

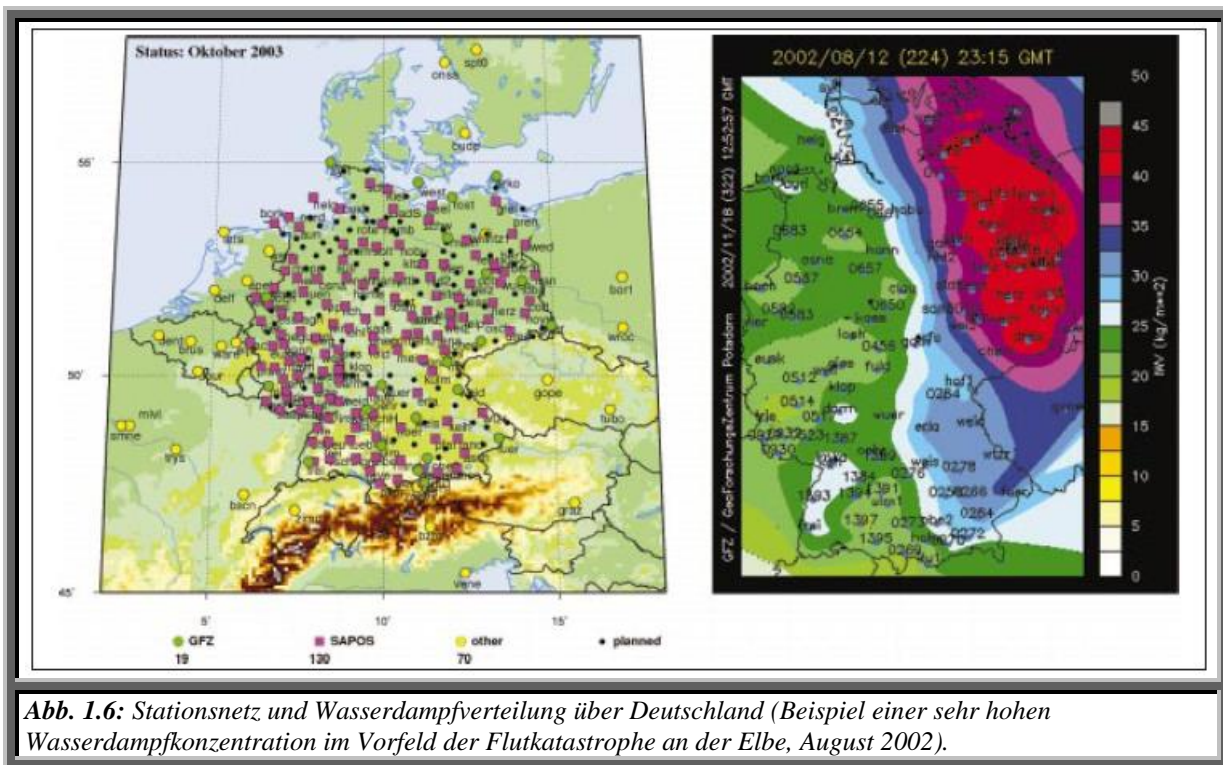
## Sondierung der Atmosphäre mit GPS

### GeoForschungszentrum Potsdam

Das satellitengestützte Navigationssystem GPS hat in einer Reihe von Studien sein hohes Nutzungspotential für die Fernerkundung der Atmosphäre eindrucksvoll demonstriert. Die sowohl in existierenden weltweiten GPS-Bodenstationsnetzen als auch an Bord niedrig-fliegender Satelliten empfangenen GPS-Radiosignale enthalten durch ihre Wechselwirkung mit dem Ausbreitungsmedium Informationen über fundamentale atmosphärische Parameter wie Druck, Temperatur, Wasserdampfgehalt in Troposphäre und Stratosphäre sowie die Elektronendichte in der Ionosphäre. In dem vom GFZ Potsdam geführten *Helmholtz*-Strategiefondsprojekt „GPS-Atmosphärensondierung“ (GASP) werden mit einem deutschlandweiten hochdichten GPS-Bodenstationsnetz und dem GPS-Empfänger an Bord des CHAMP-Satelliten GPS-Daten gewonnen und zur Ableitung der vorher genannten Zustandsparameter der Atmosphäre genutzt.

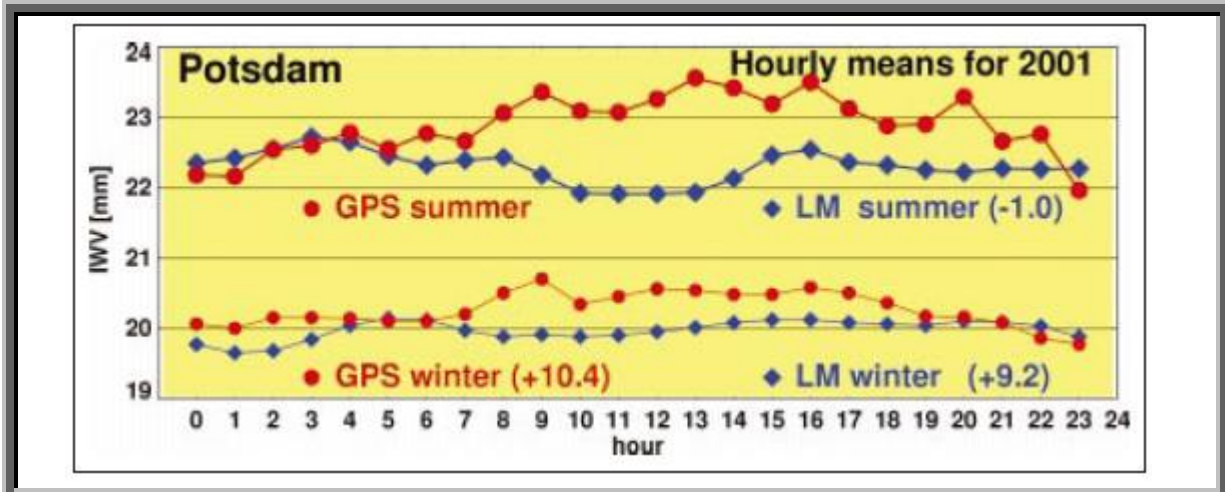
#### *Atmosphärensondierung mit GPS-Bodennetzen*

Bereits seit mehr als drei Jahren wird im quasi-operationellen Modus der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre flächendeckend mit hoher zeitlicher Auflösung über Deutschland bestimmt. Das Stationsnetz (Abb. 1.6) wurde ständig verdichtet und umfasst zum Ende des GASP-Projektes 19 Stationen des GFZ Potsdam, 130 Stationen der Landesvermessungsämter (SAPOS-Netz) und 70 weitere aus angrenzenden Ländern. Insgesamt werden die Daten von etwa 220 Stationen stündlich übertragen und nach einer Wartezeit von 25 Minuten in weniger als 15 Minuten auf einem Linux-PC prozessiert ([http://www.gfz-potsdam.de/pb1/pg1/gasp1/index\\_GASP1.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb1/pg1/gasp1/index_GASP1.html)). Die regelmäßig durchgeführten Vergleiche mit anderen Instrumenten, wie Radiosonden und Wasserdampfradiometern, sowie mit präzisen post-prozessierten Analysen zeigen, dass die Analyse in nahezu Echtzeit eine sehr hohe Genauigkeit von 1 bis 2 mm im Wasserdampfgehalt liefert. Die Qualität ist ausreichend für die Nutzung in der operativen Meteorologie. Deshalb werden die GPS-Produkte dem Deutschen Wetterdienst (DWD) zur weiteren Verarbeitung übermittelt.



Der hohe Informationsgehalt gibt einen völlig neuen Einblick in die räumliche und zeitliche Verteilung des Wasserdampfes. Ein detaillierter Vergleich des täglichen Wasserdampfzyklus aus stündlichen Daten von

GPS und dem Lokal-Modell (LM) des DWD wurde getrennt für den Winter und Sommer durchgeführt (Abb. 1.7). Während GPS tägliche Variationen mit einem Maximum mitten am Tage aufweist (kleiner im Winter als im Sommer), zeigt das LM fast keine Variationen im Winter und im Sommer sogar ein Minimum um die Mittagszeit. Dieses Verhalten erzeugt einen negativen Bias zwischen GPS und LM, und ist bisher nicht erklärbar. Eine Ursache könnte eine Temperaturabhängigkeit in den 12-Uhr-Radiosonden sein, die sich im Modell widerspiegeln.

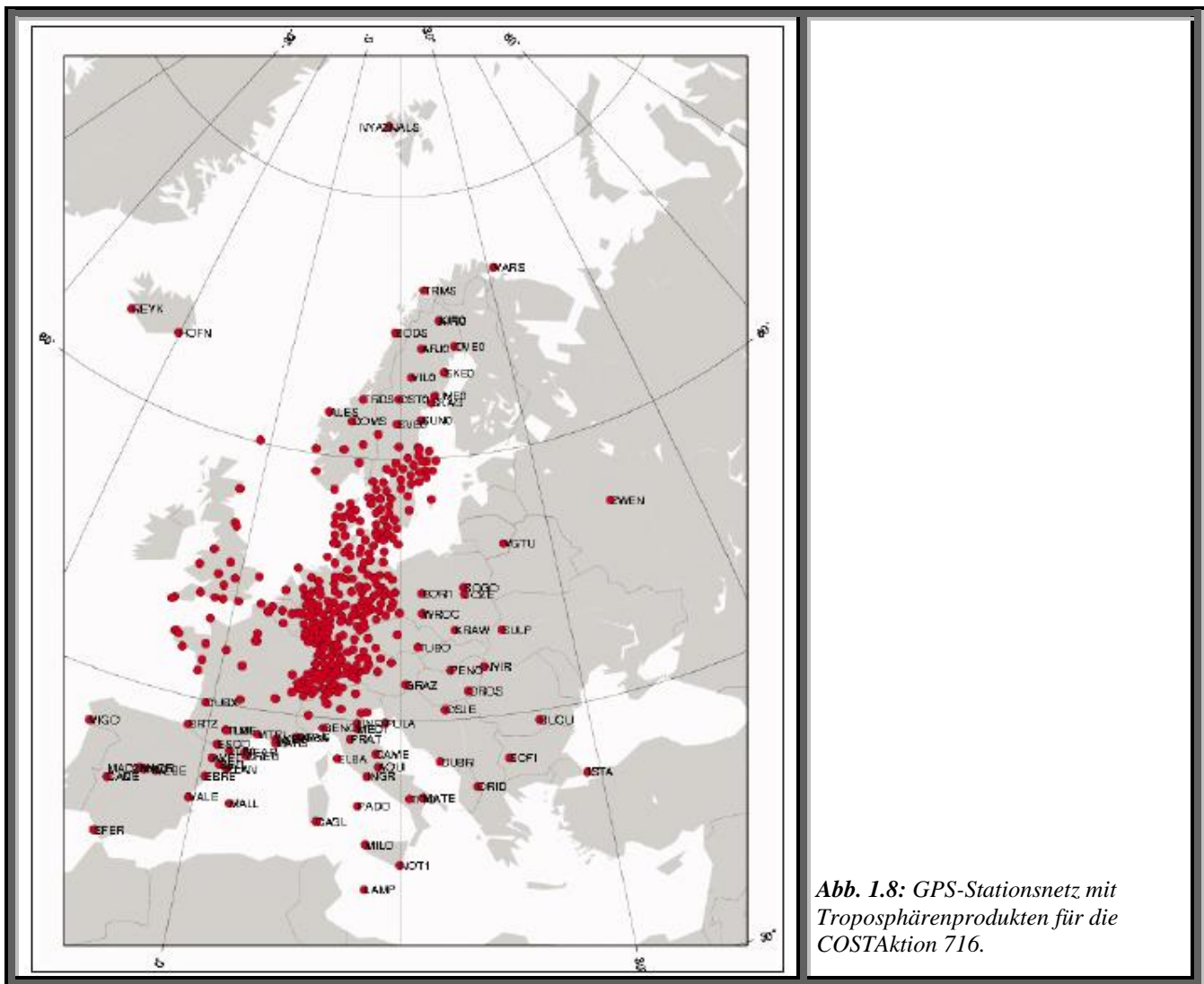


**Abb. 1.7:** Vergleich des täglichen Wasserdampfzyklus abgeleitet aus GPS und LM. Mittelwerte für gegebene Stunden wurden für Sommer (Monate MJJA) und Winter (Monate JFND) berechnet. Zur besseren Darstellung wurden die Kurven mit den angegebenen Werten vorschoben.

Erste Assimilationsstudien ergaben, dass der Einfluss von GPS in den ersten sechs Stunden der Vorhersage groß, jedoch nach 24 Stunden vernachlässigbar ist. Vergleiche mit Radiosonden zeigten, dass GPS die 12-Stunden-Vorhersage für die Luftfeuchte bis zu 10 % verbessert. Jedoch ist der Einfluss auf die Vorhersage des Niederschlags bisher noch gemischt. Einige negative Fälle könnten durch den positiven Bias von GPS (im Vergleich zum Modell) während des Tages im Sommer verursacht worden sein. Eine tageszeitabhängige Bias-Kalibrierung wurde getestet und zeigte einen positiven Effekt.

*COST-Aktion 716 „Nutzung von GPS-Bodenstationen für Klimaanwendungen und numerische Wettervorhersage“*

Im Rahmen der EU-COST Aktion 716 werden die GPS-Netze von 15 europäischen Staaten zu einer europaweiten Erfassung der Wasserdampfverteilung verwendet. Das GFZ Potsdam trägt mit der Bereitstellung der berechneten Wasserdampfwerte und einer Unterstützung des Deutschen Wetterdienstes durch Finanzierung einer Personalstelle für die Wettermodellierung zu dieser Aktion bei. Im Rahmen der Aktion soll die nahezu Echtzeitverarbeitung der GPS-Daten in Kooperation aller beteiligter Partner demonstriert (die Zuverlässigkeit der GFZ-Produktbereitstellung liegt bei über 90 %) und der Einfluss der GPS-Daten auf die Wettervorhersage untersucht werden. Schließlich sollen Vorschläge für die Einführung dieser neuen Technik in die Praxis der Wetterdienste, insbesondere für die internationale Zusammenarbeit auf diesem Gebiet, erarbeitet werden.

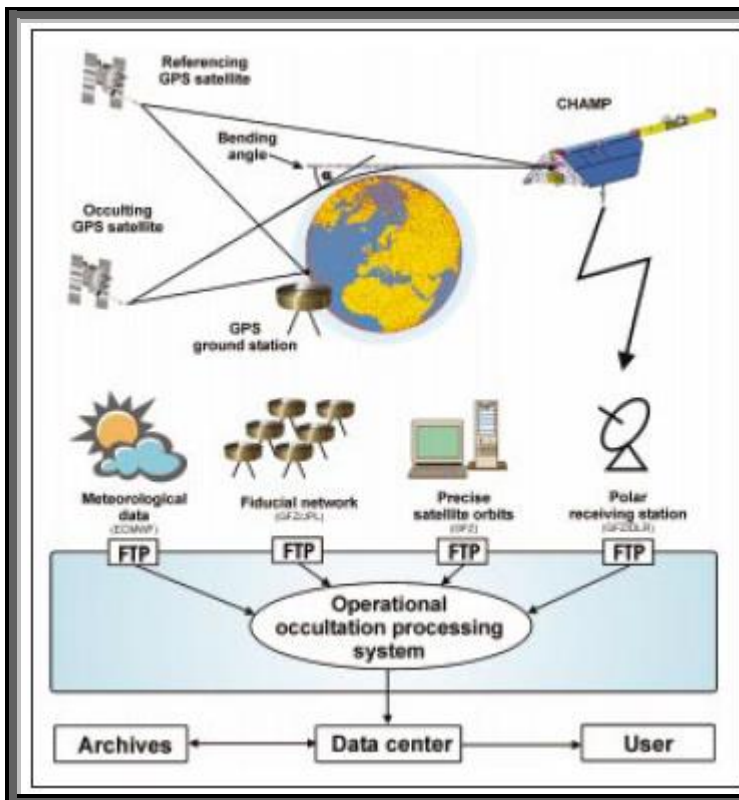


*Abb. 1.8: GPS-Stationsnetz mit Troposphärenprodukten für die COSTAktion 716.*

### **GPS-Radiookkultationsmessungen**

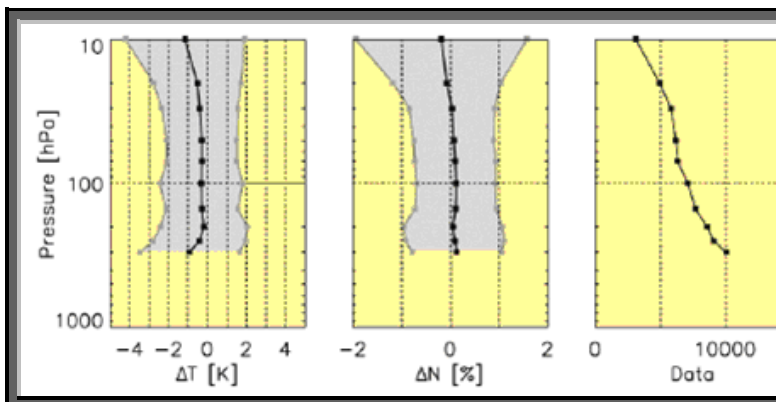
Die neuartige GPS-Radiookkultationsmethode etabliert sich derzeit zu einem Standardverfahren für die Fernerkundung der globalen Erdatmosphäre. Dazu trägt eine Vielzahl von derzeitigen und zukünftigen Satellitenmissionen bei. Zur Ableitung von Atmosphäreneigenschaften nutzt das innovative Verfahren die Veränderung der Signale von GPS-Navigationssatelliten beim tangentialen Durchstreifen der Erdatmosphäre. Eine charakteristische Größe für den Atmosphäreneinfluss ist der Brechungswinkel  $\alpha$  des Signalweges (Abb. 1.9). Der GFZ-Satellit CHAMP spielt hier eine Vorreiterrolle. An Bord von CHAMP werden seit Februar 2001 nahezu kontinuierlich bis zu 250 GPS-Okkultationsmessungen täglich durchgeführt. Aus diesen Aufzeichnungen werden global verteilte Vertikalprofile von Refraktivität, Temperatur und Wasserdampf abgeleitet.

Die Daten von CHAMP werden am GFZ Potsdam automatisch ausgewertet und von mehr als 40 internationalen Forschergruppen genutzt. Zur Auswertung ist eine komplexe Infrastruktur notwendig, die im Rahmen des Strategiefondsprojektes GASP der Helmholtz-Gemeinschaft etabliert wurde (Abb. 1.9). Diese operationell betriebene Infrastruktur ermöglicht weltweit erstmals eine Nahezu-Echtzeit-Bereitstellung von GPS-Okkultationsergebnissen, was vor allem für die Verwendung dieser neuartigen Daten zur Verbesserung der globalen Wettervorhersage von Bedeutung ist.



**Abb. 1.9:** Schematische Darstellung der Infrastruktur zur Aufzeichnung und Auswertung von GPS-Radiookkultationsmessungen am GFZ Potsdam. Die Nutzung einer polaren Satellitenempfangsstation (Ny Alesund, Spitzbergen) ermöglicht erstmals die Bereitstellung von atmosphärischen Daten für die operationelle Nutzung im Rahmen der globalen Wettervorhersage (durchschnittlich ~5 Stunden zwischen jeder der global verteilten Messungen und Bereitstellung der Analyseergebnisse am GFZ).

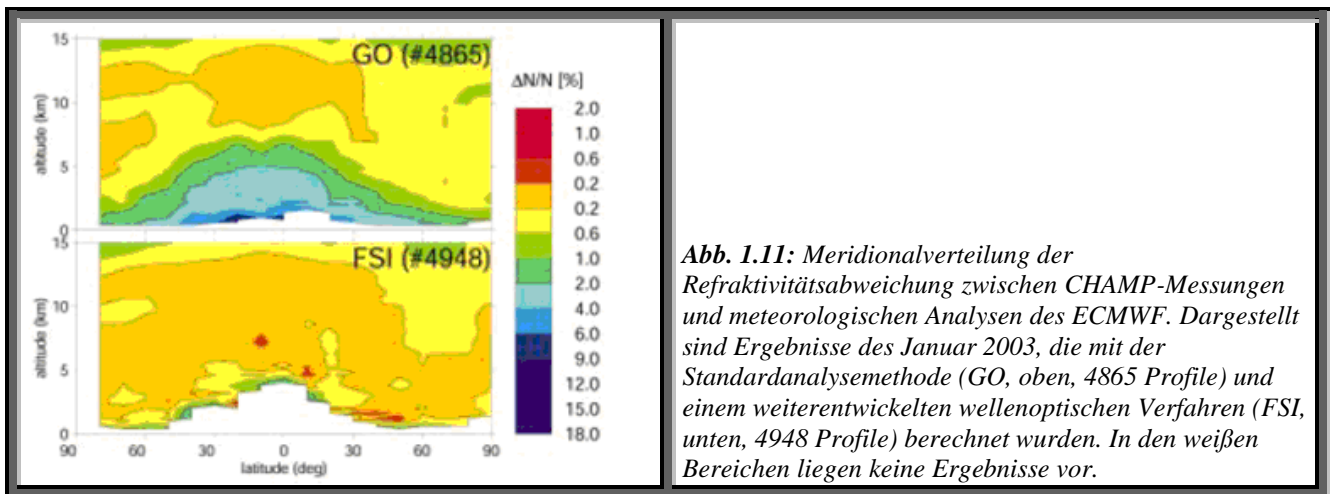
Die Genauigkeit der CHAMP-Daten wird kontinuierlich durch Vergleiche mit anderen meteorologischen Daten kontrolliert. Diese Studien zeigen eindrucksvoll die Genauigkeit der GPS-Okkultationsmessungen (Abb. 1.10), weisen jedoch auch auf Schwachpunkte der Datenanalyse hin.



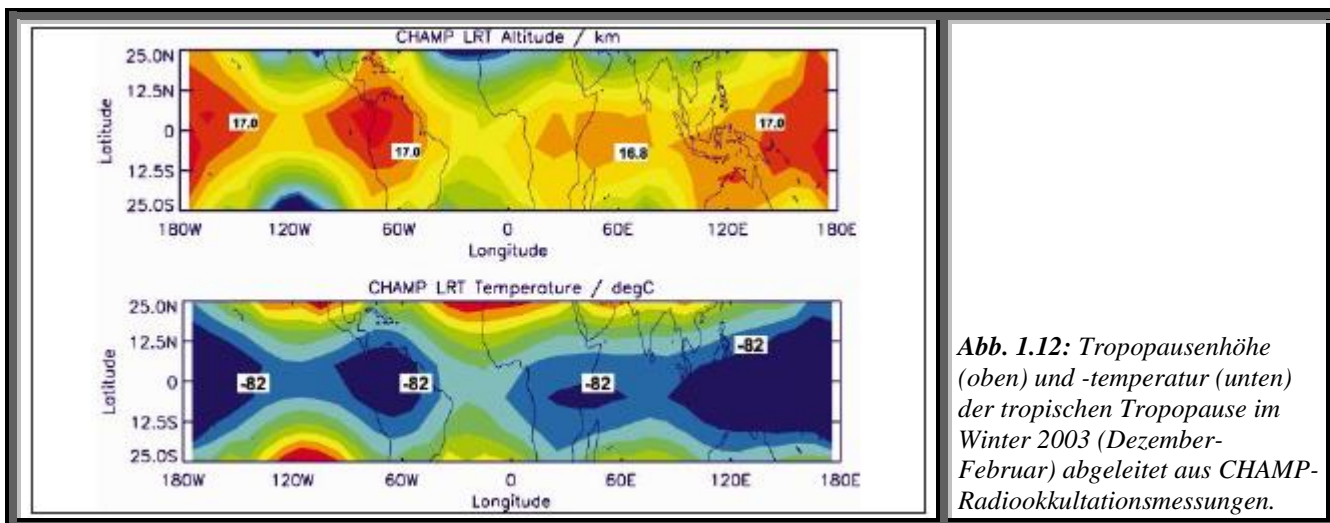
**Abb. 1.10:** Statistischer Vergleich von ca. 10.000 atmosphärischen Vertikalprofilen (links: Temperatur, Mitte: Refraktivität) von CHAMP mit korrespondierenden Radiosondenmessungen 2001-2003 auf den meteorologischen Hauptdruckflächen im Höhenbereich von ca. 5 bis 30 km. Dargestellt sind Mittelwert und Standardabweichung. Der zeitliche und räumliche Abstand zwischen CHAMP- und Radiosondenmessung beträgt <3 h und <300 km. Die rechte Grafik zeigt die Anzahl der verglichenen Daten pro Höhe.

Eine grosse Herausforderung stellt derzeit die Auswertung der CHAMP-Daten in der unteren Troposphäre dar. Hier zeigen sich systematische Abweichungen im Vergleich zu Messungen mit Wetterballonen oder meteorologischen Datenanalysen (negativer Refraktivitätsbias). Die Anwendung neuartiger Auswertemethoden, basierend auf wellenoptischen Verfahren, kann die Qualität der Ergebnisse deutlich verbessern (Abb. 1.11).





Neben der operationellen Prozessierung und der Verbesserung der Datenanalyse beginnt die Atmosphärengruppe des GFZ Potsdam Okkultationsdaten in der Atmosphärenforschung anzuwenden. Ein Beispiel hierfür sind Untersuchungen am weltweit einzigartigen Langzeitdatensatz von CHAMP zu thermischen Veränderungen in der Tropopausenregion (Abb. 1.12). Die Tropopause charakterisiert den Übergang zwischen der unteren (Troposphäre) und mittleren (Stratosphäre) Atmosphärenschicht. Die Höhe der Tropopause ist Indikator für Klimaänderungen, womit Langzeituntersuchungen in der Tropopausenregion eine große Relevanz für die Erfassung von Klimatrends haben. Studien mit Radiosonden und Wetteranalysen haben gezeigt, dass die Tropopausenhöhe in den vergangenen 25 Jahren angestiegen ist. Beide Datenquellen unterliegen jedoch Einschränkungen: Radiosonden besitzen eine gute vertikale Datendichte; eine globale Abdeckung der Messungen ist aber nicht möglich, da sich die Radiosondenstationen überwiegend an Land befinden. Wetteranalysen dagegen sind global verfügbar, leiden aber an geringer vertikaler Auflösung. Diese Nachteile werden durch die GPS-Radiookkultationstechnik überwunden, die eine hohe vertikale Datendichte mit globaler Abdeckung vereint. Ein weiterer Vorteil ist die Unabhängigkeit des Verfahrens vom Wetter. Wolken stören die GPS-Messungen nicht.



Neben CHAMP wird das GFZ Potsdam auch die zukünftigen Okkultationsmessungen der Satelliten GRACE, TerraSAR-X und Tandem-X auswerten. Insgesamt werden täglich ca. 1.000 globale Messungen erwartet.

Quelle: Geoforschungszentrum Potsdam Zweijahresbericht 2002/03