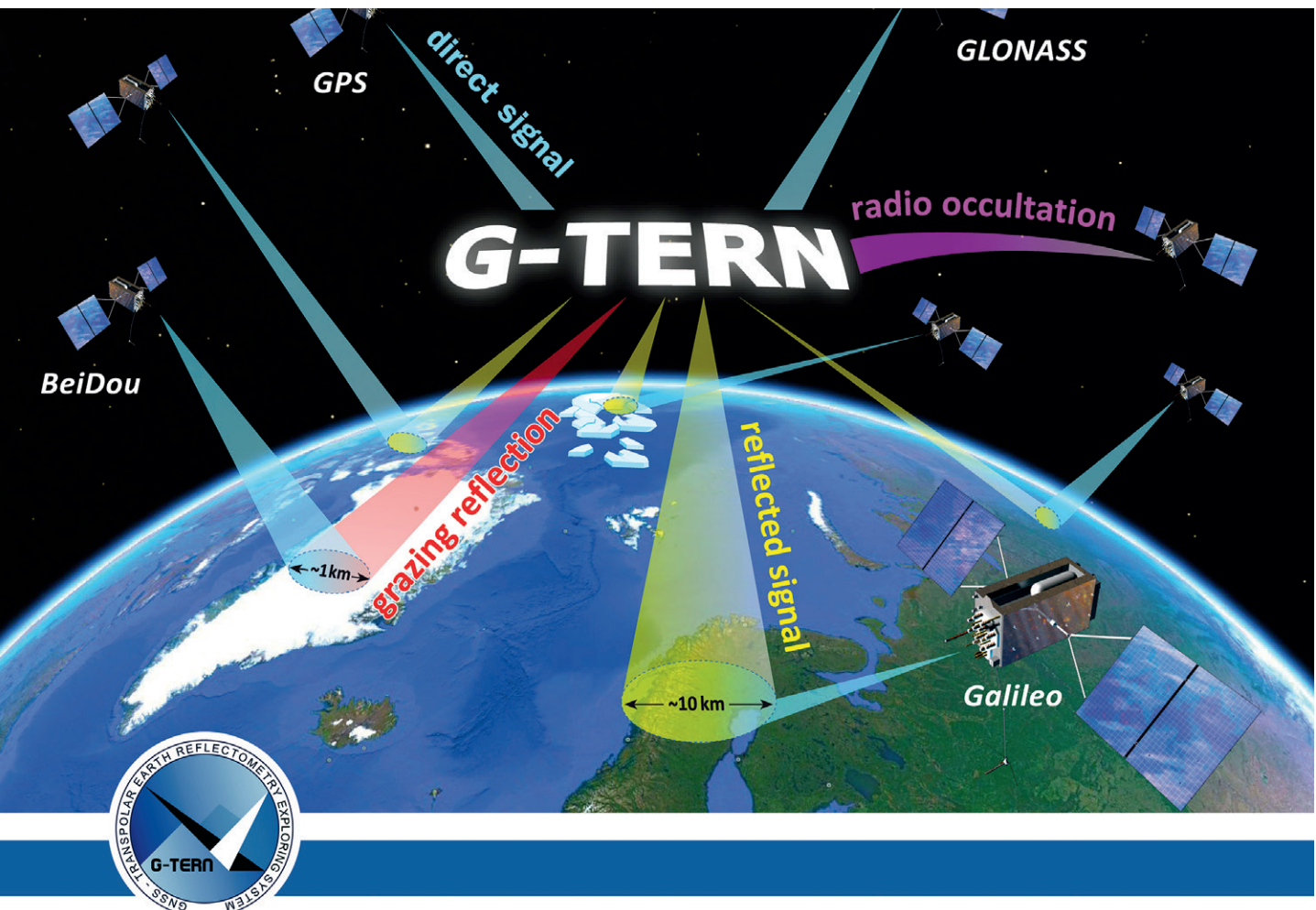


# Erdbeobachtung mit Navigationsatelliten

Jens Wickert, Galina Dick, Maorong Ge, Torsten Schmidt, Maximilian Semmling, Fadwa Alshawaf, Christina Arras, Milad Asgarimehr, Andrey Babeyko, Zhiguo Deng, Stefan Heise, Jürgen Klotz, Xingxing Li, Cuixian Lu, Benjamin Männel, Markus Ramatschi, Tzvetan Simeonov, Sibylle Vey, Florian Zus, Harald Schuh  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Along with cell phones and the internet, satellite navigation is an integral part of everyday life. However, satellite navigation signals provide much more than precise information on user locations. Even before the GPS was declared fully operational in 1995, the potential for these globally and continuously available navigation signals for Earth observation and geoscientific applications was recognized. Such applications include the precise monitoring of continental plate movements with sub-mm/year accuracy (now used in real-time as part of early earthquake warning systems), regional and global atmospheric and ionospheric sounding to improve weather forecasts and climate change predictions, and for monitoring of water, ice, and land surfaces. The Earth observation prospects and related spectrum of applications are continuously growing, mainly stimulated by the transition from a single constellation (GPS) to Multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) with the Russian GLONASS, Chinese BeiDou and European Galileo satellites and by the increasing number of GNSS receivers available both on the ground and aboard Low Earth Orbiting satellites.



Mit der Nutzung von Mobiltelefonen und dem Internet hat auch die Satellitennavigation Einzug in das Alltagsleben gefunden. Sie kann jedoch weit mehr, als genaue Positionen liefern. Schon bevor das amerikanische GPS im Jahr 1995 voll funktionstüchtig war, wurden die global und kontinuierlich verfügbaren Signale für geowissenschaftliche Anwendungen eingesetzt. Beispiele dafür sind das präzise Aufzeichnen der Bewegung der Kontinentalplatten mit einer Genauigkeit von einigen Millimetern pro Jahr, regionale und globale Atmosphärensondierung zur Verbesserung von Wetter- und Klimavorhersagen sowie die Fernerkundung von Wasser-, Eis- und Landoberflächen. Die Möglichkeiten von globalen Navigationssatellitensystemen (englisch Global Navigation Satellite Systems – GNSS) für die Erdbeobachtung und das Spektrum der Anwendungen vergrößern sich kontinuierlich. Diese Entwicklung wird vor allem durch den Übergang vom Einzelsystem GPS zum sogenannten Multi-GNSS stimuliert, welches das russische GLONASS, das chinesische BeiDou und das europäische Galileo mit einbezieht. Zusätzlich steigt die Anzahl von GNSS-Empfängern auf der Erdoberfläche und auf niedrigfliegenden Satelliten stetig an.

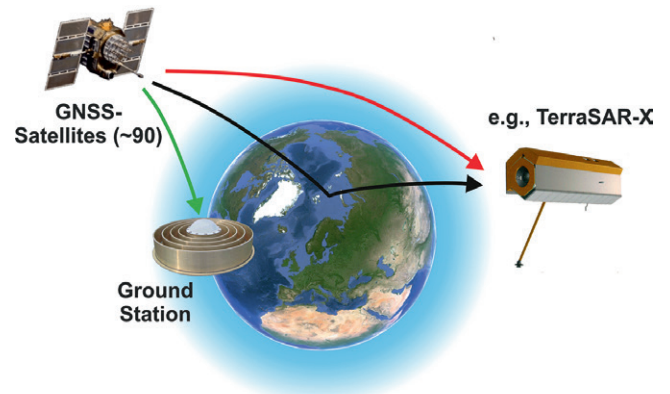
Exemplarisch werden im Folgenden GNSS-Anwendungen für die Erdbeobachtung vorgestellt, die am Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ entwickelt wurden und vor allem in Projekten zur Klimaforschung, zu Naturkatastrophen und zur Verbesserung von Wettervorhersagen zum Einsatz kommen.

## Wasserdampfsondierung mit GNSS-Bodennetzen

Bodengestützte meteorologische Messungen mit GNSS-Verfahren basieren auf der Verfolgung der GNSS-Satelliten auf ihrem Weg von Horizont zu Horizont (Abb. 1). Am GFZ werden beispielsweise Daten von über 350 GNSS-Stationen in Deutschland ausgewertet. Daraus lässt sich der Wasserdampfgehalt in der Luftsäule über der Bodenstation (integrierter Wasserdampf, engl. IWV) ermitteln. Mittlerweile (seit 2006) sind die GNSS-Wasserdampfdaten fester Bestandteil der Datenbasis für die täglichen regionalen Wetter-

*Links: Titelbild des Vorschlags für die neue Satellitenmission G-TERN zur GNSS-Reflektometrie und Atmosphärensondierung, der im Juni 2017 an die Europäische Weltraumbehörde ESA unter Leitung des GFZ im Rahmen des Earth-Explorer-9-Programms eingereicht wurde (Bild: M. Dziggel, GFZ)*

*Left: Title picture of the Earth Explorer 9 Proposal G-TERN for GNSS-Reflectometry and Atmosphere Sounding, which was submitted under lead of GFZ to the European Space Agency in June 2017*



*Abb. 1: Funktionsprinzip GNSS-basierter Methoden zur Fernerkundung der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Die Signale der momentan rund 90 aktiven GNSS-Satelliten werden beim Durchgang durch die Atmosphäre verändert: ihre Strahlen werden gekrümmt und die Wegstrecke dadurch verlängert. Wie groß die Veränderungen sind, hängt von Atmosphäreigenschaften ab, vor allem von Temperatur oder Wasserdampfgehalt. Genutzt werden GNSS-Messungen von Bodenstationen (grün) und Satelliten (z. B. TerraSAR-X, Radiookkultation, rot). Zusätzlich können von der Erdoberfläche reflektierte GNSS-Signale (schwarz) für die Fernerkundung eingesetzt werden.*

*Fig. 1: The principle of GNSS-based atmosphere and Earth surface remote sensing methods. The signals of the ~90 currently active GNSS satellites change as they pass through the atmosphere: they are bent, thus lengthening their path and travel time. The magnitude of these changes depends on atmospheric properties, mainly temperature or water vapor content. GNSS measurements are used by ground stations (green) and satellites (e.g. TerraSAR-X (until 2010), radio occultation; red). In addition, GNSS signals (black) reflected by water, ice and land surfaces can be used for remote sensing.*

vorhersagen in Europa. Dazu werden die Daten des deutschen Stationsnetzes annähernd in Echtzeit verarbeitet und die Ergebnisse innerhalb von nur einer Stunde nach der Messung für die Wetterdienste bereitgestellt. Das Stationsnetz ist so dicht geknüpft, dass sich aus den Messdaten dreidimensionale Verteilungen des Wasserdampfs ableiten lassen (Abb. 2). Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas der Atmosphäre, rund zwei Drittel des natürlichen Treibhauseffekts werden durch ihn verursacht. Untersucht man seine langfristigen Änderungen, lassen sich Schlussfolgerungen im Hinblick auf mögliche Klimaänderungen ziehen (Abb. 3, Ning et al., 2016). Die relativ neuen GNSS-Verfahren sind dabei mittlerweile als eine der Standardmessmethoden anerkannt. Beispielsweise werden am GFZ die GNSS-Daten des GRUAN-Netzes (GCOS Reference Upper Air Network, www.gruan.org) der World Meteorological Organization (WMO) im Rahmen von GCOS (Global Climate Observing System) analysiert. GNSS-Empfänger sind dabei fester Bestandteil der Messausrüstung von gegenwärtig 24 global verteilten GRUAN-Observatorien. Auch für das Deutschlandnetz können Trends klimatologischer Parameter aus IWV-Zeitreihen abgeleitet werden (Alshawaf et al., 2017).



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

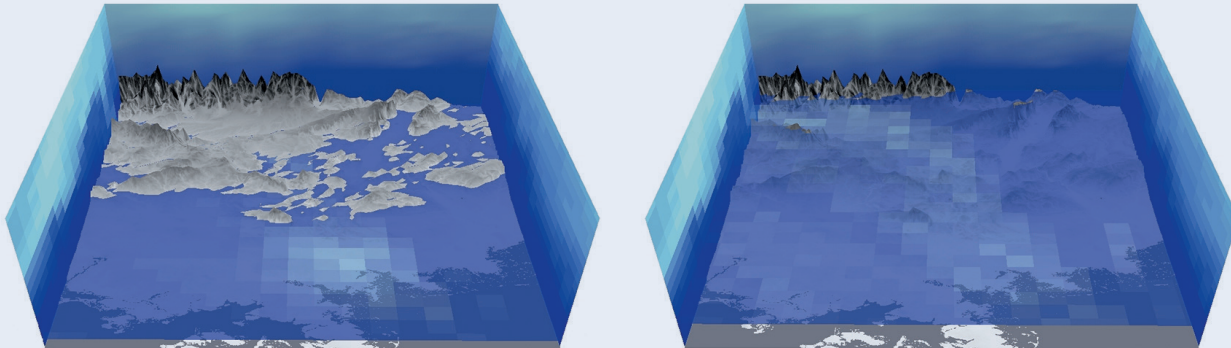


Abb. 2: Blick von Nord auf eine dreidimensionale Wasserdampfverteilung über Deutschland am 6. August 2007, die aus Messungen von rund 350 GPS-Bodenstationen mit tomographischen Verfahren abgeleitet wurde (hinten: Alpen; vorn: Ost- und Nordsee). Dargestellt sind zwei horizontale Schnitte durch die 3D-Verteilung, links in 300 und rechts in 1000 m Höhe. Die Verteilung wird auf einer räumlichen Gitterstruktur mit einer Auflösung von 35 x 35 km in der Horizontalen und rund 300 m in der Vertikalen erstellt. Die Farbtiefe ist proportional zum Wasserdampfgehalt, von Weiß (trocken) bis Dunkelblau (sehr feucht). Die linke und rechte Begrenzung der Abbildungen sind jeweils Vertikalschnitte durch die 3D-Rekonstruktion. Die zeitliche Veränderung dieser Verteilung ist mit Wetterphänomenen gekoppelt und kann zur Wettervorhersage genutzt werden (siehe Bender et al., 2011).

Fig. 2: Three-dimensional water vapor distribution over Germany on 6 August 2007 viewed from the north (background = Alps in Southern Germany, foreground = Baltic and Northern Sea). It was derived from measurements taken by approx. 350 GPS ground stations using tomographic methods. The images show two horizontal sections through the 3D distribution, on the left at an altitude of 300 m and on the right at 1000 m. The distribution is created on a spatial grid structure with a resolution of 35 x 35 km horizontally and approx. 300 m vertically. The color intensity is proportional to the vapor content, from white (dry) to dark blue (very moist). The left and right limits of the images are each vertical sections through the 3D reconstruction. The change of this distribution over time is coupled with weather phenomena and can be used for weather forecasting (see Bender et al., 2011).

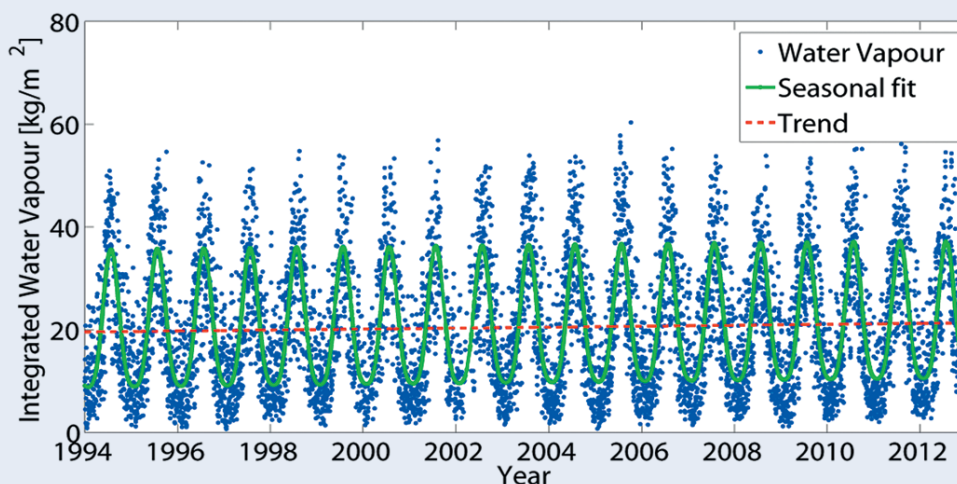


Abb. 3: IWV-Zeitreihe der GNSS-Station Greenbelt (USA). Ein Trend von 0,94 mm/Jahr wurde ermittelt. Der zugehörige Datensatz umfasst rund 800 global verteilte Stationen mit einer Länge von 20 Jahren (Ning et al., 2016).

Fig. 3: IWV time series at the GNSS station Greenbelt (U.S.). A trend of 0.94 mm/year was derived, based on data of a set consisting of ~ 800 stations with a length of 20 years (Ning et al., 2016).

Über 100 Stationen liefern seit mehr als zehn Jahren Daten und können zur Untersuchung regionaler Unterschiede der abgeleiteten Trends und zur Verbesserung von Klimamodellen genutzt werden. In Mitteleuropa wird gegenwärtig im Mittel eine Zunahme des IWV von etwa 1 mm pro Dekade beobachtet.

### Globale Atmosphärensondierung mit GNSS-Radiookkultation

Mit GNSS-Radiookkultationsmessungen (GNSS-RO) von Satelliten können globale Atmosphärenparameter erfasst werden. Dabei befinden sich spezielle GNSS-Empfänger auf Satelliten in erdnahe Umlaufbahn (in rund 300 bis 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, lat. occultare: (etwas) bedecken). Während dieser etwa 1 bis 2 Minuten andauernden Perioden werden die GNSS-Signale mit hoher Frequenz (50 Hz) aufgezeichnet und wird die Brechung der Signalwege (siehe Abb. 1) bestimmt. Mathematische Verfahren erlauben daraus vertikale Profile atmosphärischer Parameter wie Luftdruck, Temperatur, Wasserdampf oder auch der Elektronendichte in größeren Höhen abzuleiten. Haupteigenschaften der Methode sind globale und kontinuierliche Verfügbarkeit, hohe vertikale Auflösung, Unabhängigkeit von Bewölkung und Kalibrationsfreiheit – Schlüsseigenschaften für Anwendungen in der Klimaforschung.

Der internationale Durchbruch der GNSS-RO für operationelle Anwendungen gelang mit dem GFZ-Satelliten CHAMP, der am 15. Juli 2000 gestartet wurde und bis zum Missionsende am 19. September 2010 hochgenaue Beobachtungsdaten lieferte. Die

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., 2012). Das GFZ ist gegenwärtig neben GRACE und in Zukunft GRACE-FO auch für die GNSS-RO an Bord der deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X verantwortlich.

Gegenwärtig werden die GNSS-RO-Ionosphärenparameter zur Untersuchung ionosphärischer Störungen eingesetzt (Arras und Wickert, 2017), die auch zur Untersuchung des Weltraumwetters genutzt werden können (Abb. 4).

### Vermessung von Meeres- und Eisoberflächen mit GNSS-Reflektometrie

GNSS-Signale werden von Wasser- und Eisoberflächen reflektiert. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um die Höhe der reflektierenden Oberfläche mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich zu vermessen, im Fokus stehen dabei topografische Anomalien der Ozeanoberfläche. Die Anomalien entstehen entlang der Ozeanströmungen und der damit verbundenen Variabilität von Temperatur und Salzgehalt. Sofern keine weiteren Phänomene auftreten (z. B. ein Tsunami), haben diese Anomalien eine Amplitude von weniger als 2 m. Am GFZ werden altimetrische GNSS-Reflektometriemessungen im Küstenbereich, von Flugplattformen und von Satelliten aus durchgeführt. Als Beispiel zeigt Abb. 5 Reflexionsereignisse über dem Mittelmeer, die während der GEOHALO-Mission (6. bis 12. Juni 2012) mit dem deutschen Forschungsflugzeug HALO aufgezeichnet wurden. Während der Messung wandert der Reflexionspunkt auf der Wasseroberfläche, womit große

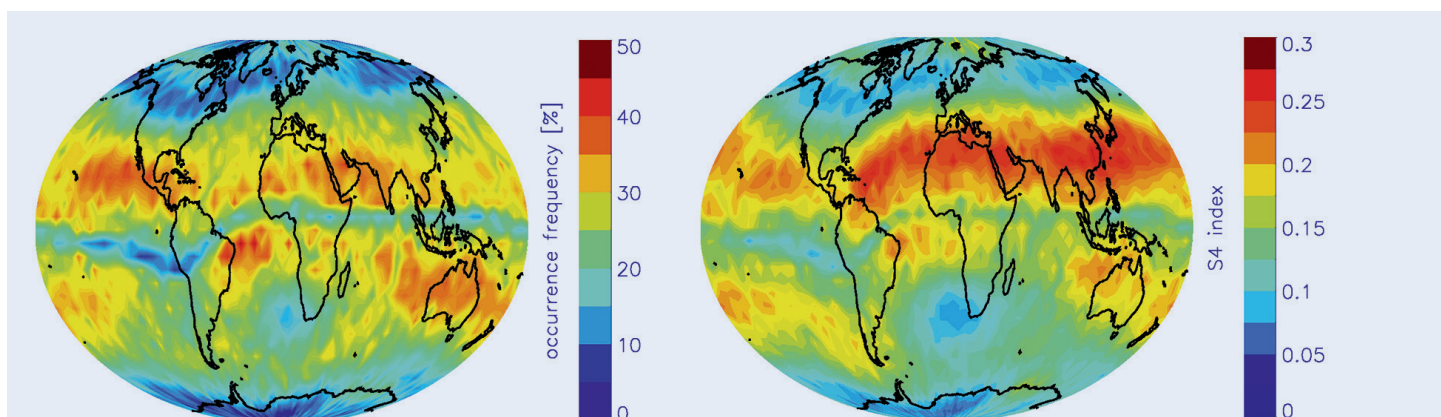


Abb. 4: Globale Auftretenshäufigkeit ionosphärischer Störungen (links) und deren Amplitude (rechts). Beide Abbildungen basieren auf GNSS-RO-Daten der FORMOSAT-3/COSMIC-Satelliten in 2014 und 2015.

Fig. 4: Global occurrence distribution of ionospheric irregularities (left) and intensity (right). Both figures include GNSS RO data provided by the FORMOSAT-3/COSMIC satellite mission during 2014-2015.

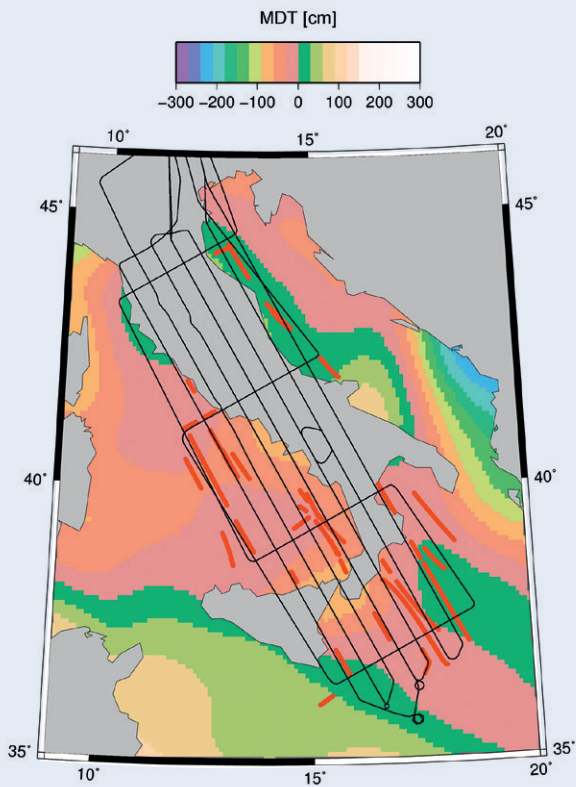


Abb. 5: Karte der mittleren dynamischen Meerestopographie (MDT) für das Mittelmeer nahe der Apenninhalbinsel nach dem globalen DTU-2010-Modell. Die MDT ist auf das EGM-2008-Geoid bezogen. Die HALO-Flugtrajektorien sind als schwarze Linien dargestellt. Die roten Linien zeigen die Spuren der Reflexionsereignisse über dem Mittelmeer.

Fig. 5: Map of the Mean Dynamic ocean Topography (MDT) for the Mediterranean Sea near Apennin peninsula according to the global DTU-2010 model. The MDT refers to the EGM-2008 geoid. The HALO flight trajectory is indicated as black line. The red lines show the tracks of the reflection events over the Mediterranean Sea.

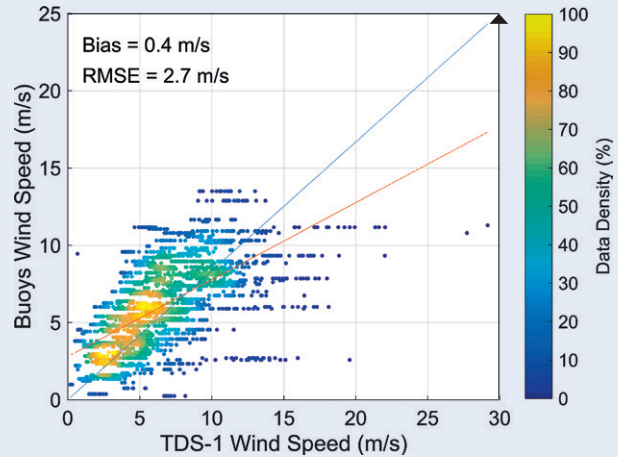


Abb. 6: Vergleich von TDS-1 (GNSS-R) mit bojenbasierten Windgeschwindigkeiten der TAO-, PIRATA- und RAMA-Netzwerke im Zeitraum November 2014 bis März 2016. Abkürzungen siehe engl. Bildunterschrift

Fig. 6: Comparison of TDS-1 (GNSS-R) and buoys wind speeds by Tropical Atmosphere Ocean (TAO) in the Pacific, moored array in the Tropical Atlantic (PIRATA) and the moored array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction (RAMA) for the period November 2014 to March 2016



Abb. 7: Im Vordergrund: Geodätische GNSS-Bodenstation in Sutherland, Südafrika. Im Hintergrund links: klassische Bodenfeuchtesensoren (Foto: M. Ramatschi, GFZ)

Fig. 7: Foreground: Geodetic GNSS ground station in Sutherland, South Africa. Background left: traditional soil moisture sensors.

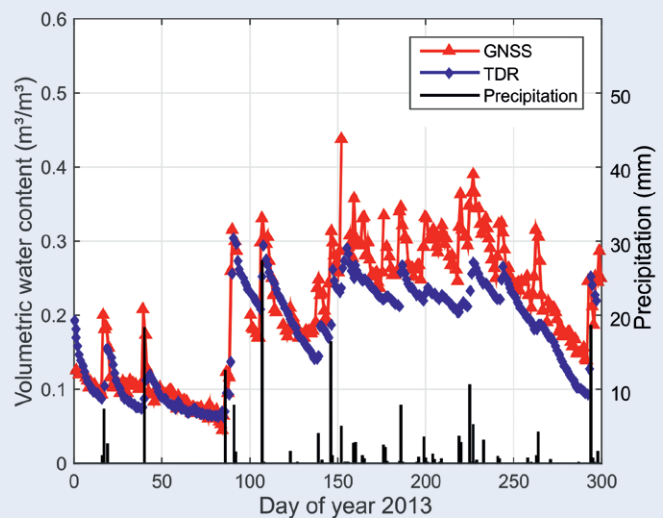


Abb. 8: Variation der Bodenfeuchte in Sutherland, Südafrika, abgeleitet aus GNSS-Daten (rot) und TDR-Sensoren (blau). Schwarze Linien markieren Niederschlagsereignisse.

Fig. 8: Soil moisture variation in Sutherland, South Africa, derived from GNSS data (red) and TDR sensors (blue). Black bars indicate precipitation events.

Flächen mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich vermessen werden können. Ungünstige Beobachtungsgeometrien und atmosphärische Ausbreitungsfehler begrenzen die Genauigkeit der Methode (Semmling *et al.*, 2014).

Weiterhin ist das GFZ an der Entwicklung von weltraumgestützten GNSS-Reflektometrieexperimenten (GNSS-R) zur globalen Vermessung von Meeres- und Eisoberflächen in führender Position beteiligt (GEROS-ISS, G-TERN; Wickert *et al.*, 2016, 2017). Eine mögliche Anwendung ist der Einsatz als Bestandteil zukünftiger satellitengestützter Tsunami-Frühwarnsysteme (Stosius *et al.*, 2010).

Neben der Höhe der Meeresoberfläche können aus den reflektierten Signalen auch Informationen über deren Rauigkeit abgeleitet werden. Diese ist wiederum mit Eigenschaften wie der Wellenhöhe verbunden, die von der Windgeschwindigkeit abhängt. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich von Windgeschwindigkeiten, abgeleitet aus GNSS-Reflektometriemessungen des experimentellen englischen Satelliten TDS-1 (TechDemoSat-1) mit Vorortmessungen von Bojen. Obwohl die Daten von TDS-1 mit einfacher GNSS-Ausrüstung aufgezeichnet wurden, stimmen sie gut mit den Bojendaten überein. Von zukünftigen Satellitenmissionen wird eine bessere Datenqualität erwartet. Der große Vorteil der GNSS-Messungen im L-Band im Vergleich zu etablierten Windmessungen mit Satelliten (Scatterometer im C- und Ku-Band) ist die Möglichkeit der Beobachtung auch bei Bewölkung und starkem Regen, womit z. B. auch Messdaten im Inneren von Wirbelstürmen oder während anderer Extremwetterereignisse gewonnen werden können.

### Landoberflächenmonitoring mit GNSS-Bodenstationen

Eine wichtige neuartige GNSS-Erdbbeobachtungsanwendung mit bereits bestehenden Infrastrukturen ist die Ableitung von Landoberflächenparametern in der Nähe von GNSS-Bodenstationen (Abb. 7). Abbildung 8 zeigt dafür als Beispiel den zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchte in der Nähe der vom GFZ betriebenen Station Sutherland, Südafrika, im Jahr 2014. Die Analyse basiert auf der Auswertung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) der GNSS-Signale, aus der deren Eindringtiefe in den Erdboden abgeleitet werden kann. Diese hängt wiederum von der Bodenfeuchte ab und kann somit gemessen werden. Die GNSS-basierten Bodenfeuchtemessungen geben sehr gut die Niederschlagsereignisse und die nachfolgende Verdunstung wieder und stimmen mit den Messungen der unabhängigen In-situ-TDR-Sensoren (Time Domain Reflectometry) im Bereich von 6 Vol. % überein (Vey *et al.*, 2016a). GNSS-Beobachtungen haben damit das Potenzial, an zahlreichen der weltweit verteilten Stationen das globale Beobachtungsnetz für Bodenfeuchte zu verdichten. Mit der gleichen Auswertemethode können auch Schneehöhen im Umfeld der Station auf wenige Zentimeter genau bestimmt werden (Vey *et al.*, 2016b).

### Messung der Deformation der Erdoberfläche in Echtzeit

Bodengestützte GNSS-Beobachtungen in Echtzeit bilden das Rückgrat von komplexen technischen Systemen zur Aufzeichnung von seismischen Deformationen der Erdoberfläche als Bestandteil von Frühwarnsystemen (Babeyko *et al.*, 2013). Die GNSS-Komponenten für solche Systeme (Ge *et al.*, 2012) werden kontinuierlich weiterentwickelt und erfahren durch den gegenwärtigen Übergang vom Einzelsystem GPS zu Multi-GNSS mit allen derzeit verfügbaren Navigationssatelliten einen Aufschwung, der mit einer Erhöhung der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit verbunden ist (Li *et al.*, 2015). Am GFZ wurde ein sogenanntes RTPP-System (Echtzeit-Positionierungssystem) entwickelt, das als Basis für Positionierungs-, aber auch geowissenschaftliche Echtzeitanwendungen dient (Abb. 9). Hauptziel des RTPP ist die Bereitstellung von spezifischen Korrekturinformationen, um die Genauigkeit und schnelle Verfügbarkeit der Positionierungslösungen deutlich zu verbessern. Abbildung 10 zeigt als Beispiel eine Anwendung mit simulierten GNSS-Echtzeitdaten für die Ableitung der Magnitude und der maximalen Plattenverschiebung des Illapel-Erdbebens vom September 2015 in Chile mit mathematischen Inversionsmodellen (Chen *et al.*, 2016). Für das verwendete Verfahren ergeben sich leicht unterschiedliche Werte für die Nutzung von nur GPS-Daten (Magnitude 8,22; maximale und mittlere Verschiebung 3,91 m und 0,45 m) im Vergleich zur kombinierten Nutzung von GPS und GLONASS (Magnitude 8,25; maximale und mittlere Verschiebung 4,50 m und 0,57 m). Eine der möglichen Ursachen für diesen Unterschied ist eine Verbesserung der Analysen durch Hinzunahme der GLONASS-Daten.

### Ausblick

GNSS-Anwendungen haben sich in den vergangenen Jahren auch dank intensiver Forschungsarbeiten am GFZ zu einer vielseitigen Ergänzung der bestehenden Erdbbeobachtungsverfahren entwickelt. In diesem Beitrag wurden Anwendungen vorgestellt, die am GFZ entwickelt und zum Teil auch operationell eingesetzt werden. Dazu gehören boden- und satellitengestützte Verfahren zur Atmosphärensondierung, die bereits einen ausgereiften Entwicklungsgrad haben und weltweit anerkannt sind. Hauptanwendungen sind hierbei Wettervorhersage, Klimaforschung und Weltraumwetter. Operationelle Systeme zur Echtzeitdeformationsanalyse sind ebenso etabliert und bereits Bestandteil von Frühwarnsystemen. Die GNSS-Reflektometrie besitzt ein hohes Potenzial für Wettervorhersage, Frühwarnsysteme und Klimaforschung. Sie ist derzeit noch in der Entwicklungsphase. Der Übergang vom Einzelnavigationssystem GPS zum Multi-GNSS erweitert mit GLONASS, Galileo und BeiDou erhöht Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit der GNSS-Anwendungen zur Erdbbeobachtung und verbessert zusätzlich die räumliche und zeitliche Auflösung der Messungen. Die Weiterentwicklung der vielfältigen geophysikalischen Multi-GNSS-Anwendungen mit Echtzeitfähigkeit wird deswegen zusammen mit dem Einsatz der GNSS-Reflektometrie für die Fernerkundung von Wasser-, Eis-, und Landoberflächen von Satelliten aus in den kommenden Jahren im Mittelpunkt der GFZ-Forschungsarbeiten stehen.

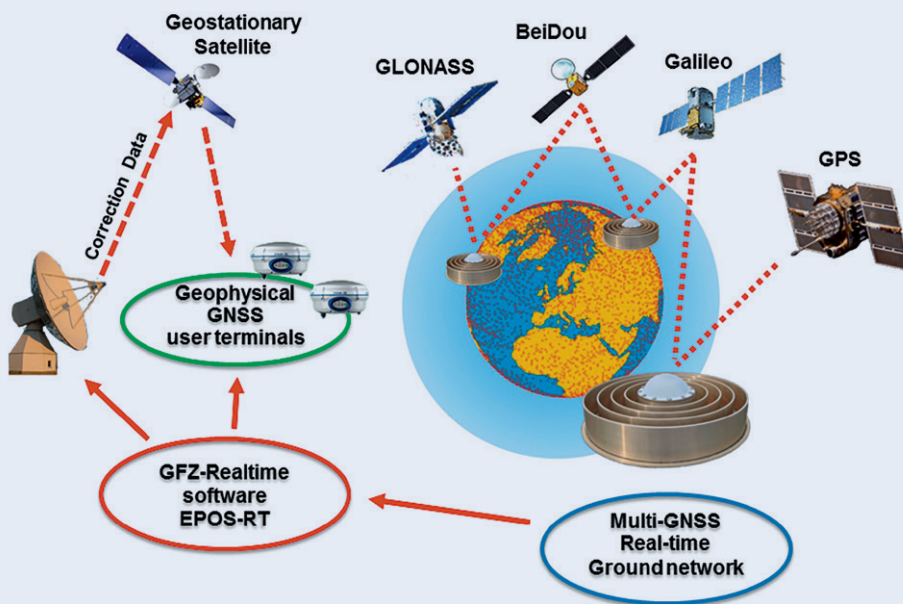


Abb. 9: Übersicht des GNSS-Echtzeit-prozessierungssystems, das am GFZ entwickelt wurde. Daten eines globalen Multi-GNSS-Bodennetzes werden mit der EPOS-RT-Software analysiert. Die resultierenden Korrekturdaten werden entweder direkt über das Internet oder über geostationäre Satelliten an die Nutzerterminals im Feld übertragen.

Fig. 9: Overview on the GNSS RealTime Precise Positioning (RTPP) system developed by GFZ. Data from a global Multi-GNSS ground network are analysed using the EPOS-RT software. Resulting correction data are transmitted either directly or via geostationary satellite to the user terminal in the field.

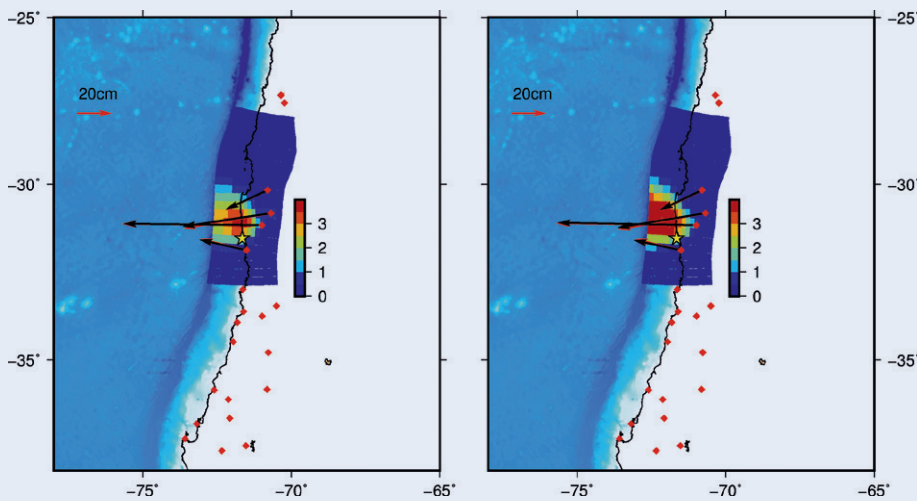


Abb. 10: Illapel-Erdbeben (Chile, 2015). Ergebnis von Slip-Inversionsrechnungen aus GPS-Daten (links) und GPS/GLONASS-Daten (rechts). Die roten Vektoren kennzeichnen die beobachteten ko-seismischen statischen Offsets und die schwarzen repräsentieren die synthetischen Werte (aus Chen et al., 2016, Abb. 13, Geophysical Journal International, published by Oxford University Press on behalf of The Royal Astronomical Society)

Fig. 10: Slip inversions based on co-seismic displacements from GPS (left) and GPS/GLONASS (right). The red vectors denote observed co-seismic static offsets, and the black ones represent synthetic values (from Chen et al., 2016, Fig. 13, Geophysical Journal International, published by Oxford University Press on behalf of The Royal Astronomical Society)

## Literatur

- Alshawaf, F., Balidakis, K., Dick, G., Heise, S., Wickert, J. (2017): Estimating trends in atmospheric water vapor and temperature time series over Germany. - *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, pp. 3117–3132. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-10-3117-2017>
- Arras, C., Wickert, J. (2017 online): Estimation of ionospheric sporadic E intensities from GPS radio occultation measurements. - *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.006>
- Babeyko, A. Y., Hoehner, A., Ge, M., Wang, R., Sobolev, S. V. (2013): Schnelle und zuverlässige Tsunami-Frühwarnung mit hochpräziser Echtzeit-GNSS-Prozessierung und gleichzeitiger Simulation. - *System Erde*, 3, 1, pp. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.03.01.6>
- Bender, M., Stosius, R., Zus, F., Dick, G., Wickert, J., Raabe, A. (2011): GNSS water vapour tomography – Expected improvements by combining GPS, GLONASS and Galileo observations. - *Advances in Space Research*, 47, 5, pp. 886–897. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.09.011>
- Chen, K., Ge, M., Babeyko, A. Y., Li, X., Diao, F., Tu, R. (2016): Retrieving real-time co-seismic displacements using GPS/GLONASS: a preliminary report from the September 2015 Mw 8.3 Illapel earthquake in Chile. - *Geophysical Journal International*, 206, 2, pp. 941–953. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw190>
- Ge, M., Chen, J., Dousa, J., Gendt, G., Wickert, J. (2012): A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime. - *GPS Solutions*, 16, 1, pp. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0206-z>
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., Schuh, H. (2015): Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. - *Journal of Geodesy*, 89, 6, pp. 607–635. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0802-8>
- Ning, T., Wickert, J., Deng, Z., Heise, S., Dick, G., Vey, S., Schöne, T. (2016): Homogenized time series of the atmospheric water vapor content obtained from the GNSS reprocessed data. - *Journal of Climate*, 29, 7, pp. 2443–2456. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0158.1>
- Saynisch, J., Semmling, M., Wickert, J., Thomas, M. (2015): Potential of space-borne GNSS reflectometry to constrain simulations of the ocean circulation. - *Ocean Dynamics*, 65, 11, pp. 1441–1460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0886-y>
- Semmling, M., Beckheinrich, J., Wickert, J., Beyerle, G., Schön, S., Fabra, F., Pflug, H., He, K., Schwabe, J., Scheinert, M. (2014): Sea surface topography retrieved from GNSS reflectometry phase data of the GEOHALO flight mission. - *Geophysical Research Letters*, 41, 3, pp. 954–960. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013GL058725>
- Stosius, R., Beyerle, G., Hoehner, A., Wickert, J., Lauterjung, J. (2011): The impact on tsunami detection from space using GNSS-reflectometry when combining GPS with GLONASS and Galileo on GNSS-Reflectometry tsunami detection from space. - *Advances in Space Research*, 47, 5, pp. 843–853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.09.022>
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T., Thoss, H., Ramatschi, M. (2016a): Monitoring Snow Depth by GNSS Reflectometry in Built-up Areas: A Case Study for Wettzell, Germany. - *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9, 10, pp. 4809–4816. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2516041>
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T., Ramatschi, M. (2016b): Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. - *GPS Solutions*, 20, 4, pp. 641–654. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0474-0>
- Wickert, J., Gendt, G. (2006): Fernerkundung der Erdatmosphäre mit GPS. - *Promet: meteorologische Fortbildung*, 32, 3/4, pp. 176–184.
- Wickert, J., Schmidt, T., Heise, S., Arras, C., Beyerle, G., Zus, F. (2012): GNSS-Radiookkultation: globale atmosphärische Klimauntersuchungen mit Signalen von Navigationssatelliten. - *System Erde*, 2, 1, pp. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.02.01.6>
- Wickert, J., Cardellach, E., Martín-Neira, M., Bandeiras, J., Bertino, L., Andersen, O. B., Camps, A., Catarino, N., Chapron, B., Fabra, F., Floury, N., Foti, G., Gommenginger, C., Hatton, J., Høeg, P., Jäggi, A., Kern, M., Lee, T., Li, Z., Park, H., Pierdicca, N., Ressler, G., Rius, A., Roselló, J., Saynisch, J., Soulat, F., Shum, C. K., Semmling, M., Sousa, A., Xi, J., Zufada, C. (2016): GEROS-ISS: GNSS Reflectometry, Radio Occultation, and Scatterometry Onboard the International Space Station. - *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9, 10, pp. 4552–4581. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2614428>
- Wickert, J., Cardellach, E., Baggen, R., Benito, J., Camps, A., Catarinho, N., Chapron, B., Flato, G., Fragner, H., Gabarró, C., Gommenginger, C., Haas, C., Healy, S., Hernandez-Pajares, M., Høeg, P., Jäggi, A., Kainulainen, J., Abbas Khan, S., Lemke, N., Nghiem, S.V., Pierdicca, N., Portabella, M., Rautiainen, K., Rius, A., Sasgen, I., Semmling, M., Shum, C.K., Soulat, F., Steiner, A.K., Tailhades, S., Thomas, M., Vilaseca, R., Zufada, C. (2017): G-TERN: GNSS Transpolar Earth Reflectometry monitoring system, Proposal for an Earth Explorer 9 Mission, European Space Agency.