 22:465–485, 2009.
- Trenberth, Kevin E. und Jerry G. Olson. Temperature Trends at the South Pole and Mc Murdo Sound. *Journal of Climate*, 2:1196–1206, 1989.
- Uppala, Sakari. From ERA-15 to ERA-40 and ERA-Interim. In *GEO Workshop on Atmospheric Reanalysis*, jun 2006.
- Uppala, Sakari M. et al. The ERA-40 Re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131:2961–3012, 2005.
- Vincent, Lucie A. A Technique for the Identification of Inhomogeneities in Canadian Temperature Series. *Journal of Climate*, 11:1094–1104, 1998.
- Vinnikov, Konstantin Y. und Norman C. Grody. Global Warming Trend of Mean Tropospheric Temperature Observed by Satellites. *Science*, 302:269–272, 2003.
- Vinnikov, Konstantin Y., Norman C. Grody, Alan Robock, Ronald J. Stouffer, Philip D. Jones, und Mitchell D. Goldberg. Temperature Trends at the Surface and in the Troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 111:D03106, 2006.
- Wigley, Tom M. L., Benjamin D. Santer, und John R. Lanzante. *Statistical Issues Regarding Trends*, chapter Appendix A. U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, 2006.

# Abkürzungsverzeichnis

|                 |   |
|-----------------|---|
| 3D-Var          | 3-dimensionale Variationsanalyse (Datenassimilationsverfahren)  |
| 4D-Var          | 4-dimensionale Variationsanalyse  |
| AMSU            | Advanced Microwave Sounding Unit  |
| CARDS           | Comprehensive Aerological Reference Data Set  |
| CHAMP           | Challenging Minisatellite Payload   |
| CO <sub>2</sub> | Kohlendioxid  |
| COSMIC          | Constellation Observing System for Meteorology,<br>Ionosphere & Climate   |
| DJF             | Dezember Jänner Februar   |
| ECMWF           | European Center for Medium-range Weather Forecast   |
| ENSO            | El Niño Southern Oscillation  |
| EOF             | Empirische Orthogonal Funktion  |
| ERA-40          | 40-jährige Reanalyse des Europäischen Zentrums für<br>Mittelfristige Wettervorhersage                                 |
| ERA-Interim     | neue Reanalyse des Europäischen Zentrums für Mittelfristige<br>Wettervorhersage ab 1989                               |
| ERS             | European Remote Sensing   |
| GCOS            | Global Climate Observing System   |
| GOME            | Global Ozone Monitoring Experiment  |
| GPS             | Global Positioning System   |
| GTS             | Global Telecommunication System   |
| GUAN            | GCOS Upper-Air Network  |
| HadAT           | Hadley Center Atmospheric Temperatures  |
| HadCRUT3        | Met Office Hadley Centre and Climatic Research Unit at the<br>University of East Anglia Temperature Dataset Version 3 |
| hPa             | hekto Pascal  |
| IGRA            | Integrated Global Radiosonde Archive  |
| IUK             | Iterative Universal Kriging   |
| K               | Kelvin  |
| km              | Kilometer   |
| LECT            | Local Equator Crossing Time   |
| LEO             | Low Earth Orbit   |
| LKS             | Lanzante Klein Seidel   |

## *Abkürzungsverzeichnis*

|          |   |
|----------|---|
| MSU      | Microwave Sounding Unit   |
| NCEP     | National Center for Environmental Prediction  |
| NOAA     | National Oceanic and Atmospheric Administration   |
| QBO      | Quasi-Biennial Oscillation  |
| RAOBCORE | Radiosonde Observation Correction using Reanalysis                                      |
| RATPAC   | Radiosonde Atmospheric Temperature Products for Assessing<br>Climate                    |
| RICH     | Radiosonde Innovation Composite Homogenization  |
| RO       | Radiokkultation   |
| RSS      | Remote Sensing Systems  |
| SHIP     | Daten von Wetterschiffen  |
| SNHT     | Standard Normal Homogeneity Test  |
| SON      | September Oktober November  |
| SYNOP    | Daten von operationellen meteorologischen Bodenstationen                                |
| T159     | Truncation 159, es werden 159 Wellenzahlen zur spektralen<br>Diskretisierung verwendet. |
| T255     | Truncation 255, es werden 255 Wellenzahlen zur spektralen<br>Diskretisierung verwendet. |
| TLS      | Temperature Lower Stratosphere  |
| TLT      | Temperature Lower Troposphere   |
| TMT      | Temperature Middle Troposphere  |
| TTS      | Temperature Troposphere/Stratosphere  |
| UAH      | University of Alabama in Huntsville   |
| UTC      | Universal Time Coordinated  |
| UV       | Ultra Violett   |

# Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei meinem Betreuer Ao. Univ. Prof. Mag. Dr. Leopold Haimberger für die ausgezeichnete Betreuung bedanken, bei den von ihm geleiteten FWF Projekten P18120-N10 und 21771-N22 für die Finanzierung, bei Alexander Bihlo, der mich zur Entscheidung für den Theorieschwerpunkt motiviert hat, bei Christina Tavalato und Michael Blaschek für die Hilfe und Abbildungen zu den Satellitendaten und bei Gerlinde Radanovics fürs Korrekturlesen.

# Lebenslauf

## Sabine Radanovics

Heiligenstädterstraße 54/31  
1190 Wien  
☎ 0699 81 40 25 97  
✉ bine.radanovics@gmx.at

### Persönliche Angaben

Geburtsdatum 7.2.1983  
Geburtsort Wien  
Staatsbürgerschaft Österreich

### Ausbildung

1989–2001 Rudolf Steiner Schule Wien - Mauer  
09/1999 Praktikum im Kinderheim Schwedenstift, Perchtoldsdorf  
10/2000 Praktikum bei Donau Forum Druck  
2001–2002 8. Klasse des BORG Hegelg. 14  
06/2002 Matura  
seit 10/2002 **Studium der Meteorologie, Universität Wien**, Studienschwerpunkt: theoretische Meteorologie, Diplomarbeitsthema: Homogenisierung von Radiosondentemperaturzeitreihen in der Antarktis mit ERA-Interim Daten.  
07/2003 **Webdesignworkshop**, Verein Matadora.  
09/2009 **Seminar am Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage, Reading, Großbritannien**, Diagnosis of Forecasting and Data Assimilation Systems.

### Arbeit

08/2002 **Museen der Stadt Wien**, Bereich Aufsicht.  
12/2003–03/2009 **Geriatrisches Tageszentrum Favoriten**, Fond Soziales Wien.  
Leitung der Singgruppe  
07–08/2005 **Securitas**, Bereich Papiergeldzählung.  
08/2006 **Kulturschutzverein, Krems**, Hagelabwehr, Praktikum.  
Prognose von Hagel im Raum Krems, Wetterbeobachtung  
seit 08/2006 **Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie**, wissenschaftliche Mitarbeiterin.  
Schadstofftransportmodellierung, Regionalisierung von Klimaszenarien, Datenaufbereitung, Prüfungsabwicklung

### Wissenschaftliche Publikationen und Präsentationen

04/2007 **European Geoscience Union General Assembly 2007**, Wien,  
Posterpräsentation, Receptor-oriented air pollution modelling in the Austrian Wienerwald Region.

- 2008 **Forschungsbericht**, *H. Formayer, P. Haas, M. Hofstätter, S. Radanovics, H. Kromp-Kolb (2008)*, Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptionstrategien.  
Endbericht einer Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung - MA 22 der Stadt Wien gemeinsam mit der MA 27 - EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung., 82
- 2009 **Publikation**, *I. Schicker, Radanovics, S., and P. Seibert (2009)*, Origin and transport of Mediterranean moisture and air.  
Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 9, 21425-21461; ISSN 1680-7375
- 11/2009 **3. Österreichischer MeteorologInnenntag**, Graz, Posterpräsentation, Homogenisierung von Radiosondentemperaturzeitreihen in der Antarktis mit ERA-Interim Daten.

---

## Hobbys

- Tanz Contemporary, Hip Hop, Modern, Tap
- Chorgesang **seit September 1998 aktives Mitglied des Vocal Ensemble Mödling.**  
Im Vereinsjahr 2003/2004 Schriftführerin des Vereins
- 2004–2008 Betreuung der Homepage der Studienrichtungsververtretung Meteorologie und Geophysik