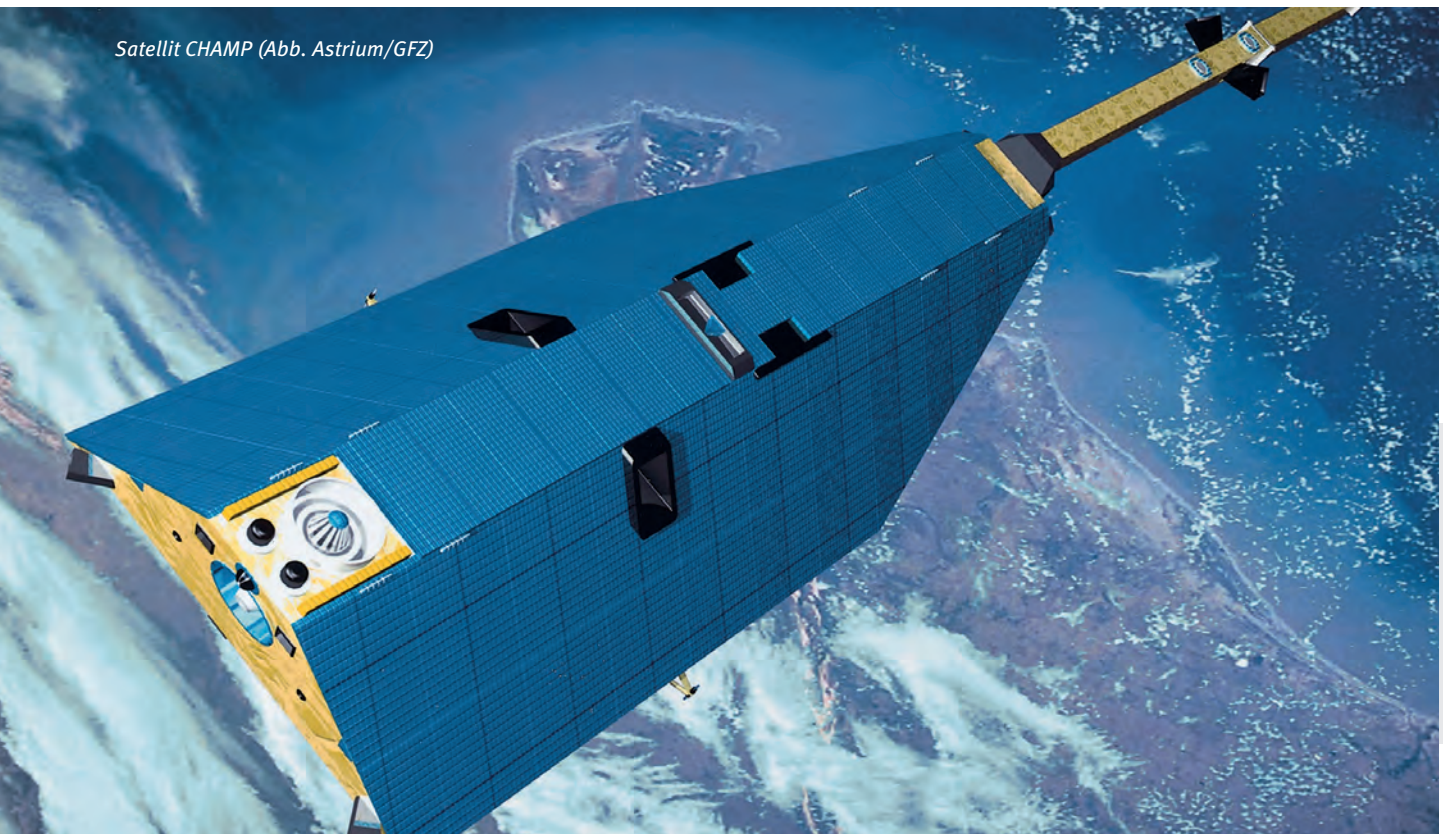


# GNSS-Radiokulturation: Globale atmosphärische Klimauntersuchungen mit Signalen von Navigationssatelliten

Jens Wickert, Torsten Schmidt, Stefan Heise, Christina Arras, Georg Beyerle, Florian Zus  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Understanding and predicting of atmospheric temperature and water vapor variations is a key issue for characterizing global change. To precisely determine the current and future variations on a global scale, accurate atmospheric observations with satellites are indispensable. We introduce an innovative and very precise satellite based atmospheric observation technique, which became operational during the recent years, pioneered also by the work of GFZ technicians and scientists: GNSS (Global Navigation Satellite System) Radio Occultation (RO). The technique is based on the influence of the Earth's atmosphere on the propagation of navigation signals (L-Band, 1.2 and 1.5 GHz). A key parameter for this influence is the bending angle of the signal path from the transmitting navigation to the receiving Low Earth Orbiting (LEO) satellite, which depends on atmospheric temperature and water vapor. The GNSS RO method is currently applied aboard several LEO satellites, as GRACE, TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMIC and Metop. We also present recent scientific GFZ results related to the characterization of global atmospheric variations using the world-wide unique long-term GNSS RO data set from the GFZ geoscience satellite CHAMP (2000-2010). Hereby, tropopause temperature and altitude properties, precisely derived from the GNSS RO data, are also used to reveal even very small variations of the global atmosphere.*

Satellit CHAMP (Abb. Astrium/GFZ)



## Globale Atmosphärensondierung mit GNSS-Radiookkultation

Verbesserungen numerischer Wettervorhersagen und Aussagen über Klimaveränderungen sind nur auf der Basis von präzisen atmosphärischen Beobachtungsdaten und durch den Einsatz numerischer Atmosphärenmodelle mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung möglich. Trotz erheblicher Fortschritte auf der Beobachtungsseite gibt es dabei jedoch weiterhin Defizite, die vorwiegend auf fehlende oder zu ungenaue Messungen der atmosphärischen Parameter zurückzuführen sind.

Mit den kontinuierlich und global verfügbaren Signalen der Satellitennavigationssysteme GPS (Global Positioning System), GLONASS, Galileo und COMPASS (Oberbegriff GNSS, Globales NavigationsSatellitenSystem) ergibt sich eine innovative Möglichkeit, bestehende Lücken im weltweiten Beobachtungsnetz zu schließen. Die Navigationssignale werden beim Durchgang durch das Ausbreitungsmedium – die Erdatmosphäre – in charakteristischer Weise verändert. Dieser Effekt ist für eine präzise Positionierung z. B. beim Einsatz in Navigationssystemen unerwünscht, bildet jedoch auch die Grundlage für verschiedene GNSS-basierte Verfahren zur Atmosphärenfernerkundung, die in den vergangenen Jahren wesentlich auch am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ entwickelt wurden (Wickert und Gendt, 2006). In diesem Beitrag steht die satellitengestützte GNSS-Radiookkultationsmethode (RO) im Vordergrund, die zur Beobachtung von Atmosphären- und Ionosphäreigenschaften im globalem Maßstab eingesetzt wird (Wickert et al., 2009).

Bei der GNSS-RO befinden sich spezielle GNSS-Empfänger auf Satelliten in erdnahe Umlaufbahn (in rund 300-1000 km Höhe, engl. Low Earth Orbit, LEO). Durch die bei LEO-Satelliten im Vergleich zu den höher fliegenden Navigationssatelliten deutlich kürzere Umlaufzeit (rund 1,5 h statt 12 h) kommt es beim Empfang der Signale zu zahlreichen Signalunterbrechungen bei den sogenannten Auf- und Untergängen der Navigationssatelliten (Okkultationen). In der Astronomie bezeichnet „Okkul-

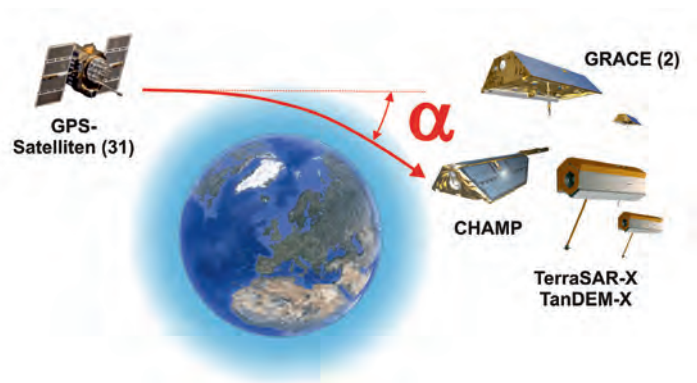


Abb. 1: Globale Atmosphärensondierung mit Navigationssatelliten: Die Signale der 31 GPS-Satelliten werden beim Durchgang durch die Atmosphäre verändert und von Satelliten im niedrigen Erdbit empfangen.

Fig. 1: Global atmosphere sounding with navigation satellites. The signals of the 31 GPS satellites are modified when propagating through the Earth's atmosphere and received aboard Low Earth Orbiting satellites.

tion“ die Bedeckung bzw. Verfinsterung beim Vorbeiziehen eines scheinbar größeren Himmelskörpers vor einem Anderen. Während dieser etwa 1 bis 2 Minuten andauernden Perioden werden die GNSS-Signale mit hoher Frequenz (50 Hz) aufgezeichnet und die Brechung der Signalwege (Winkel  $\alpha$ , siehe Abb. 1) bestimmt. Mit mathematischen Verfahren können dann vertikale Profile atmosphärischer Parameter, wie Luftdruck, Temperatur, Wasserdampf (Abb. 2) oder auch der Elektronendichte in größeren Höhen abgeleitet werden (Wickert, 2002). Haupteigenschaften der Methode sind globale und kontinuierliche Verfügbarkeit (Abb. 3 und 4), hohe vertikale Auflösung, Unabhängigkeit von Bewölkung und Kalibrationsfreiheit und damit Schlüsseigenschaften für Anwendungen in der Klimaforschung.

Der internationale Durchbruch der GNSS-RO für operationelle Anwendungen gelang mit dem deutschen Satelliten CHAMP, der am 15. Juli 2000 gestartet wurde und bis zum Missionsende am 19. September 2010 Beobachtungsdaten lieferte. Daten von CHAMP wurden nach langjährigen Vorstudien und damit verbundenen kritischen Qualitätsprüfungen erstmals 2006 operationell zur Verbesserung globaler Wettervorhersagen eingesetzt. Der nahezu dekadische GNSS-RO-Langzeitdatensatz ist nach wie vor einzigartig und bildet weltweit die Basis vielfältiger Untersuchungen zu klimatologischen Veränderungen der Erdatmosphäre (Wickert et al., 2009).

Das GFZ ist gegenwärtig neben GRACE auch für die GNSS-RO an Bord der deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X verantwortlich (Start am 15. Juni 2007 bzw. 21. Juni 2010 (Beyerle et al., 2011)).

Links: Globale Atmosphärensondierung mit Navigationssatelliten: Die Signale der GPS-Satelliten werden beim Durchgang durch die Atmosphäre verändert und von Satelliten im niedrigen Erdbit empfangen.

Left: Global atmosphere sounding with navigation satellites. The signals of the GPS satellites are modified when propagating through the Earth's atmosphere and received aboard Low Earth Orbiting satellites.



Kontakt: J. Wickert  
(wickert@gfz-potsdam.de)



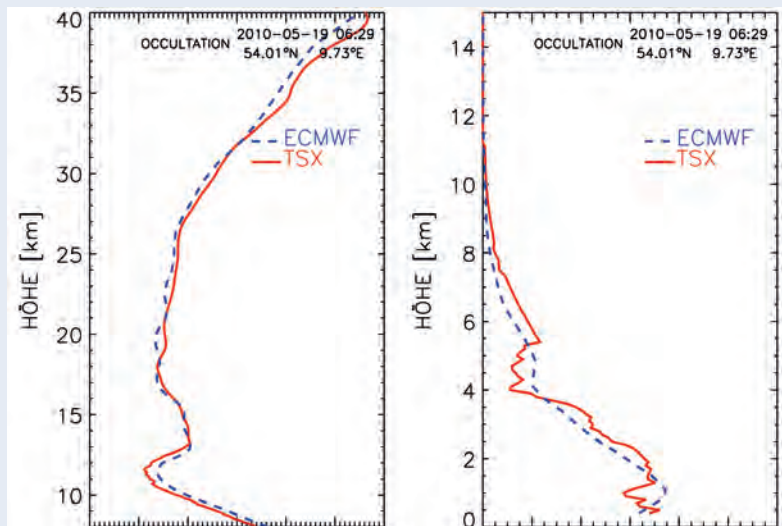


Abb. 2: Vertikalprofile von Temperatur (links) und Wasserdampf (rechts), basierend auf einer GPS-Radiokkultationsmessung von TerraSAR-X, im Vergleich mit Analyseergebnissen des ECMWF. Beispiel vom 19. Mai 2010, Okkultation beobachtet um 06:29 UTC über Norddeutschland (54° N, 9,7° E, nördlich von Hamburg)

Fig. 2: Vertical temperature (left) and humidity (right) profiles derived from TerraSAR-X GPS radio occultation data in comparison with ECMWF analysis. Example from May 19, 2010, occultation at 06:29 UTC, 54°N, 9.7°E

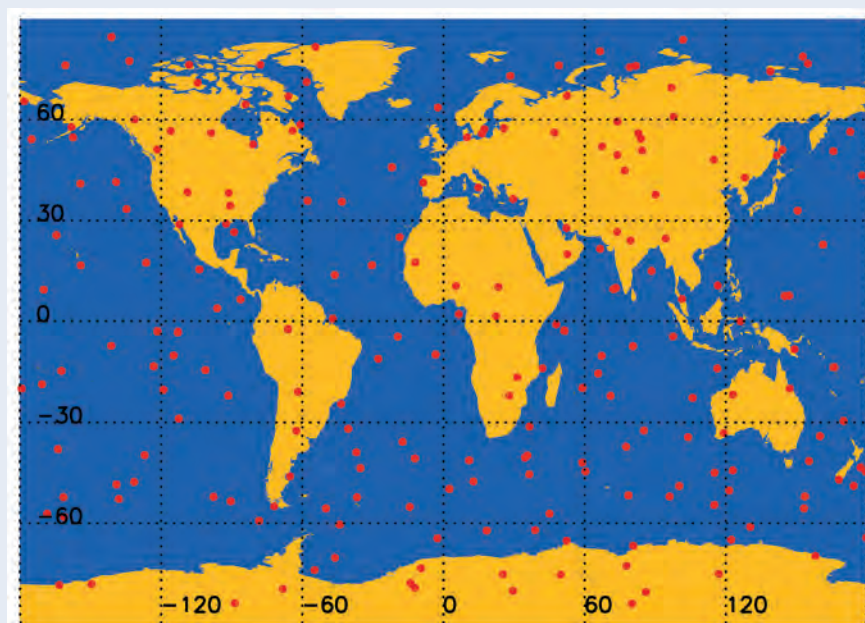


Abb. 3: Globale Verteilung der GPS-Radiokkultationsereignisse (insgesamt 215) am 19. Mai 2010, beobachtet an Bord von TerraSAR-X

Fig. 3: Global distribution of GPS radio occultation events (215 in total) observed from TerraSAR-X on May 19, 2010

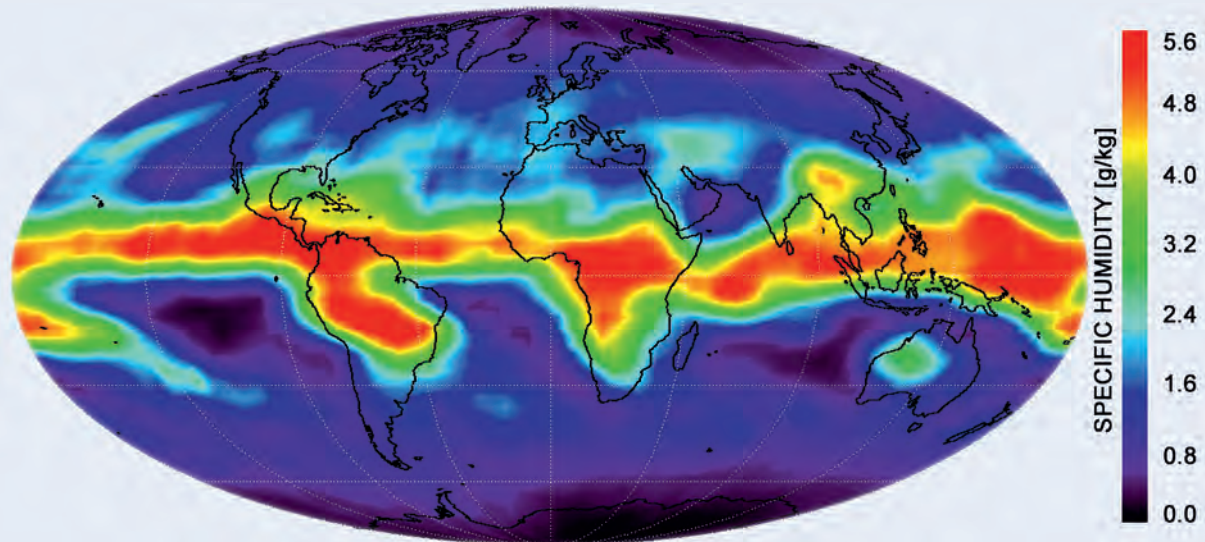


Abb. 4: Auf GPS-Radiookkultationsmessungen von CHAMP, GRACE und COSMIC basierende globale Verteilung der mittleren spezifischen Feuchte auf der 600 hPa Druckfläche (etwa 4 km Höhe) für Oktober 2006

Fig. 4: Global distribution of mean specific humidity at 600 hPa pressure level (about 4 km altitude), derived from CHAMP, GRACE and COSMIC GPS radio occultation measurements for October 2006

## Die Tropopause als Klimaindikator

Neben der Temperaturmessung und der Ableitung von Temperaturtrends bietet sich mit den GNSS-RO-Daten eine zusätzliche Methode zur Detektion globaler Klimaänderungen: die Analyse des Langzeitverhaltens der Tropopause.

Der Bereich der Atmosphäre von der oberen Troposphäre bis in die untere Stratosphäre (etwa 5 bis 30 km) ist eine Schlüsselregion für das Verständnis vielfältiger atmosphärischer klimarelevanter Prozesse. Den Übergang zwischen der Troposphäre, in der sich das Wetter abspielt, und der darüber liegenden Stratosphäre bildet die Tropopausenregion. Die Grenze zwischen beiden Atmosphärenbereichen kann mit Hilfe der Temperatur bestimmt werden (Abb. 5): In der Troposphäre nimmt die Temperatur im Mittel mit der Höhe ab, bevor sie in der Stratosphäre zunimmt. Die Höhe des Umkehrpunkts im Temperaturverlauf ist die Tropopause. Die mittlere Tropopausenhöhe variiert mit der geografischen Breite zwischen 17 km in den Tropen und 8 km an den Polen.

Neben weiteren Aspekten besitzt die Tropopausenhöhe die Eigenschaft, ein Klimaindikator zu sein. In Abbildung 5 ist dieser Zusammenhang für zwei grundlegende Mechanismen dargestellt. Eine Erwärmung der Troposphäre führt zu einem

Anstieg der Tropopausenhöhe (Abb. 5a). Der gleiche Effekt ergibt sich durch eine Abkühlung der unteren Stratosphäre (Abb. 5b). Beide Prozesse verstärken einander (Abb. 5c). Sowohl die Erwärmung der Troposphäre durch vermehrten Eintrag von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen als auch die Abkühlung der unteren Stratosphäre, bedingt vor allem durch stratosphärischen Ozonabbau über den Polregionen in den vergangenen Jahrzehnten, wurden in verschiedenen Datensätzen (Satelliten, Wetteranalysen, Radiosonden) nachgewiesen (Shindell, 2008). Somit ist es aus dem Blickwinkel der Untersuchung des Klimas und seiner Variabilität sehr interessant, die Tropopausenhöhe im globalen Maßstab zu beobachten.

Eine wichtige Datenquelle zur Bestimmung der Tropopausenhöhe sind Radiosonden (Wetterballone). Während Wetteranalysen global verfügbar sind, leiden sie unter einer geringen vertikalen Auflösung, die aber wichtig ist, um die genaue Höhe der Tropopause bestimmen zu können. Radiosonden dagegen besitzen zwar eine ausreichende Höhenauflösung, sind aber nur punktuell und zumeist nur über Land verfügbar. Zum globalen Monitoring der Tropopausenhöhe eignen sich daher nur Satellitenmessungen, die über eine geeignete vertikale Auflösung ( $<1$  km) für die Temperaturmessungen verfügen

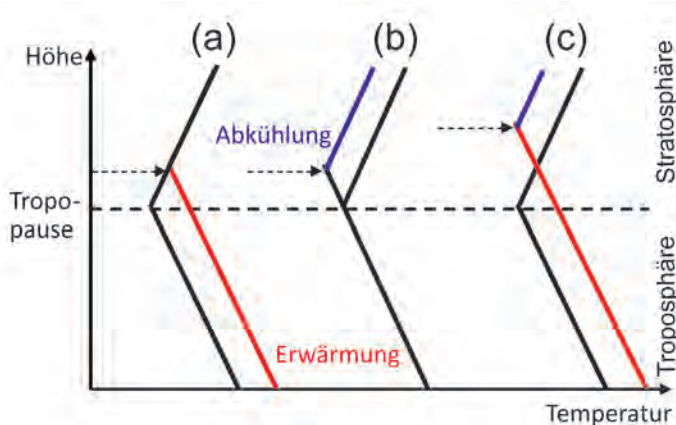


Abb. 4: Ausgewählte Prozesse, die zu einer Erhöhung der Tropopausehöhe führen; (a) Erwärmung der Troposphäre, (b) Abkühlung der unteren Stratosphäre, (c) beides. Die schwarzen Temperaturprofile zeigen den Referenzzustand, die Pfeile den entsprechenden Anstieg der Tropopausehöhe im Vergleich zur Referenzhöhe (gestrichelt).

Fig. 4: Selected processes leading to an increase of the tropopause height; (a) Warming of the troposphere, (b) cooling of the lower stratosphere, (c) both. The black solid lines show the reference temperature profile. The arrows indicate the according increase of the tropopause height in comparison to the reference (dashed).

und zudem den Höhenbereich der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre abdecken. Diese Ära begann mit der Verfügbarkeit von GPS-Radiokkultationsmessungen (Abb. 2), wobei die vom GFZ geleitete CHAMP-Mission diese Daten erstmals kontinuierlich über einen langjährigen Zeitraum (2001 bis 2008) verfügbar machte.

In Abbildung 6a sind monatliche Anomalien der globalen Tropopausehöhe von Mai 2001 bis September 2011 dargestellt, aus denen globale Trends bestimmt werden (blaue Linie). Die Basis für die Trenduntersuchungen sind die Radiokkultationsmessungen von CHAMP (05/01 bis 09/08), GRACE (04/06 bis 09/11) und TerraSAR-X (03/09 bis 09/11). Obwohl der Datensatz erst wenig mehr als eine Dekade umfasst, passt der beobachtete Trend der Tropopausehöhe mit einem globalen Anstieg von etwa 60 m sehr gut zu Ergebnissen, die mit beachtlich längeren Datensätzen erzielt wurden und zeigt damit das besondere Potential der Radiokkultationsmethode und damit einen weiteren Wert von Satellitenmissionen in den Geowissenschaften. Trends der Tropopausehöhe in verschiedenen geografischen Breiten zeigt Abbildung 6b. Es ist gut zu erkennen, dass die Tropopausehöhe im betrachteten Zeitraum räumlich bzw. global nicht einheitlich angestiegen ist, sondern dass es regionale Unterschiede gibt. Abbildung 6c zeigt Temperaturtrends im Höhenbereich von 5 bis 25 km zwischen 85° N und 85° S. Deutlich zu erkennen ist der positive Temperaturtrend in der Troposphäre, d. h. unterhalb der Tropopause (weiße Linie). Darüber, also in der unteren Strato-

sphäre, wird in großen Teilen eine Abkühlung beobachtet. Ausnahmen finden sich lediglich in den Tropen und im Bereich der Subtropen auf beiden Hemisphären. Der Anstieg der Tropopausehöhe in den mittleren und polaren Breiten ist demnach ein Resultat von troposphärischer Erwärmung und Abkühlung der unteren Stratosphäre, während in den Subtropen der positive Temperaturtrend in der Troposphäre den ebenfalls leicht positiven Temperaturtrend in der Stratosphäre dominiert und somit noch zu einem Anstieg der Tropopausehöhe führt. In den Tropen bedingt der positive Temperaturtrend zwischen 15 und 20 km Höhe keinen oder sogar einen leicht negativen Trend der Tropopausehöhe.

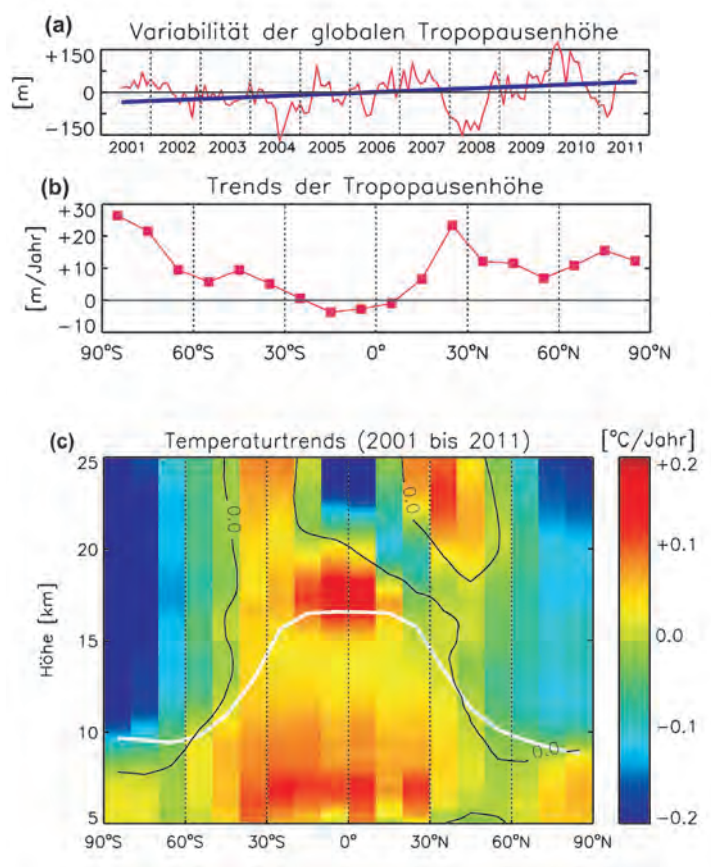


Abb. 5: (a) Anomalien der globalen Tropopausehöhe (rot). Die blaue Linie zeigt einen linearen Trend von etwa +60 m über den Gesamtzeitraum. (b) Trends der Tropopausehöhe (m/Jahr) für verschiedene geografische Breiten. (c) Temperaturtrends in °C pro Jahr. Die weiße Linie markiert die mittlere Tropopausehöhe. Die Ergebnisse basieren auf Messungen von CHAMP (05/2001 bis 09/2008), GRACE (04/2006 bis 09/2011) und TerraSAR-X (03/2009 bis 09/2011).

Fig. 5: (a) Anomalies of the global tropopause height (red). The blue line shows a linear trend of about +60 m over the time interval. (b) Trends of the tropopause height (m/year) for different latitude bands. (c) Temperature trends (°C/year). The white line denotes the mean tropopause height. The results are based on CHAMP (05/2001 to 09/2008), GRACE (04/2006 to 09/2011), and TerraSAR-X (03/2009 to 09/2011) measurements.



## Ausblick

Anwendungen von Navigationssatelliten haben sich seit der vollen Einsatzfähigkeit des U.S.-amerikanischen GPS-Systems im Jahr 1995 rasant in nahezu alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens ausgedehnt. Neben GPS sind derzeit auch bereits Signale des russischen GLONASS-Systems verfügbar. Der Aufbau des europäischen Galileo- und chinesischen COMPASS-Systems wird in absehbarer Zeit ebenfalls abgeschlossen sein. Parallel zu dieser Erweiterung der Sendesatellitensysteme wurden auch die Empfängerinfrastrukturen (z. B. globale und regionale GNSS-Bodennetze, LEO-Satelliten) ausgebaut. Durch diese Entwicklungen aus den Geowissenschaften profitieren boden- und satellitengestützte GNSS-Anwendungen für Atmosphärenfernerkundung, deren Etablierung sich weiter beschleunigen wird. Klimatologische Anwendungen werden dann von den längeren Zeitreihen der Datensätze und den verbesserten Analysemethoden profitieren, die die Ableitung immer zuverlässigerer Informationen über Langzeitveränderungen der Atmosphäre mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erlauben.

## Literatur

- Beyerle, G., Grunwaldt, L., Heise, S., Köhler, W., König, R., Michalak, G., Rothacher, M., Schmidt, T., Wickert, J., Tapley, B. D., Giesinger, B. (2011): First results from the GPS atmosphere sounding experiment TOR aboard the TerraSAR-X satellite. - *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 13, 6687-6699, 10.5194/acp-11-6687-2011.
- Heise, S., Wickert, J., Beyerle, G., Schmidt, T., Reigber, C. (2006): Global monitoring of tropospheric water vapor with GPS radio occultation aboard CHAMP. - *Advances in Space Research*, 37, 12, 2222-2227, 10.1016/j.asr.2005.06.066.
- Schmidt, T., Wickert, J., Beyerle, G., Heise, S. (2008): Global tropopause height trends estimated from GPS radio occultation data. - *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L11806, 10.1029/2008GL034012.
- Schmidt, T., Wickert, J., Haser, A. (2010): Variability of the upper troposphere and lower stratosphere observed with GPS radio occultation bending angles and temperatures. - *Advances in Space Research*, 46, 2, 150-161, 10.1016/j.asr.2010.01.021.
- Shindell, D. (2008): Climate change: cool ozone. - *Nature Geoscience*, 1, 2, 85-86, 10.1038/ngeo115.
- Wickert, J. (2002): Das CHAMP-Radiookkultationsexperiment : Algorithmen, Prozessierungssystem und erste Ergebnisse, (Scientific Technical Report, 02/07), Potsdam, 145 p.
- Wickert, J., Schmidt, T. (2005): Fernerkundung der mittleren Atmosphäre mit GPS-Radiookkultation. - *promet*, 31, 1, 50-52.
- Wickert, J., Gendt, G. (2006): Fernerkundung der Erdatmosphäre mit GPS. - *promet*, 32, 3/4, 176-184.
- Wickert, J., Michalak, G., Schmidt, T., Beyerle, G., Cheng, C. Z., Healy, S. B., Heise, S., Huang, C. Y., Jakowski, N., Köhler, W., Mayer, C., Offiler, D., Ozawa, E., Pavelyev, A. G., Rothacher, M., Tapley, B., Arras, C. (2009): GPS radio occultation: results from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. - *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20, 1, 35-50, 10.3319/TAO.2007.12.26.01(F3C).