

GNSS-Arbeiten am GFZ zum Monitoring des Systems Erde

GNSS Research at GFZ for Monitoring the Earth System

Harald Schuh, Jens Wickert, Galina Dick, Maorong Ge, Markus Ramatschi, Xingxing Li,
Zhiguo Deng, Fadwa Alshawaf, Christina Arras, Benjamin Männel

Auch 100 Jahre nach dem Tod des berühmten Geodäten Friedrich Robert Helmert, dem ehemaligen Direktor des Geodätischen Instituts in Potsdam, wird auf dem Telegrafenberg geodätische Forschung betrieben. Im Beitrag gehen die Autoren hauptsächlich auf eigene Beispiele der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der GNSS (Global Navigation Satellite System) innerhalb der Sektion 1.1 „Geodätische Weltraumverfahren“ des Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, ein. Das in den 1980er-Jahren entwickelte GPS (Global Positioning System) lässt sich nicht nur für Navigationsaufgaben verwenden, sondern kann auch für geodätische Zwecke, wie die hochgenaue Positionsbestimmung, eingesetzt werden. Hinzugekommen sind weitere Parametergruppen, die mit GPS bestimmt werden können, wie Troposphärenparameter und Ionosphärenmodelle. Da inzwischen ein Datenzeitraum von über 20 Jahren vorliegt, erlaubt dies klimatologische Untersuchungen. Das GFZ liefert als Analysezentrum des Internationalen GNSS Service (IGS) einen wichtigen Beitrag im weltweiten Verbund zur Bestimmung von Bahnparametern der GNSS-Satelliten. Die hochaktuellen Echtzeitanwendungen von GNSS bieten zusätzliche Perspektiven, wenn man z. B. an das Monitoring von Erdbeben denkt. Durch die Gesamtheit der GNSS kann eine deutlich höhere Anzahl von Satelliten beobachtet werden, was eine Vielzahl neuer Möglichkeiten für die Erforschung des Erdsystems liefert. Auch reflektierte Signale können dabei interessante geowissenschaftliche Erkenntnisse liefern.

Schlüsselwörter: Geodäsie, GPS, GNSS, GFZ, F. R. Helmert

Also 100 years after the death of the famous geodesist Friedrich Robert Helmert, the former director of the Geodetic Institute in Potsdam, geodetic research is conducted on the Telegrafenberg. In the article, the authors mainly focus on their own examples of research and development in the field of GNSS (Global Navigation Satellite System) within section 1.1 “Space Geodetic Techniques” of the Helmholtz Center Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences. The GPS (Global Positioning System), developed in the 80s of the last century, can be employed not only for navigational tasks, but also for geodetic purposes such as highly precise positioning. Added to this are further parameter groups, which can be determined by GPS, such as tropospheric parameters and ionospheric models. Because the data are available now for a time period of more than 20 years, climatological studies became feasible. As an Analysis Center of the IGS (International GNSS Service), the GFZ provides important contributions in the worldwide alliance for the determination of orbit parameters of GNSS satellites. The high-level real-time applications of GNSS provide additional perspectives, for example, for the monitoring of earthquakes. Due to the growing amount of GNSS, a significantly higher number of satellites can be observed, which

provides a multitude of new possibilities for the investigation of the Earth system. Reflected signals can also yield interesting geoscientific findings.

Keywords: Geodesy, GPS, GNSS, GFZ, F. R. Helmert

1 EINLEITUNG

Auch 100 Jahre nach dem Tod des berühmten Geodäten Friedrich Robert Helmert, dem ehemaligen Direktor des Geodätischen Instituts in Potsdam, wird auf dem Telegrafenberg geodätische Forschung betrieben. Am 6. April 2017 wurde das 125-jährige Jubiläum des Institutsgebäudes gefeiert (Abb. 1), in dem Helmert über 30 Jahre lang viele seiner bahnbrechenden wissenschaftlichen Leistungen erbrachte. Ähnlich wie zu Zeiten Helmerts beschäftigen sich die Forscher am Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, mit Fragestellungen der Physikalischen und Mathematischen Geodäsie. Globales Monitoring und die Auswertung und Interpretation der großen anfallenden Datenmengen spielen nach wie vor eine wichtige Rolle. Im Rahmen der interdisziplinären Forschung am GFZ fällt der durch die Geodäsie geleiteten Quantifizierung geodynamischer Phänomene eine besondere Bedeutung zu. Seit Gründung des GFZ vor 25 Jahren besitzen die globalen Navigationssatellitensysteme (Global Navigation Satellite System – GNSS) im Rahmen geowissenschaftlicher Fragestellungen im globalen und regionalen Maßstab eine herausgehobene Position. Die Autoren gehen im Folgenden auf eigene Beispiele der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im GNSS-Bereich innerhalb der Sektion 1.1 „Geodätische Weltraumverfahren“ des GFZ ein. Der Beitrag ist eine wesentliche Erweiterung, Aktualisierung und Ergänzung des kürzlich erschienenen Beitrags von /Schuh et al. 2017/.

2 DAS IGS-ANALYSEZENTRUM AM GFZ

Die Bereitstellung von hochqualitativen GNSS-Daten und -Produkten ist die Hauptaufgabe des 1994 als Dienst der International Association of Geodesy (IAG) gegründeten International GNSS Service (IGS) /Dow et al. 2009/. Das GFZ beteiligt sich an diesem Dienst als Analysezentrum, als Datenzentrum und betreibt ein Netz



Abb. 1 | Das Geodätische Institut auf dem Potsdamer Telegrafenberg zur 125-Jahrfeier am 6. April 2017 /Bild: C. Georgi, GFZ/

¹ <http://semisys.gfz-potsdam.de/semisys/index.php> (04/2017).

von derzeit 23 weltweit verteilten Multi-GNSS-Referenzstationen, die Teil des IGS-Stationsnetzes sind (siehe Abschnitt 4).

Aktuell trägt das GFZ zu den drei IGS-Produktlinien ultra-rapid, rapid und final bei. Entsprechend den Vereinbarungen innerhalb des IGS umfassen diese Prozessierungen derzeit nur GPS und GLONASS. Zur Generierung der verschiedenen Produkte werden die Beobachtungen von im Mittel 95 (ultra-rapid), 130 (rapid) und 200 (final) global verteilten Stationen benutzt. Die Metadaten dieser (und anderer) Stationen werden am GFZ zentral in der Metadatenbank semisys¹ verwaltet. Die GFZ-intern entwickelte Analysesoftware in ihrer aktuellen Version EPOS.P8 wird dabei verwendet, um alle benötigten geodätischen Produkte zu erstellen /Fritsche et al. 2016/. Den Ausgangspunkt für die Prozessierung bilden undifferenzierte GNSS-Beobachtungen auf zwei Frequenzen, aus denen zur Reduktion des ionosphärischen Laufzeitfehlers die ionosphärenfreie Linearkombination gebildet wird. Im Rahmen der Vorauswertung werden zum einen die Daten gesäubert (Detektion von Ausreißern und cycle slips) und zum anderen a priori Satellitenbahnen bereitgestellt. Die Bestimmung der Unbekannten erfolgt dann im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung. In einem Zwischenschritt werden die Phasenmehrdeutigkeiten mit dem in /Ge et al. 2005/ beschriebenen Verfahren auf ihre ganzzahligen Werte festgesetzt. Im Rahmen operationeller Auswertungen werden präzise Stationskoordinaten, Satellitenbahnen, Satellitenuhrkorrekturen sowie Erdrotationsparameter bestimmt. Tab. 1 gibt einen detaillierten

Lösungstyp	Produkte	Auflösung	Verfügbarkeit
final	Satellitenbahnen	24-h-Bogen	14 Tage
	Uhrkorrekturen	5 min / 30 s	
	Erdrotation	PM, PM Rate, LOD	
	Troposphäre*	stündlich aufgelöst	
rapid	Satellitenbahnen	24-h-Bogen	24 Stunden
	Uhrkorrekturen	5 min / 30 s	
	Erdrotation	PM, PM Rate, LOD	
ultra-rapid	Satellitenbahnen	24-h-Bogen	drei Stunden
			Echtzeit
	Uhrkorrekturen	5 min	drei Stunden
			Echtzeit
	Erdrotation	PM, PM Rate, LOD	drei Stunden
			Echtzeit

Tab. 1 | IGS-Produkte, deren Genauigkeiten und Verfügbarkeiten; die Zeile für ultra-rapid ist unterteilt in den beobachteten (oben) und den prädierten Teil (unten)

* dieses Produkt enthält die troposphärischen Laufzeitverzögerungen im Zenit; PM = Polar Motion, PM Rate = Rate Polar Motion, LOD = Length of Day

Überblick über die entsprechenden vom IGS-Analysezentrum am GFZ ausgegebenen Produkte.

Neben den offiziellen IGS-Produkten stellt das Analysezentrum im Rahmen der IGS-Multi-GNSS-Aktivitäten /Montenbruck et al. 2017/ auch Satellitenpositionen und Satellitenuhrkorrekturen für GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou und QZSS bereit /Deng et al. 2016/. Nähere Informationen sind in Abschnitt 3.3 zu finden.

3 GLOBALE GNSS-DATEN-PROZESSIERUNG AM GFZ

Im Rahmen geowissenschaftlicher Fragestellungen im globalen und regionalen Maßstab besitzt GNSS als Beobachtungstechnik seit etlichen Jahren eine herausgehobene Position. Diese Stellung ergibt sich nicht nur aus der erreichbaren Genauigkeit, sondern auch aus der Vielseitigkeit der Einsatzgebiete und nicht zuletzt aus den vergleichsweise günstigen Anschaffungs- und Betriebskosten. Am GFZ werden GNSS-Daten beispielsweise in unterschiedlichsten Anwendungen in den internationalen Projekten IPOC, GCO, GITEWS, IGS, PBO und TIGA verwendet (Abb. 2). Im Folgenden sind drei dieser Projekte in Bezug auf die Prozessierung der GNSS-Daten beschrieben.

3.1 Integriertes Plattenrandobservatorium Chile (IPOC)

Das Integrierte Plattenrandobservatorium Chile (IPOC) ist eine Kooperation europäischer und amerikanischer Einrichtungen und Universitäten (u. a. GFZ, IGP, GEOMAR, CALTECH), welche am Plattenrand an Chiles Küste ein dezentrales Instrumentensystem aufgebaut haben, um Erdbeben, Deformationen, Magnetismus und Oberflächenprozesse zu beobachten. In der Subduktionszone zwischen Südamerikanischer und Nazca-Platte wird mehr als ein Viertel der seismischen Energie weltweit freigesetzt. Die Region eignet sich aufgrund ihrer hohen Aktivität zum Studium seismischer und klimatischer Wechselwirkungen. Mit GPS und anderen Methoden können Veränderungen hochgenau und zeitnah ausgewertet werden /Melnick et al. 2017/ (Abb. 3). Das GPS lieferte außerdem Langzeitdaten der vergangenen Jahrzehnte, aus denen die genauen Bebenabfolgen herausgelesen werden konnten.

3.2 TIGA-Reprozessierung

Die Tide Gauge Benchmark Monitoring Working Group (TIGA-WG) des IGS analysiert kontinuierlich GNSS-Daten von Stationen in der Nähe von Pegelmess-Stationen (Tide Gauges). Durch die Bestimmung von Höhenveränderungen können Schwankungen des Meeresspiegels überwacht werden. TIGA trägt aber auch zur Kalibrierung von Satellitenaltimetern und zur Vereinheitlichung von Höhensystemen bei. Das GFZ betreibt ein TIGA-Analysezentrum

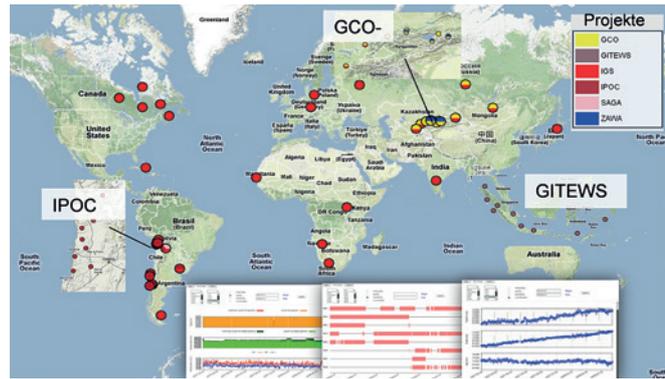


Abb. 2 | Datenbank und Webseiten-System für globale GNSS-Datenprozessierung

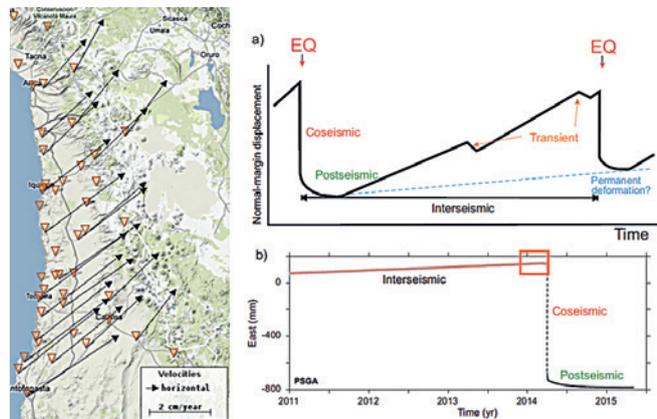


Abb. 3 | Mit GPS beobachtete Erdbebenzyklen an Chiles Plattengrenze



Abb. 4 | Globale pegelnahe GNSS-Stationen

und wertet in diesem Rahmen die Daten von 1994 bis 2015 an weltweit über 600 pegelnahe GNSS-Stationen aus (Abb. 4).

3.3 MGEX-Analysen

Das Multi-GNSS-Experiment (MGEX) wurde vom IGS 2012 gestartet. Im MGEX werden alle verfügbaren Signale der neuen GNSS-Navigationsatelliten gemessen und analysiert. Zurzeit arbeiten sieben IGS-Analysezentren an der Generierung konsistenter präziser Bahnen und Uhrenkorrekturen der neuen Satelliten /Montenbruck

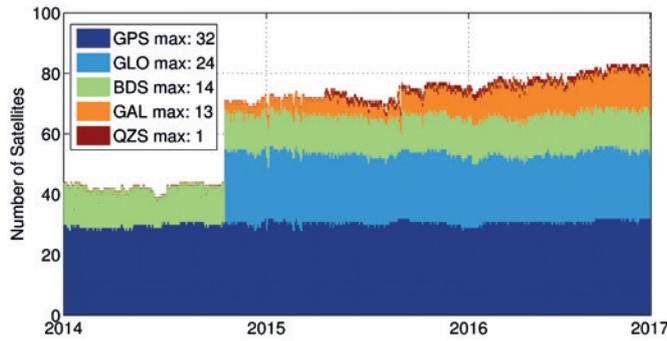


Abb. 5 | Anzahl der am GFZ ausgewerteten GNSS-Satelliten (2017 maximal 83 Satelliten)

et al. 2017/. Als eines dieser sieben Analysezentren wertet das GFZ alle GNSS-Satelliten in nahezu Echtzeit (Near Real-Time – NRT) und im Post-Processing aus /Deng et al. 2016/. In unserer Auswertung werden inzwischen damit insgesamt beinahe 90 Satelliten integriert und weltweit erstmalig werden so alle für die globale Navigation bestimmten Satellitenbahnen- und -uhrenparameter einheitlich der öffentlichen Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt (Abb. 5).

Durch die Verbindung der Multi-GNSS-Systeme werden – verglichen mit den jeweiligen Einzelsystemen – die Genauigkeit und die Verfügbarkeit der Positionierung erhöht. Das Signal der Satelliten wird in schwierigen Messumgebungen (z. B. engen Stadtschluchten) häufig gestört. Durch die Verwendung von Multi-GNSS erhöht sich die Zahl der zur Verfügung stehenden Signale und Nutzer können sich die beste Signalkombination „aussuchen“. Darüber hinaus vergrößert die Verbindung der verschiedenen Systeme die Zeiträume und die Gebiete, für die ausreichend Signale ohne Unterbrechung zur Navigation zur Verfügung stehen. Bei der Atmosphärensondierung mithilfe von Multi-GNSS verbessert die erhöhte Signalanzahl die räumliche Auflösung der Wasserdampf-Beobachtungen.

4 GLOBALES REFERENZSTATIONSNETZ

Das globale GPS-Bodennetz wurde vom GFZ eingerichtet, um internationale geodynamische Dienste und eigene Großprojekte zu unterstützen. Die erste Station wurde im Jahr 1994 in Kitab (Usbekistan) in Betrieb genommen und bis heute fungiert diese als „Core-

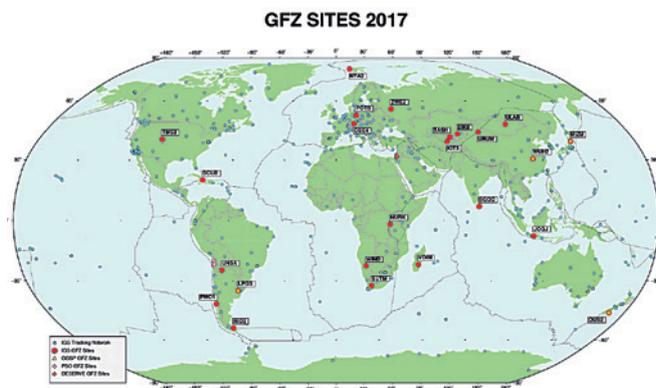


Abb. 6 | Permanentes Stationsnetz des GFZ

Station“ des IGS. In den darauf folgenden Jahren wurden weitere Permanentstationen in Zentralasien, Südamerika und Südostasien eingerichtet. Gegenwärtig besteht das globale GPS-Bodennetz des GFZ aus 59 kontinuierlich arbeitenden Stationen (Abb. 6) und unterstützt damit zahlreiche wissenschaftliche Vorhaben.

Um die hohen Anforderungen für die Datenverfügbarkeit zu erfüllen, wurde eine einheitliche Hardware-Architektur implementiert. Standardmäßig besteht jede Bodenstation aus GNSS-Empfänger, meteorologischem Sensor, Datenerfassungssystem (Linux Embedded System), Power Management, Interfaces für die Datenübertragung und Fernwartung der Subsysteme und zugehörigen Software-Komponenten. Diese Software-Komponenten wurden am GFZ entwickelt und werden ständig erweitert, um den Anforderungen neuer Hardware zu genügen.

Neben den permanenten Stationen werden für spezielle Projektschwerpunkte (z. B. Bodenfeuchte- und Schneehöhenbestimmung mittels GNSS) Kampagnen durchgeführt. Dabei kommen optimierte Hardwarekomponenten zum Einsatz, die für den Betrieb mit Solarzellen bzw. Brennstoffzellen geeignet sind.

5 HOCHGENAUE GNSS-POSITIONSBESTIMMUNG UND MULTI-GNSS-ÜBERWACHUNG VON NATURGEFAHREN IN ECHTZEIT

Die zwei Hauptstrategien, um in Echtzeit hochgenaue Positionierungsdienste bereitzustellen, sind einmal die kinematische Netzwerkpositionsbestimmung (Network Real-Time Kinematic Positioning – NRTK) und die globale präzise Einzelpunktbestimmung (Precise Point Positioning – PPP). Anstelle eines regionalen Netzwerks wird dabei ein globales Referenznetzwerk von etwa 100 Stationen verwendet, wobei die Daten zu einem Rechenzentrum „gestreamt“ werden, um präzise Orbits und Uhren als wesentliche Produkte des Positionierungsdiensts sowie unkalibrierte Phasenverzögerungen (Uncalibrated Phase Delay – UPD) und ionosphärische Korrekturmodelle in Echtzeit als zusätzliche Informationen bereitzustellen. Die Echtzeit-Produkte werden über Internet oder Satellitenkommunikation an die Nutzer übermittelt, sodass deren Einzelempfänger Positionen in Zentimetergenauigkeit bestimmen können (Abb. 7).

Um eine bessere Konvergenzzeit und eine höhere Positionsgenauigkeit zu erreichen, wurde das Standard-PPP durch eine ganzzahlige Mehrdeutigkeitsauflösung erweitert /Ge et al. 2008/. Der Service konnte weiter verbessert werden durch Beobachtungen aus einem dichten Regionalnetz /Li et al. 2010/, wobei die lokalen Troposphärenverzögerungskorrekturen für die sofortige Mehrdeutigkeitsauflösung an einer Nutzerstation erzeugt werden. Der PPP-Ansatz mit regionaler Augmentierung wird als der vielversprechendste Service-Ansatz für die präzise Echtzeit-Positionierung der Zukunft betrachtet.

Die am GFZ entwickelte EPOS-RT-Software wird für den IGS-Echtzeit-Service sowie GFZ-bezogene geowissenschaftliche Anwendungen, wie das Tsunami-Frühwarnsystem, einge-

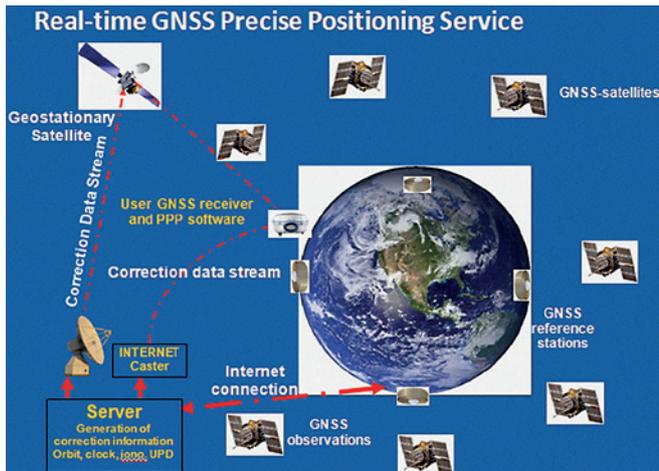


Abb. 7 | Hardware-Komponenten für die Echtzeit-Positionsbestimmung

setzt /Ge et al. 2012/, /Li et al. 2015c/. Abb. 8 zeigt ein typisches Ergebnis von drei Positionierungsansätzen aus dem Online-Betrieb.

Zerstörerische Erdbeben der jüngsten Vergangenheit, wie die Beben von Maule, Chile (Mw 8,8) im Jahr 2010 oder von Tohoku, Japan (Mw 9,0) im Jahr 2011 zeigen immer wieder deutlich die dringende Notwendigkeit einer Erdbebenüberwachung und

-frühwarnung. Such- und Rettungsmaßnahmen müssen umgehend erfolgen, vor allem innerhalb der ersten „goldenen 48 Stunden“. Schnelle Herd- und Bruchinversionen sind bei großen Erdbeben entscheidend für die seismische und Tsunami-bezogene Gefährdungsminderung (Abb. 9). Erdbebeninduzierte Verschiebungen in Lage und Höhe als Schlüsselinformationen für derartige Inversionen werden in Echtzeit benötigt.

6 GNSS FÜR DAS MONITORING DER ATMOSPHÄRE UND KLIMATOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

6.1 Operationelle Wasserdampfbestimmung

Die Laufzeitverzögerung der GNSS-Signale in der Atmosphäre kann wertvolle meteorologische Informationen liefern. Insbesondere ist es möglich, die räumliche Wasserdampfverteilung in der Troposphäre aus den Laufzeitdaten zu rekonstruieren /Bevis et al. 1992/, /Rocken et al. 1993/, /Businger et al. 1996/. Das Produkt ist der vertikal integrierte Wasserdampf oberhalb der Station. Zusätzlich können

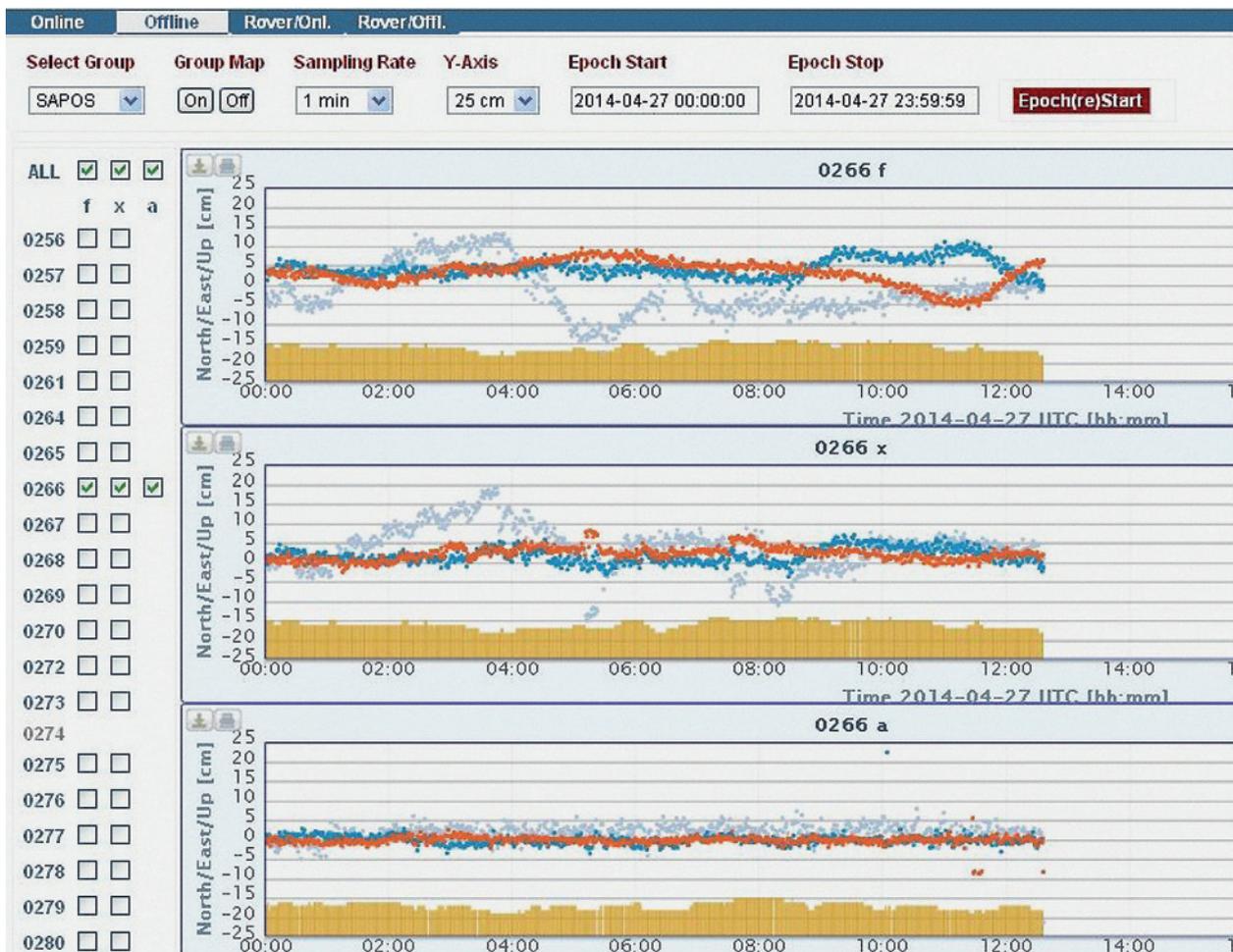


Abb. 8 | Zeitreihen der Positionsänderung bezogen auf den ITRF08. Oben: Standard-PPP mit Positionen genauer als 10 cm nach der Konvergenz. Mitte: Standard-PPP erweitert durch ganzzahlige Mehrdeutigkeitsauflösung mit um einige Zentimeter genaueren Positionen, sobald die Ambiguitäten aufgelöst sind. Unten: PPP mit Troposphärenverzögerungskorrekturen kann sofort Genauigkeiten im Bereich von 2 cm erzielen.

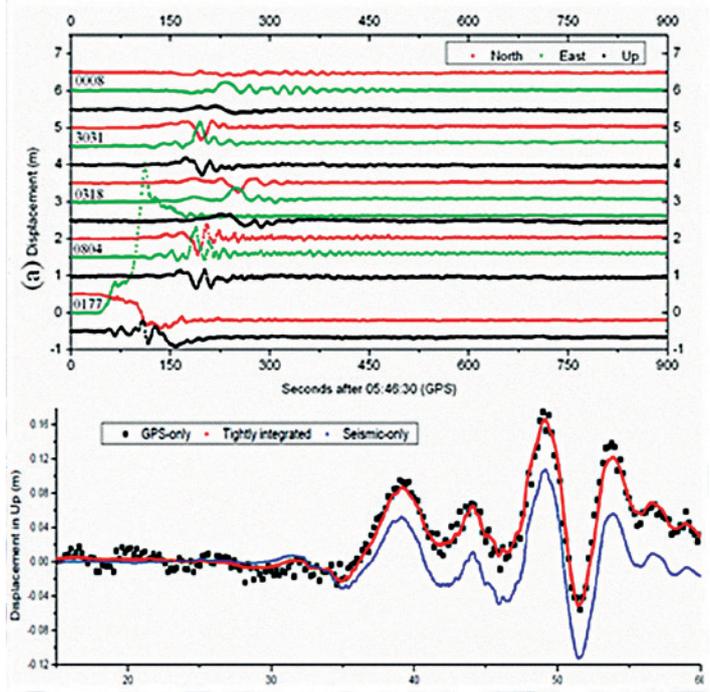
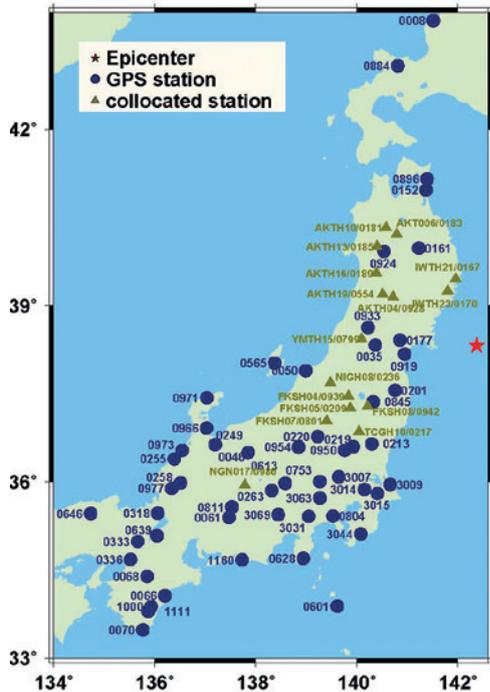


Abb. 9 | Links: Lage des Epizentrums des Tohoku-Oki-Erdbebens (roter Stern) und Verteilung von ausgewählten GNSS-Stationen mit hoher zeitlicher Verfügbarkeit und Strong-Motion-Stationen. Die blauen Kreise stellen ausschließlich mit GNSS ausgerüstete Stationen dar, während die grünen Dreiecke für Stationen stehen, bei denen GNSS-Stationen mit Strong-Motion-Seismometern kolloziert sind. Rechts: PPP-Verschiebungen (oben) und Geschwindigkeitswellenformen (unten) an den GPS-Stationen 0008, 3031, 0318, 0804 und 0177 während des Tohoku-Oki-Erdbebens am 11. März 2011. Die Nord-, Ost- und Höhen-Komponenten sind jeweils durch rote, grüne und schwarze Linien dargestellt.

horizontale Gradienten /Bar-Sever et al. 1998/ oder der integrierte Wasserdampf entlang des Wegs zum Satelliten, sog. Slant Delays, abgeleitet werden /Braun et al. 2003/. GNSS-basierte Methoden der Wasserdampfbestimmung werden am GFZ seit 2000 operationell angewandt und für die Verbesserung von regionalen und globalen Wettervorhersagen genutzt /Dick et al. 2001/, /Reigber et al. 2002/, /Gendt et al. 2004/, /Tomassini et al. 2004/, /Guerova et al. 2016/. Momentan werden am GFZ die GNSS-Daten des globalen IGS-Netzes sowie des Deutschen SAPOS-Netzes im Rahmen des E-GVAP-Projekts (The EUMETNET GNSS Water Vapour Programme) mit der GFZ-Software EPOS.P8 in naher Echtzeit prozessiert. Die troposphärischen Produkte (Wasserdampf- und „Slant-Delay“-Daten) von insgesamt mehr als 500 Stationen werden den europäischen Wetterdiensten operationell mit einer Verzögerung von weniger als 30 Minuten zur Verfügung gestellt. Damit können die Beobachtungen dichter GNSS-Bodennetze nach einer geeigneten Prozessierung dazu genutzt werden, um die bestehenden Defizite in der Kenntnis der Wasserdampfverteilung – das wichtigste natürliche Treibhausgas in der Atmosphäre – teilweise zu schließen.

Bei der Weiterentwicklung der Methodik zur operationellen Wasserdampfbestimmung mit GNSS-Daten wurden am GFZ die Untersuchungen zur Nutzung von Echtzeit-Daten verschiedener Navigationssatellitensysteme weiter ausgebaut (Abb. 10) /Li et al. 2014, 2015a, 2015b/, /Lu et al. 2016/. Hierzu erfolgten im Rahmen der europäischen COST-Aktion 1206 GNSS4SWEC (GNSS for Severe Weather and Climate) umfangreiche internationale Vergleichsprozessierungen /Douša et al. 2016/.

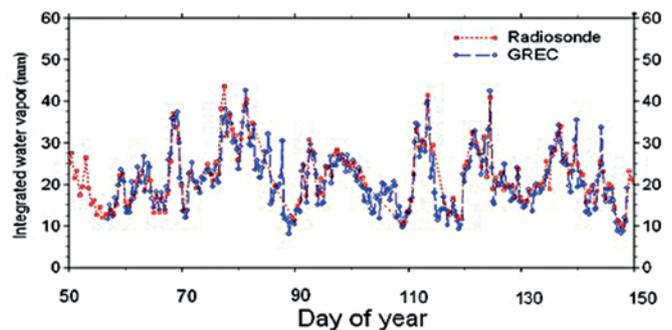


Abb. 10 | Vergleich von aus Multi-GNSS abgeleitetem Wasserdampf mit Radiosonden-Messungen für die Station Curtin in Australien für den Zeitraum Januar – Juni 2014 (Echtzeit-GNSS-Prozessierung im Simulationsmodus)

6.2 Klimatologische Untersuchungen

Zusätzlich können die GNSS-Daten für klimatologische Untersuchungen des Langzeitverhaltens des globalen Wasserdampfs genutzt und wichtige Informationen zur Charakterisierung des globalen Klimawandels gewonnen werden. Die im Vergleich zu anderen Fernerkundungsmethoden 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, <http://www.gruan.org>) der WMO im Rahmen von GCOS (Globale Climate Observing Systems) analysiert. GNSS-Empfänger sind hier fester Bestandteil der Messausrüstung von gegenwärtig 16 global verteilten

GRUAN-Observatorien. Einer der Arbeitsschwerpunkte ist hier die Langzeitanalyse des Wasserdampfgehalts im globalen Maßstab /Ning et al. 2016b/, für die eine umfassende Fehlerabschätzung erfolgte /Ning et al. 2016a/.

Ein Beispiel für die aktuellen wissenschaftlichen Untersuchungen am GFZ ist die Bestimmung des klimatologischen Trends für Deutschland. Das GNSS-SAPOS-Netzwerk in Deutschland umfasst ca. 300 permanente Stationen, wobei 119 Stationen seit mehr als zehn Jahren Beobachtungen liefern. In Abb. 11 sind die geschätzten Trends (links) mit ihren Unsicherheiten (rechts) für alle Stationen dargestellt. Die relative Markergröße entspricht der Länge der Zeitreihe von vier bis 19 Jahren. Die von langen Zeitreihen geschätzten Trends, also für die Stationen, deren Zeitreihen mehr als zehn Jahren umfassen, können als plausibel bezeichnet werden. Die Station Potsdam zum Beispiel zeigt einen Wasserdampf-Trend von 0,25 mm/Dekade. Trendwerte höher als 1,5 mm/Dekade sind unrealistisch hoch für Mitteleuropa und sind meist darauf zurückzuführen, dass die Zeitreihen nicht lang genug sind.

7 GNSS-REFLEKTOMETRIE

Seit Beginn der 1990er-Jahre werden von der Erdoberfläche reflektierte GNSS-Signale hinsichtlich geophysikalischer Anwendungen untersucht, ein als GNSS-Reflektometrie (GNSS-R) bezeichnetes Verfahren. In den letzten Jahren wurden diese Studien intensiviert und dabei wesentlich durch die Vorbereitung verschiedener Satellitenexperimente vorangetrieben (TechDemoSat-1, CYGNSS, GEROS-ISS, /Wickert et al. 2016/, Abb. 12). Die GNSS-Reflektometrie geht über die klassischen geodätischen Verfahren hinaus und zielt auf die Fernerkundung der Eigenschaften von Wasser-, Land-, und Eisoberflächen sowie potenziell auch von Atmosphären- und Ionosphärenparametern ab (z. B. /Vey et al. 2016/). Dabei ergeben sich auch Anwendungen im Rahmen von Frühwarnsystemen, u. a. für Tsunamis /Stosius et al. 2011/. In verschiedenen boden- und fluggestützten Experimenten wurde das hohe Potenzial der GNSS-R für die Erdbeobachtung auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen eindrucksvoll demonstriert (z. B. /Semmling et al. 2014/). Es sind jedoch noch erhebliche Forschungsarbeiten erforderlich, um das volle Potenzial dieser Technik für die Erdbeobachtung auszuschöpfen und operationelle Anwendungen zu entwickeln.

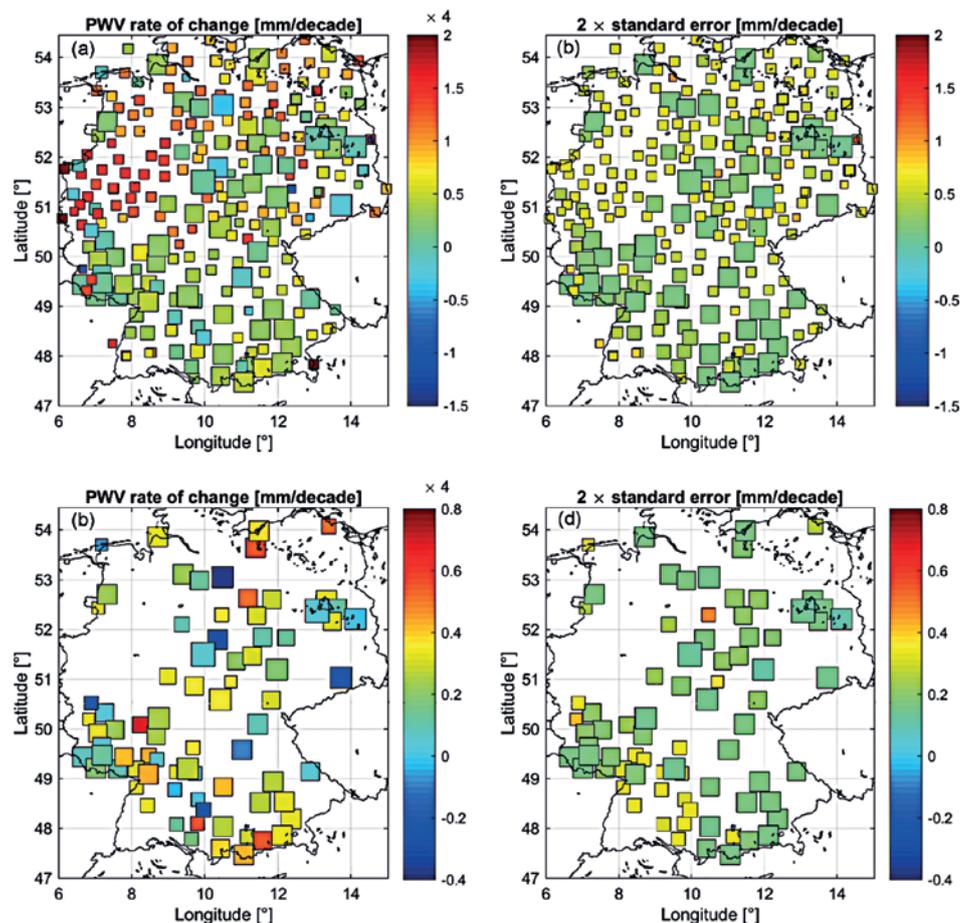


Abb. 11 | GNSS-basierte Wasserdampf-Trends (links) und die entsprechenden Standardabweichungen (rechts) für Deutschland

Die Bedeutung der GNSS-Reflektometrie wird in den nächsten Jahren weiter wachsen. Basis dafür sind der Übergang zu Multi-GNSS und der nach wie vor kontinuierlich betriebene Ausbau globaler und regionaler GNSS-Empfängerinfrastruktur, wie Bodennetze, Flugplattformen und LEO-Satelliten mit GNSS-Empfängern /Wickert et al. 2015/.

8 DAS AUFTRETEN SPORADISCHER E-SCHICHTEN IN DER IONOSPÄRE

Die Ionosphäre ist ein Teil der oberen Erdatmosphäre. Sie befindet sich in einem Höhenbereich zwischen 60 km und 1000 km. Im unteren Teil der Ionosphäre, in etwa 90 km bis 120 km Höhe, bilden sich gelegentlich dünne Strukturen erhöhter Elektronendichte (sporadische E-Schichten). Durch ihr scheinbar unregelmäßiges Erscheinen erhielten sie nach ihrer Entdeckung mit bodengestützten Ionosondenmessungen zu Beginn des letzten Jahrhunderts das Attribut „sporadisch“. Heute weiß man, dass es sich hierbei um ein regelmäßig auftretendes Phänomen handelt, welches durch das Zusammenspiel von Metallionen, Wind in der oberen Erdatmosphäre und Erdmagnetfeld entsteht /Haldoupis 2010/.

Sporadische E-Schichten können sehr hohe Konzentrationen an freien Ladungsträgern aufweisen. Daher besitzen sie das Potenzial,

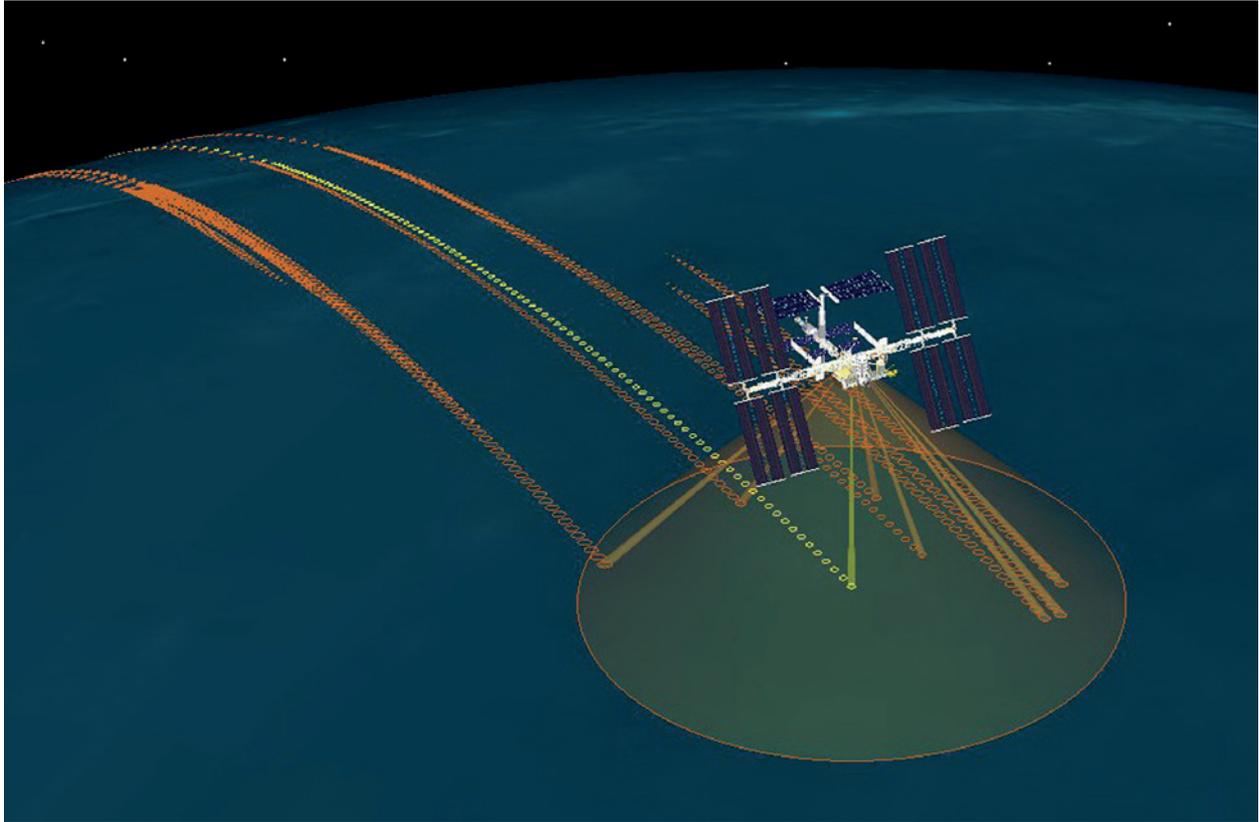


Abb. 12 | Schematische Darstellung des geplanten GNSS-Reflektometrieexperiments GEROS-ISS an Bord der Internationalen Weltraumstation ISS. Die Spuren auf der Wasseroberfläche stellen den zeitlichen Verlauf der GNSS-Reflexionspunkte dar, an denen die Oberflächeneigenschaften, wie altimetrische Höhe oder Windgeschwindigkeit, abgeleitet werden (Grafik freundlich zur Verfügung gestellt von S. d'Addio, ESA).

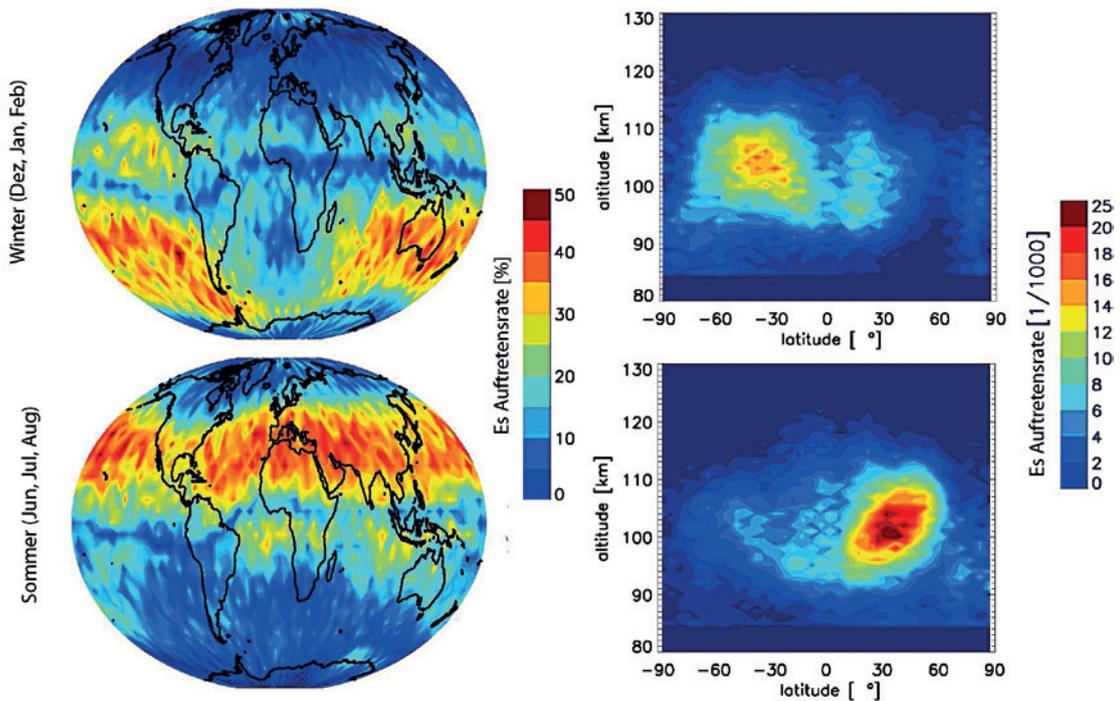


Abb. 13 | Links: Globale Karten der Auftretensrate sporadischer E-Schichten im Winter (Dezember, Januar, Februar) und Sommer (Juni, Juli, August) der Jahre 2007–2012. Rechts: Sporadische E-Auftretensraten in Abhängigkeit der geographischen Breite und der Höhe für dieselben Zeitintervalle wie auf den linken Abbildungen

die Qualität der globalen Kommunikations- und Navigationssignale erheblich zu beeinträchtigen. Die Störungen in den GNSS-Signalen können im Gegenzug aber verwendet werden, um die sporadischen E-Schichten und ihre Eigenschaften auf globaler Skala zu untersuchen. So konnte in den letzten Jahren aufgrund von satellitenbasierten Radiookkultationsmessungen gezeigt werden, dass die sporadischen E-Schichten bevorzugt in mittleren Breiten entstehen /Arras 2010/, /Arras et al. 2013/. Die höchsten Auftretenswahrscheinlichkeiten mit bis zu 50 % wurden in den Nachmittagsstunden im Sommer beobachtet. In polaren Regionen und in der Nähe des Äquators treten die E-Schichten nur selten auf (Abb. 13).

9 AUSBLICK

Auch 100 Jahre nach Helmerts Tod wird auf dem Telegrafenberg in Potsdam herausragende geodätische Wissenschaft betrieben und es werden zukunftsweisende geodätische Entwicklungen vorangebracht /Schuh et al. 2016/. Insbesondere die Interdisziplinarität der Geodäsie im Verbund mit den anderen Erdwissenschaften am GFZ wäre ganz im Sinne von Helmert. Forschungsarbeiten im internationalen Verbund spielen mehr denn je eine hervorgehobene Rolle und selbstverständlich wäre eine moderne Geodäsie ohne die Verwendung von Satelliten nicht mehr denkbar. Hätte es zu Helmerts Zeiten schon künstliche Erdsatelliten gegeben, hätte er mit Sicherheit deren Bedeutung für Anwendungen in der Geodäsie erkannt.

LITERATUR

- Arras, C. (2010): A Global Survey of Sporadic E Layers based on GPS Radio Occultations by CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. Dissertation, Universität Leipzig.
- Arras, C.; Wickert, J.; Jacobi, C.; Heise, S.; Beyerle, G.; Schmidt, T. (2013): Global sporadic E layer characteristics obtained from GPS radio occultation measurements. In: Lübken, F.-J. (Hrsg.): Climate and Weather of the Sun-Earth-System (CAWSES). Springer Atmospheric Sciences, Springer Netherlands, 207–221. DOI:10.1007/978-94-007-4348-9_12.
- Bar-Sever, Y. E.; Kroger, P. M.; Borjesson, J. A. (1998): Estimating horizontal gradients of path delay with a single GPS receiver. In: Journal of Geophysical Research, 103(1998)B3, 5019–5035.
- Bevis, M.; Businger, S.; Herring, T.; Rocken, Ch.; Anthes, R.; Ware, R. H. (1992): GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. In: Journal of Geophysical Research, 97(1992) D14, 15787–15801.
- Braun, J.; Rocken, C.; Liljegren, J. (2003): Comparisons of line-of-sight water vapor observations using the global positioning system and a pointing microwave radiometer. In: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20(2003)5, 606–612.
- Businger, S.; Chiswell, S. R.; Bevis, M.; Duan, J.; Anthes, R. A.; Rocken, C.; Ware, R. H.; Van Hove, T.; Solheim, F. S. (1996): The promise of GPS in atmospheric monitoring. In: Bulletin of the American Meteorological Society, 77(1996), 5–18.
- Deng, Z.; Fritsche, M.; Nischan, T.; Bradke, M. (2016): Multi-GNSS Ultra Rapid Orbit-, Clock- & EOP-Product Series. GFZ Data Services. DOI:10.5880/GFZ.1.1.2016.003.
- Dick, G.; Gendt, G.; Reigber, C. (2001): First experience with near real-time water vapor estimation in a German GPS network. In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 63(2001), 1295–1304.
- Douša, J.; Dick, G.; Kačmařík, M.; Brožková, R.; Zus, F.; Brenot, H.; Stoycheva, A.; Möller, G.; Kaplon, J. (2016): Benchmark campaign and case study episode in Central Europe for development and assessment of advanced GNSS tropospheric models and products. In: Atmospheric Measurement Techniques, 9(2016), 2989–3008. DOI:10.5194/amt-9-2989-2016.
- Dow, J. M.; Neilan, R. E.; Rizos, Ch. (2009): The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems. In: Journal of Geodesy 83(2009)3, 191–198.
- Fritsche, M.; Deng, Z.; Ge, M.; Nischan, T.; Uhlemann, M.; Beeskow, G.; Brandt, A.; Bradke, M.; Ramatschi, M. (2016): GFZ Analysis Center Technical Report 2015. In: Jean, Y., Dach, R. (Hrsg.): International GNSS Service Technical Report 2015 (IGS Annual Report). IGS Central Bureau and University of Bern, Bern Open Publishing, 61–67. DOI:10.7892/boris.80307.
- Ge, M.; Gendt, G.; Dick, G.; Zhang, F. (2005): Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions. In: Journal of Geodesy, 79(2005)1-3, 103–110.
- Ge, M.; Gendt, G.; Rothacher, M.; Shi, C.; Liu, J. (2008): Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations. In: Journal of Geodesy, 82(2008)7, 389–399. DOI:10.1007/s00190-007-0187-4.
- Ge, M.; Douša, J.; Li, X.; Ramatschi, M.; Nischan, T.; Wickert, J. (2012): A novel real-time precise positioning service system: Global precise point positioning with regional augmentation. In: Journal of Global Positioning Systems, 11(2012)1, 2–10. DOI:10.5081/jgps.11.1.2.
- Gendt, G.; Dick, G.; Reigber, C.; Tomassini, M.; Liu, M.; Ramatschi, M. (2004): Near real time GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany. In: Journal of the Meteorological Society of Japan, 82(2004)1B, 361–370.
- Guerova, G.; Jones, J.; Douša, J.; Dick, G.; de Haan, S.; Pottiaux, E.; Bock, O.; Pacione, R.; Elgered, G.; Vedel, H.; Bender, M. (2016): Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. In: Atmospheric Measurement Techniques, 9(2016)11, 5385–5406. DOI:10.5194/amt-9-5385-2016.
- Haldoupis, C. (2010): A tutorial review on Sporadic E layers. Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. IAGA Special Sopron Book Series 2, Chapter 29.
- Li, X.; Zhang, X.; Ge, M. (2010): Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution. In: Journal of Geodesy, 85(2010)3, 151–158. DOI:10.1007/s00190-010-0424-0.
- Li, X.; Dick, G.; Ge, M.; Heise, S.; Wickert, J.; Bender, M. (2014): Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: precise point positioning with orbit, clock and phase delay corrections. In: Geophysical Research Letters, 41(2014)10, 3615–3621.
- Li, X.; Dick, G.; Lu, C.; Ge, M.; Nilsson, T.; Ning, T.; Wickert, J.; Schuh, H. (2015a): Multi-GNSS meteorology: Real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS observations. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (2015)6. DOI:10.1109/TGRS.2015.2438395.
- Li, X.; Zus, F.; Lu, C.; Dick, G.; Ning, T.; Ge, M.; Wickert, J.; Schuh, H. (2015b): Retrieving of atmospheric parameters from multi-GNSS in real time: Validation with water vapor radiometer and numerical weather model. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120 (2015)14, 7189–7204. DOI:10.1002/2015JD023454.
- Li, X.; Ge, M.; Dai, X.; Ren, X.; Fritsche, M.; Wickert, J.; Schuh, H. (2015c): Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. In: Journal of Geodesy, 89(2015)6. DOI:10.1007/s00190-015-0802-8.
- Lu, C.; Li, X.; Ge, M.; Heinkelmann, R.; Nilsson, T.; Soja, B.; Dick, G.; Schuh, H. (2016): Estimation and evaluation of real-time precipitable water vapor from GLONASS and GPS. In: GPS Solutions, 20(2016)4, 703–713. DOI:10.1007/s10291-015-0479-8.

Melnick, D.; Moreno, M.; Quinteros, J.; Baez, J. C.; Deng, Z.; Li, S.; Oncken, O. (2017): The super-interseismic phase of the megathrust earthquake cycle in Chile. In: *Geophysical Research Letters*, 44(2017). DOI:10.1002/2016GL071845.

Montenbruck, O.; Steigenberger, P.; Prange, L.; Deng, Z.; Zhao, Q.; Peronanz, F.; Romero, I.; Noll, C.; Stürze, A.; Weber, G.; Schmid, R.; MacLeod, K.; Schaer, S. (2017): The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. In: *Advances in Space Research*, 59(2017)7, 1671–1697. DOI:10.1016/j.asr.2017.01.011.

Ning, T.; Wang, J.; Elgered, G.; Dick, G.; Wickert, J.; Bradke, M.; Sommer, M. (2016a): The uncertainty of the atmospheric integrated water vapour estimated from GNSS observations. In: *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(2016), 79–92. DOI:10.5194/amt-9-79-2016.

Ning, T.; Wickert, J.; Deng, Z.; Heise, S.; Dick, G.; Vey, S.; Schöne, T. (2016b): Homogenized time series of the atmospheric water vapor content obtained from the GNSS reprocessed data. In: *Journal of Climate*, 29(2016)7, 2443–2456. DOI:10.1175/JCLI-D-15-0158.1.

Reigber, Ch.; Gendt, G.; Dick, G.; Tomassini, M. (2002): Near-real-time water vapor monitoring for weather forecasts. In: *GPS World*, (2002)1, 18–27.

Rocken, C.; Ware, R.; Van Hove, T.; Solheim, F.; Alber, Ch.; Johnson, J.; Bevis, M.; Businger, S. (1993): Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. In: *Geophysical Research Letters*, 20(1993)23, 2631–2634.

Schuh, H.; Wickert, J.; Sips, M.; Schöne, T.; Rogaß, C.; Roessner, S.; König, R.; Klemann, V.; Heinkelmann, R.; Dobslaw, H.; Beyerle, G. (2016): Zukunft der globalen Geodäsie und Fernerkundung aus Sicht des Deutschen Geoforschungszentrum (GFZ), Potsdam. In: Freeden, W.; Rummel, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1–55. DOI:10.1007/978-3-662-46900-2_16-1.

Schuh, H.; Wickert, J.; Dick, G.; Ge, M.; Ramatschi, M.; Li, X.; Deng, Z.; Alshwaf, F.; Arras, C.; Männel, B. (2017): Der Beitrag von GNSS zum Monitoring des Systems Erde. In: DVW e.V. (Hrsg.): *GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft*. DVW-Schriftenreihe, 87. Wißner, Augsburg, 43–54.

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. In: *Geophysical Research Letters*, 41(2014)3, 954–960. DOI:10.1002/2013GL058725.

Stosius, R.; Beyerle, G.; Hoegner, 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. In: *Advances in Space Research*, 47(2011)5, 843–853. DOI:10.1016/j.asr.2010.09.022.

Vey, S.; Güntner, A.; Wickert, J.; Blume, T.; Thoss, H.; Ramatschi, M. (2016): Monitoring snow depth by GNSS reflectometry in built-up areas: A case study for Wettzell, Germany. In: *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 9(2016)10, 4809–4816. DOI:10.1109/JSTARS.2016.2516041.

Wickert, J.; Semmling, M.; Beckheinrich, J.; Beyerle, G.; Vey, S.; Schuh, H. (2015): Innovative Satellitengeodäsie am GFZ – Fernerkundung mit reflektierten GNSS-Signalen. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)*, 121(2015)10, 347–352.

Wickert, J.; Cardellach, E.; Martin-Neira, M.; Bandeiras, J.; Bertino, L.; Andersen, O. B.; Camps, A.; Catarino, N.; Chapron, B.; Fabra, F.; Flouy, 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.; Rosello, J.; Saynisch, J.; Soulat, F.; Shum, C. K.; Semmling, M.; Sousa, A.; Xie, J.; Zuffada, C. (2016): GEROSS-ISS: GNSS Reflectometry, Radio Occultation, and Scatterometry Onboard the International Space Station. In: *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and Remote Sensing*, 9(2016)10, 1–30. DOI:10.1109/JSTARS.2016.2614428.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Harald Schuh

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM
GFZ – DEPARTMENT 1: GEODÄSIE

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
harald.schuh@gfz-potsdam.de



Prof. Dr. Jens Wickert

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
jens.wickert@gfz-potsdam.de



Dr. Galina Dick

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
galina.dick@gfz-potsdam.de



Dr. Maorong Ge

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
maorong.ge@gfz-potsdam.de



Dr.-Ing. Markus Ramatschi

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
markus.ramatschi@gfz-potsdam.de



Dr. Xingxing Li

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
xingxing.li@gfz-potsdam.de



Dr. Zhiguo Deng

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
zhiguo.deng@gfz-potsdam.de



Dr.-Ing. Fadwa Alshawaf

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
fadwa.alshawaf@gfz-potsdam.de



Dr. Christina Arras

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
christina.arras@gfz-potsdam.de



Dr. Benjamin Männel

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM
DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ
SEKTION 1.1 GEODÄT. WELTRAUMVERFAHREN

Telegrafenberg | 14473 Potsdam
benjamin.maennel@gfz-potsdam.de




geospatial@online

> Online-Anmeldung bis 28. Juni 2017

> 200 Vorträge, Workshops & Diskussionsforen

> 1000+ Teilnehmer

> 60 Aussteller

agit2017

SYMPOSIUM und EXPO
Angewandte Geoinformatik
Salzburg, 5. – 7. Juli 2017

> www.agit.at

