

Big Data in Geodäsie, Seismologie und Geomagnetismus

Harald Schuh, James Anderson, Georg Beyerle, Galina Dick, Frank Flechtner, Christoph Förste, Maorong Ge, Susanne Glaser, Robert Heinkelmann, Rolf König, Benjamin Männel, Ingo Michaelis, Javier Quinteros, Markus Ramatschi, Jan Rauberg, Martin Rother, Torsten Schmidt, Claudia Stolle, Jens Wickert
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Geodesy aims to determine the geometric figure and the gravitational field of the Earth, as well as its orientation in space. Steadily increasing accuracies, with which these tasks are being solved, are based on corresponding improvements in geodetic measuring data, both, on the quantitative as well as the qualitative level. Similar developments in the acquisition, processing and analysis of observation data, which have always been at the limit of the technically and scientifically feasible, are witnessed in the fields of seismology and geomagnetism as well. Recently however, innovative developments, building on Big Data approaches, are emerging with the combination of diverse data streams into integrated processing environments. Geodetic, seismological and geomagnetic observation data are fundamental for a better understanding of Earth system processes. The combination of these geoscience data collected by ground- and space-based sensors, their consistent processing, validation and assimilation into complex Earth system models contribute in an essential way to the future implementation of GGOS, the Global Geodetic Observing System.



Zu den zentralen Aufgaben der Geodäsie gehören die Vermessung der geometrischen Figur und des Schwerefelds der Erde, sowie die Bestimmung ihrer Orientierung im Weltraum. In den vergangenen Jahren konnten diese Aufgaben mit stetig zunehmenden Genauigkeiten gelöst werden. Diese Fortschritte gründen sich auf entsprechende Verbesserungen geodätischer Messdaten sowohl in quantitativer wie auch in qualitativer Hinsicht. Vergleichbare Entwicklungen in der Erfassung, Verarbeitung und Analyse von Beobachtungsdaten, die sich seit jeher an der Grenze des technisch und wissenschaftlich Machbaren bewegt haben, sind auch in den Fachgebieten der Seismologie und des Geomagnetismus festzustellen. Neue Entwicklungen, die Big-Data-Aspekte aufgreifen, zeichnen sich gegenwärtig bei der Zusammenführung von Datenströmen aus unterschiedlichen Messmethoden in integrierte Prozessierungsumgebungen ab. So werden beispielsweise im Rahmen des von der DFG geförderten Projekts GGOS-SIM Beobachtungen der vier geodätischen Weltraumverfahren Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Satellite Laser Ranging (SLR), Very Long Baseline Interferometry (VLBI) und Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) nicht mehr separat, sondern innerhalb eines konsistenten Rahmens verarbeitet und analysiert.

Im Folgenden sollen die Themenbereiche Geodäsie, Seismologie und Geomagnetismus aus dem Blickwinkel des Big-Data-Ansatzes beleuchtet werden.

Geodäsie

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ hat zwischen 2002 und 2017 zusammen mit nationalen und internationalen Partnern die Zwillingssatellitenmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) durchgeführt und realisiert derzeit gemeinsam mit der NASA die Nachfolgemission GRACE-FO (Follow-on; Start am 22. Mai 2018, Abbildung links; *Flechtner et al., 2016*).

Links: Am 22. Mai 2018 bringt eine Falcon 9-Rakete der Firma SpaceX die GFZ-Satellitenmission GRACE-FO in die erdnahe Umlaufbahn. Die von GRACE-FO beobachteten zeitlichen Veränderungen im Erdschwerefeld werden die quantitative Bestimmung von Massenverlagerungen in Kryosphäre, Ozeanen, Lithosphäre und Atmosphäre ermöglichen. (Foto: NASA/Bill Ingalls)

Left: On May 22, 2018 a Falcon 9 rocket, manufactured by SpaceX, launches the GFZ mission GRACE-FO into low-Earth orbit. GRACE-FO observations of temporal variations in Earth's gravity field will allow to infer mass changes in the cryosphere, the oceans, the lithosphere and the atmosphere.

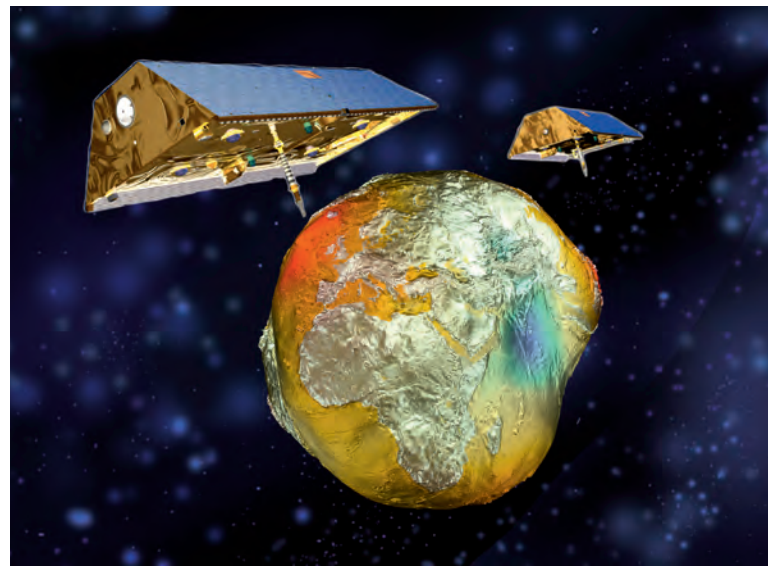


Abb. 1: GRACE-Satelliten mit dem Schwerefeld der Erde in überhöhter Darstellung (Illustration: Astrium/GFZ)

Fig. 1: The GRACE twin satellites with Earth's gravitational field with strong vertical exaggeration

Aus GRACE- und GRACE-FO-Daten werden Massentransporte im System Erde abgeleitet, die für die Untersuchung klimarelevanter Phänomene, wie beispielsweise Veränderungen im kontinentalen Wasserkreislauf, das Abschmelzen großer Gletschersysteme und dem damit einhergehenden Meeresspiegelanstieg oder Veränderungen in Ozeanströmungen, von zentraler Bedeutung sind. Damit liefern die bald zwei Dekaden umfassenden Zeitreihen wichtige Beiträge zur Beantwortung gesellschaftspolitischer Fragestellungen zur Erhaltung unserer Lebensräume.

Die Massentransport-Zeitserien basieren auf monatlichen Schwerefeldmodellen, die als eine Reihe von Kugelfunktionskoeffizienten bis Grad und Ordnung 96 dargestellt werden (*Dahle, 2014*). Zur Berechnung dieser 9409 Parameter, die einer räumlichen Auflösung von etwa 210 km entsprechen, werden in einer Ausgleichsrechnung Akzelerometerdaten zur Korrektur nicht-gravitativer Störkräfte und Sternensensorbeobachtungen zur präzisen Lageberechnung verwendet. Zusätzlich wird der Abstand zwischen den beiden Satelliten per Mikrowellen- (GRACE) und/oder Lasersignal (GRACE-FO) im 5-Sekunden-Takt vermessen. Die Satellitenpositionen berechnen sich aus Beobachtungen zu durchschnittlich neun GPS-Satelliten. Insgesamt werden für eine monatliche Karte des Schwerefelds etwa 3,1 Mio. global verteilter Beobachtungen ausgewertet.

Parallel zu GRACE beteiligte sich das GFZ an der Datenauswertung der ESA-Satellitenmission GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer; *Pail et al., 2011*). Als wichtigstes Missionsziel ermöglichte GOCE die präzise Bestimmung des



Kontakt: H. Schuh
(harald.schuh@gfz-potsdam.de)

Erdschwerefelds auf den offenen Ozeanen, um die räumliche und zeitliche Verteilung von Meeresströmungen abzuleiten. Die Mission umfasste 1322 Messtage im Zeitraum 2009 bis 2013. An jedem Tag fielen je 86 400 GPS-Messungen, Lagedaten zur Orientierung des Satelliten und Beschleunigungsdaten an. Die aus GOCE-Messungen ermittelten Erdschwerefeldmodelle bestehen aus Kugelfunktionsdatensätzen mit insgesamt etwa 90 000 Koeffizienten. Zur Berechnung dieser Koeffizienten wurden in numerisch aufwendigen Inversionsalgorithmen Normalgleichungsmatrizen verarbeitet, die etwa 8 Mrd. Matrixelemente von zusammen etwa 65 Gigabyte (GB) umfassen. Im Rahmen der GOCE-Analysen wurden am GFZ rund 800 dieser Matrizen mit einem Gesamtvolumen von etwa 25 Terabyte (TB) berechnet.

Big-Data-Aspekte sind in allen vier geodätischen Weltraumverfahren GNSS, VLBI, SLR und DORIS von hoher Relevanz. Auf die beiden erstgenannten wird im Folgenden näher eingegangen.

Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

Das globale GNSS-Bodennetz wurde vom GFZ eingerichtet, um internationale geodätische Dienste und eigene geodynamische Großprojekte zu unterstützen. Gegenwärtig besteht das Stationsnetz aus knapp 80 permanenten Stationen; 23 davon gehören auch dem globalen IGS (International GNSS Service)-Netzwerk an, das derzeit fast 500 Stationen umfasst. Alle Stationen senden über Internetverbindungen sekundlich aufgezeichnete Beobachtungsdaten an das GFZ, für etwa die Hälfte der Stationen geschieht dies in Echtzeit. So werden beispielsweise allein von der GFZ-Station Urumqi (China) pro Tag 50 Mio. Beobachtungen verschiedener Signaltypen und -frequenzen von knapp 100 Satelliten der globalen Satellitennavigationssysteme gesammelt.

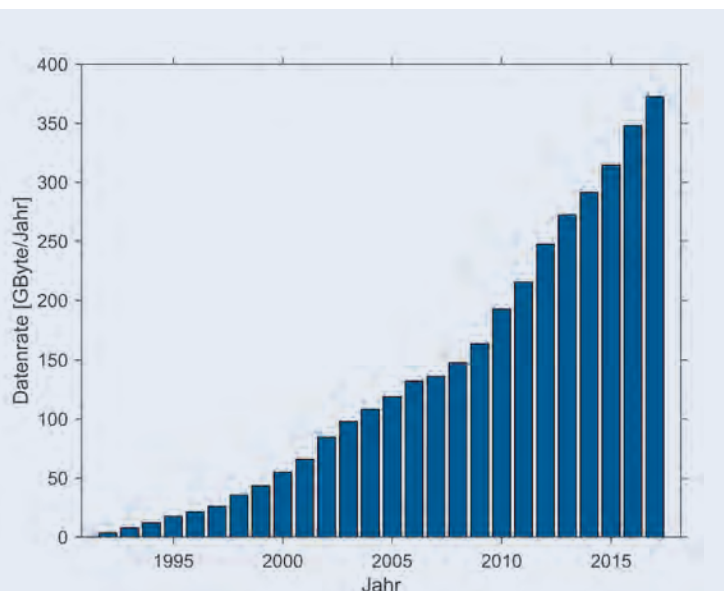


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung des jährlichen GNSS-Datenvolumens in der IGS-Datenbank

Fig. 2: Temporal evolution of yearly GNSS data volume available from the IGS file servers

Am GFZ werden im Operational Data Center GNSS-Beobachtungen dieser und weiterer knapp 1000 Stationen zusammengefügt, aufbereitet und archiviert. Die Verarbeitung dieser Messdaten in Form von mehr als 200 000 Dateien täglich erfolgt vollautomatisch in Verbindung mit permanenter Qualitätskontrolle. Zur Überwachung werden dabei pro Beobachtungsdatei einige hundert Metadaten und Qualitätsindikatoren in Datenbanken abgelegt. Im Rahmen des IGS betreibt das GFZ auch ein Analysezentrum, das in unterschiedlichen Modi subtägliche bis wöchentliche Produkte wie beispielsweise Satellitenbahnen für die verschiedenen GNSS-Systeme bestimmt. Hierfür werden mit einer am GFZ entwickelten Programmumgebung in der Multi-GNSS-Lösung pro Tag 17 500 Parameter (Koordinaten, Uhrenkorrekturen, etc.) aus rund 900 000 ausgewählten Beobachtungen von etwa 150 Stationen bestimmt (Deng et al., 2016).

Für Anwender von GNSS-Echtzeitpositionierungen stellt das GFZ im Real-time-Service des oben genannten IGS-Analysezentriums ebenfalls präzise Orbits und Uhrenlösungen sowie unkalibrierte Phasenverzögerungen und ionosphärische Korrekturmodelle mit einer nominalen Verzögerung von zehn Sekunden bereit. Diese Produkte ermöglichen es, mit einem einzelnen Empfänger die eigene Position mit Zentimetergenauigkeit zu bestimmen. Die am GFZ entwickelte EPOS-RT-Software wird dabei für den Echtzeitdienst und auch für geowissenschaftliche Anwendungen, wie beispielsweise das am GFZ entwickelte Tsunami-Frühwarnsystem GITEWS, eingesetzt (Ge et al., 2012; Li et al., 2015).

Verbesserungen von Wettervorhersagen und Abschätzungen des globalen Klimawandels erfordern Messdaten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Für diese Aufgaben liefert die GNSS-basierte Atmosphärensondierung mit der Bestimmung der globalen Wasserdampfverteilung in der unteren Troposphäre wichtige Beiträge. Troposphärischer Wasserdampf kann von einer GNSS-Bodenstation nur in einer Entfernung bis etwa 7 bis 15 km nachgewiesen werden (Bevis et al., 1992). Dieser relativ geringe Radius macht daher den Aufbau dichter Netze erforderlich. Die GNSS-Datenanalyse liefert die vertikal integrierte Wasserdampfverteilung (IWV) über der Station; zusätzlich können horizontale troposphärische Gradienten und der „Slant Delay“ – der entlang der Sichtlinie zum GNSS-Satelliten integrierte Wasserdampfgehalt – abgeleitet werden. In dichten Stationsnetzen stellt die Prozessierung von GNSS-Beobachtungen auf diese Weise die troposphärische Wasserdampfverteilung in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung bereit.

GNSS-Radiokkultationen (RO) – satellitengestützte Atmosphärensondierungen mittels GNSS-Signalen – ermöglichen die Ableitung globaler Temperatur-, Druck- und Dichtefelder auf monatlicher Basis (Wickert et al., 2017). Die Einzelprofile überdecken hierbei einen Höhenbereich vom Erdboden bis etwa 40 km mit einer vertikalen Auflösung von rund 100 m. In horizontaler Richtung verwendet man typischerweise Datengitterfelder von 5° geografischer Breite und 10° geografischer Länge.

Kontinuierliche RO-Daten existieren seit dem Jahr 2001. Mit dem Start zahlreicher weiterer Satellitenmissionen gibt es seit 2006 ausreichend Messdaten für die Generierung dreidimensionaler

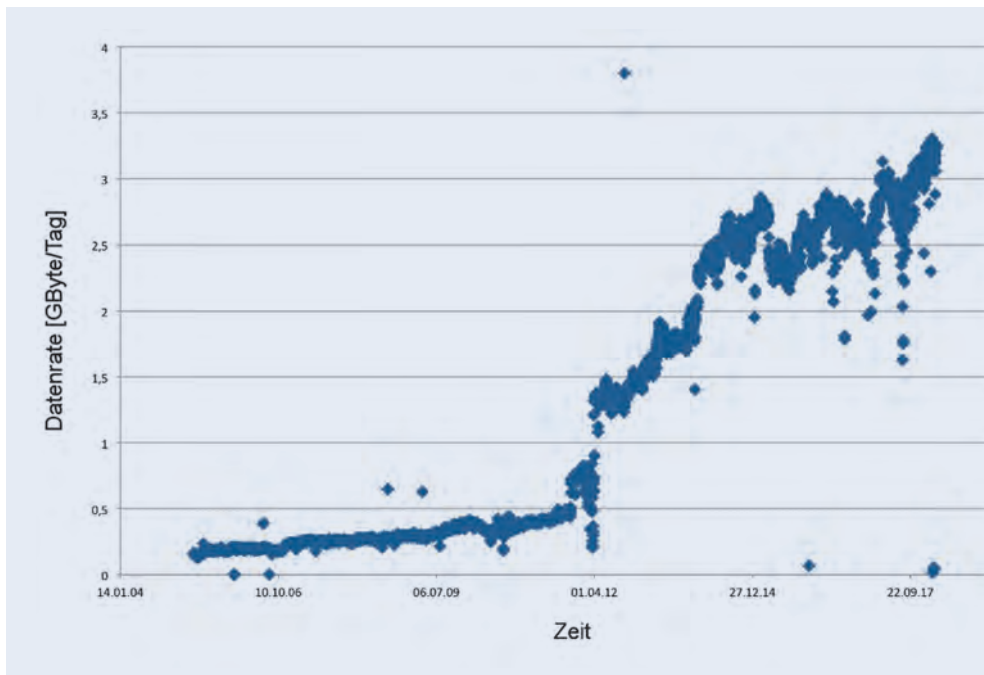


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Datenrate, mit der sich das GFZ GNSS-Rohdatenarchiv füllt. Das aktuelle Gesamtvolumen beträgt 5,7 TB.

Fig. 3: Temporal evolution of the GNSS data rate, GFZ's raw data archive is filled with. As of now the total data volume amounts to 5.7 TB.

Klimatologien. Für den Zeitraum 2007 bis 2015 sind pro Tag bis zu 3000 global verteilte Profile verfügbar. Danach nimmt mit Erreichen der vorgesehenen Missionslebensdauer die Datenrate wieder ab. Nachfolgemissionen, wie beispielsweise GRACE-FO und COSMIC-2, sind bereits umgesetzt oder stehen kurz vor der Realisierung. Ein weiterer Innovationsschritt wird mit dem Einsatz von RO-Instrumenten auf CubeSat-Plattformen mit Abmessungen von 30 x 10 x 10 cm erwartet (Irisov et al., 2017). Damit lassen sich kostengünstig Mehrsatellitenkonstellationen für atmosphärische RO-Sondierungen in hoher räumlicher und zeitlicher Dichte realisieren. Das zu erwartende Datenaufkommen dieser Systeme erfordert in zunehmendem Maße Big-Data-Ansätze für die RO-Prozessierung und -analyse. Ebenso ermöglicht die bereits am GFZ verfügbare Datenbasis von mehreren Millionen RO-Profilen innovative Big-Data-Analysen zur Korrelation von zonalen, monatlichen RO-Temperaturfeldern mit ENSO (El Niño und Southern Oscillation)- oder QBO (quasi-zweijährige Schwingung)-Phänomenen.

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Für das Verständnis des Systems Erde sind Messungen der Erdrotation und ihrer zeitlichen Variabilität von grundlegender Bedeutung. Der internationale VLBI-Dienst IVS liefert durch regelmäßige Beobachtungen von Quasaren oder Radiogalaxien (extragalaktische aktive Kerne, AGN) mit Entfernungen von einigen 100 Mio. bis zu mehreren Mrd. Lichtjahren hierzu wichtige Beiträge (Schuh und Behrend, 2012; Heinkelmann, 2013). Während eines Messzyklus von typischerweise 24 Stunden beobachten zehn bis zwanzig Radioteleskope simultan im S- und X-Frequenzband und zeichnen die AGN-Signale mit Gesamtdatenraten von 100 bis 300 Gigabit pro Sekunde auf; Rechenzentren werten die Rohdaten mit hochoptimierten Korrelationsalgorithmen aus. Aufgrund des Volumens von bis zu einigen Petabyte (PB) werden an den Rechenzentren nicht die Rohdaten, sondern nur die Zwischenergebnisse der Signalkorrelation archiviert. Eine 24-Stunden-Messung produziert ein Volumen von etwa 3 GB, dies entspricht pro Jahr

einem Umfang von rund 700 GB. In VGOS, dem VLBI-System der nächsten Generation, nehmen diese Datenraten um mindestens eine Größenordnung zu. Die Korrelationsdaten werden in Zukunft für die Korrektur von endlichen Ausdehnungen der AGN-Quellen und für Kalibrationsverfahren mit höheren Genauigkeiten genutzt werden. In der abschließenden Prozessierung werden aus den Korrelationsdaten IVS-Messdatenprodukte erstellt, deren Datenvolumen um mehr als zwei Größenordnungen kleiner ist. Sie stehen in den frei zugänglichen IVS-Archiven für die weitere wissenschaftliche Analyse zur Verfügung (Abb. 5).

Seismologie

Das seismologische GFZ-Datenzentrum GEOFON archiviert seit den frühen 1990er Jahren seismische Wellenformdaten. Seine interne Struktur umfasst

- den Betrieb eines permanenten, globalen seismologischen Netzwerks,
 - die Erfassung und Archivierung seismischer Wellenformdaten,
 - die schnelle Erdbebeninformation und das Monitoringsystem.
- Seit seiner Entwicklung hat GEOFON eine umfassende Big-Data-Expertise in Bezug auf die Aspekte *Volume*, *Variety*, *Velocity*, *Veracity* und *Value* erworben. In den letzten Jahren haben höhere Datenerfassungsraten der seismologischen Stationen, ebenso wie Kostenreduktionen der Instrumente zu einer exponentiellen Zunahme der erfassten Datenmenge geführt (Abb. 6). So wurden beispielsweise während des Jahres 2016 mehr als 18 TB seismischer Wellenformdaten aus etwa 10 000 Kanälen der weltweit verteilten Stationen archiviert. Das für GEOFON entwickelte Seedlink-Protokoll ist heutzutage der De-facto-Standard für die Echtzeitübertragung seismologischer Daten. Es ermöglicht nicht nur den Echtzeitempfang der Stationsdaten, sondern auch, diese bei Bedarf an andere Systeme bzw. Partner weiterzuleiten. Während des Jahres 2016 gab das GFZ auf diese Weise rund 100 TB Daten in Echtzeit oder mit nur minimaler Verzögerung weiter.

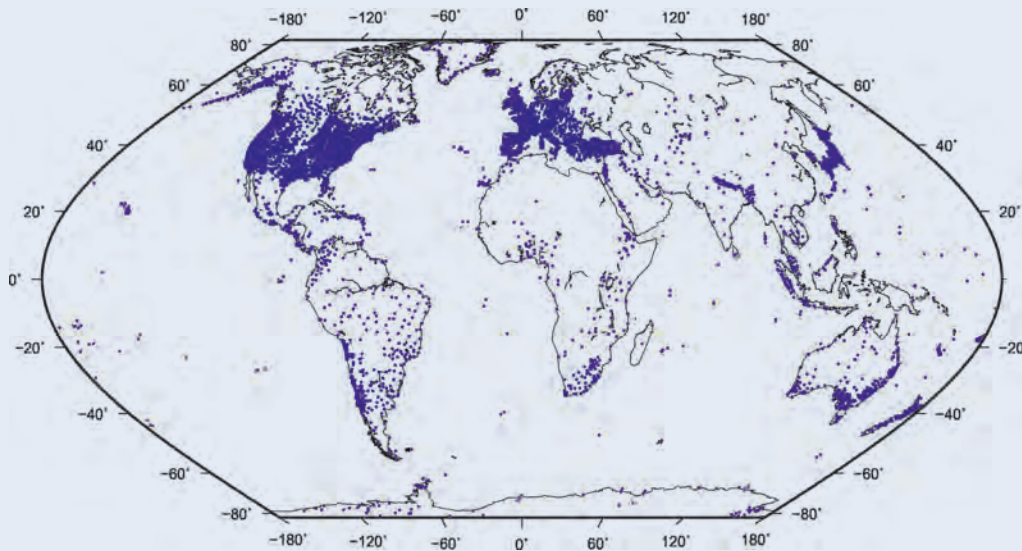


Abb. 4: Globale Verteilung der momentan etwa 12 000 verfügbaren GNSS-Stationen (Nevada Geodetic Laboratory)

Fig. 4: Global distribution of about 12,000 GNSS stations currently available (Nevada Geodetic Laboratory)

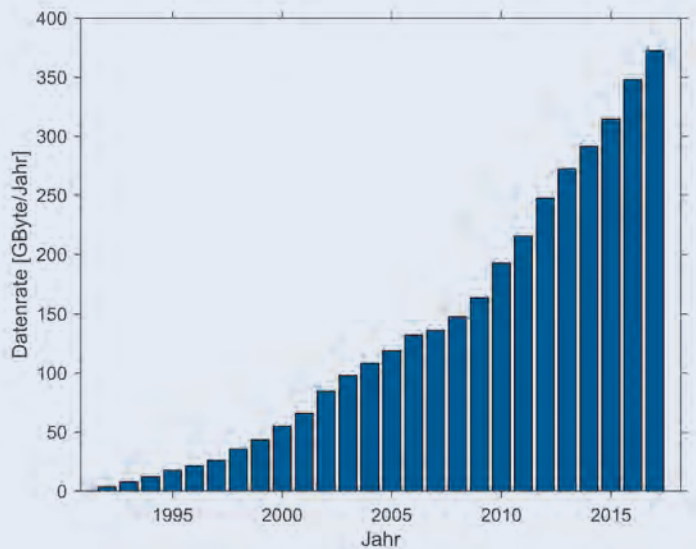


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des jährlichen VLBI-Datenvolumens (nach Verarbeitung der um zwei Größenordnungen umfangreicheren Rohdaten), das über die IVS-Datenbank zur Verfügung gestellt wird.

Fig. 5: Temporal evolution of yearly VLBI data (already processed raw data) which is available for download at the IVS data server.

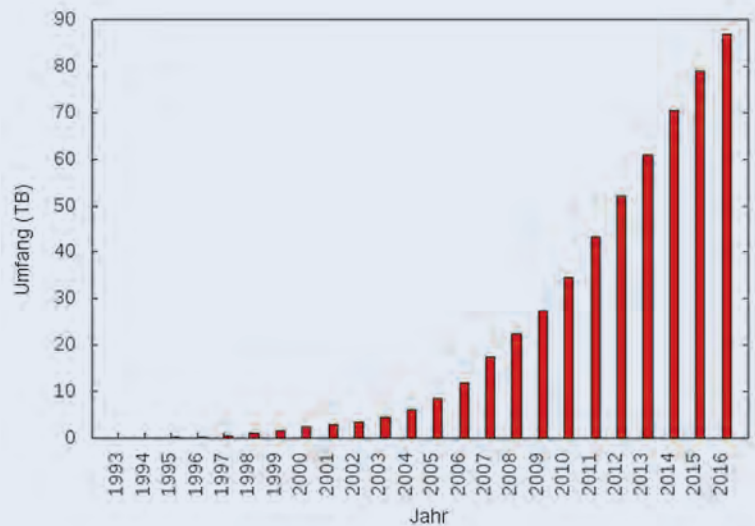


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung des GEOFON-Archivs

Fig. 6: Yearly evolution of the GEOFON data archive

Alle bei GEOFON archivierten Daten sind für die Nutzer über Standardprotokolle und Klientensoftware verfügbar. Mit Online-Diensten, die nach den Spezifikationen des Federation of Digital Seismic Networks implementiert worden sind, können Nutzerinnen und Nutzer die verfügbaren Datensätze durchsuchen, filtern und transferieren. Diese Art der Datenbestellung wird intensiv genutzt. Für die optimale Nutzung der Übertragungsbandbreite wurde am GFZ ein schnelles System entwickelt, das alle im Datenzentrum verfügbaren Produkte beschreibt (Trani et al., 2017). Damit können Datensätze nach verschiedenen Qualitätskriterien ausgesucht und gezielt angefordert werden.

Eine der Hauptaufgaben von GEOFON ist die automatische Prozessierung von Echtzeitdaten mit der am GFZ entwickelten SeisComP3-Software, um Ereignisparameter für internationale seismologische Zentren (z. B. European Mediterranean Seismological Centre – EMSC) bereitzustellen und über die GEOFON-Website zu veröffentlichen. Diese listet die jüngsten Erdbeben auf und wird pro Tag von durchschnittlich 30 000, im Fall großer Beben von bis zu 270 000 Interessierten aufgerufen. Für die Bebedetektion werden Wellenformen von mehr als 900 Stationen in Echtzeit erfasst und verarbeitet. Wie Abb. 7 zeigt, stehen die validierten Ergebnisse, abhängig von Magnitudenart und Stationsdichte, nach bereits zwei bis sechs Minuten zur Verfügung.

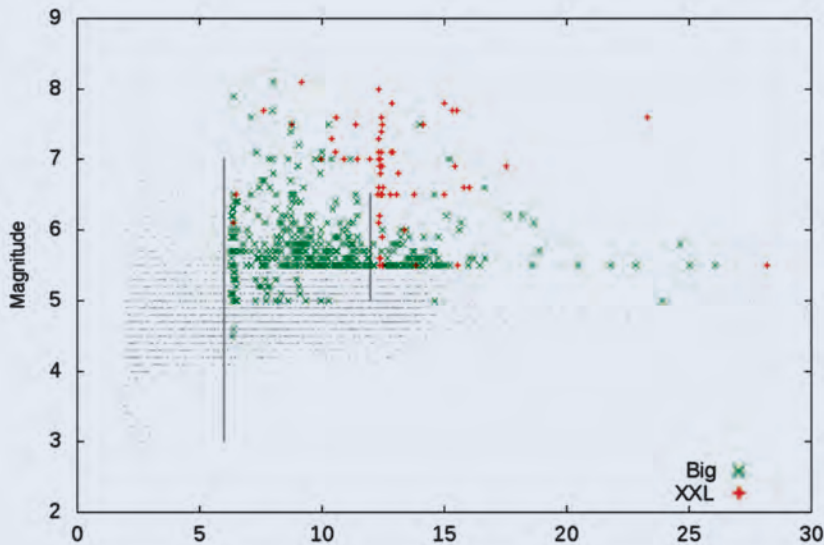


Abb. 7: Magnitude als Funktion der Erdbebenveröffentlichung (grau) und Alarmverzögerungen: grün („Big“) sind signifikante Ereignisse, rot („XXL“) sind große Erdbeben mit $M > 6,5$ bzw. $5,5$ in Europa von 785 GEOFON-Ereignissen im Jahr 2016. Zusätzlich sind die Zeiten der ersten automatischen Detektion von 3693 Ereignissen dargestellt.

Fig. 7: Magnitude versus earthquake announcements (gray) and warning latency: green („Big“) for significant earthquakes and red (XXL) for very large earthquakes of 785 GEOFON events in 2016. In addition, first detections of 3693 events with only automatic detection are shown.

Geomagnetismus

Das Erdmagnetfeld schützt das irdische Leben vor solarer Partikelstrahlung. Die kontinuierliche Messung des globalen Erdmagnetfelds mit einem Netzwerk von bodengebundenen Observatorien und satellitengestützten Instrumenten ist daher ein wichtiger Beitrag des GFZ zur Risikoanalyse und zum Verständnis des Systems Erde.

Die Swarm-Satellitenmission der ESA besteht aus drei baugleichen Satelliten, die auf polaren Bahnen die Erde umrunden (Stolle *et al.*, 2017). Das am GFZ implementierte Datenmanagement garantiert zu jedem Zeitpunkt die Aktualität der Datenbasis. Alle zur Verfügung stehenden Swarm-Daten werden vom Server der European Space Agency (ESA) ans GFZ transferiert und in eine PostgreSQL-Datenbank eingepflegt, um den schnellen Zugang zu den Daten zu gewährleisten. Diese Datenbank enthält die neuen Swarm-Daten, gängige geomagnetische Indizes, die die allgemeine geomagnetische Aktivität beschreiben, sowie bereits existierende, ältere Magnetfeldmodelle.

Daten der geomagnetischen Observatorien des GFZ werden über die internationalen, standardisierten Repositorien INTERMAGNET, SuperMAG und die World Data Centre (WDC) for Geomagnetism verteilt. Allein über INTERMAGNET werden 50 000 Dateien pro Jahr angefordert. Zusätzliche Zeitreihen, die für spezielle Studien kalibriert wurden, veröffentlicht der Dienst GFZ Data Services.

Mit den satelliten- und bodengestützten Daten werden u. a. globale Modelle des aktuellen Erdmagnetfelds erstellt (Abb. 8). Beispielsweise basiert das GFZ-Modell Mag.num auf der Verarbeitung von sechs bis zehn Millionen Eingabedaten. Die für ein vollständiges Modell erforderliche Bestimmung von rund 20 000 Parametern nimmt eine Rechenzeit von mehreren Tagen in Anspruch.

Innovative Big-Data-Ansätze

Im Folgenden werden zwei zukunftsweisende Ideen, die auf Big-Data-Konzepten aufbauen, vorgestellt.

Zusammenführung von GNSS-, VLBI- und SLR-Daten

Die geodätischen Weltraumverfahren VLBI, SLR, GNSS sowie DORIS werden üblicherweise kombiniert, um globale terrestrische Referenzrahmen zu bestimmen. Durch eine optimale Kombinationsstrategie können die verfahrensspezifischen Stärken ausgebaut und die Schwächen kompensiert werden, um einen Referenzrahmen höchstmöglicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit abzuleiten.

Derzeitig verfügbare Referenzrahmen, wie beispielsweise der ITRF2014 (Altamimi *et al.*, 2016), erreichen noch nicht die geforderte Genauigkeit von 1 mm und Langzeitstabilität von 0,1 mm pro Jahr. Diese sind allerdings erforderlich, um geophysikalische Prozesse, wie den globalen Meeresspiegelanstieg von rund 3 mm pro Jahr, zuverlässig bestimmen zu können. Das von der DFG geförderte Projekt GGOS-SIM (Simulation des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (GGOS), Schuh *et al.*, 2015) beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie die Genauigkeitsanforderungen von GGOS erfüllt werden können. Simulationen leisten hier einen wichtigen Beitrag, um die genauigkeitslimitierenden Einflüsse im Referenzrahmen besser nachvollziehen zu können, da ihre Eingangsdaten exakt sind. Es wurden Beobachtungen für 23 VLBI-, 38 SLR- und 131 GNSS-Stationen entsprechend den Genauigkeiten und Verfügbarkeiten der tatsächlich durchgeführten Beobachtungen simuliert. Damit ergeben sich rund 12 Mrd. GNSS-, rund 1 Mio. SLR- und rund 0,7 Mio. VLBI-Beobachtungen, die anschließend kombiniert werden (Glaser *et al.*, 2015, 2017). Simulationen erlauben es zudem, bestehende Stationsnetze um geplante Stationen zu erweitern und deren potenziellen Einfluss auf die Genauigkeit des Referenzrahmens zu untersuchen. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass sich die Genauigkeiten der Stationspositionen bereits um durchschnittlich 13 % verbessern, wenn mit der Realisierung einer VLBI-Station auf Tahiti eine Lücke in der globalen Netzabdeckung gefüllt wird (Glaser *et al.*, 2017).

Datenkombination GNSS und Seismometer

Wie bereits beschrieben, stellt die GEOFON-Infrastruktur schnelle Erdbebeninformationen, insbesondere auch Momenten-Tensorlösungen innerhalb weniger Minuten nach dem Ereignis zur

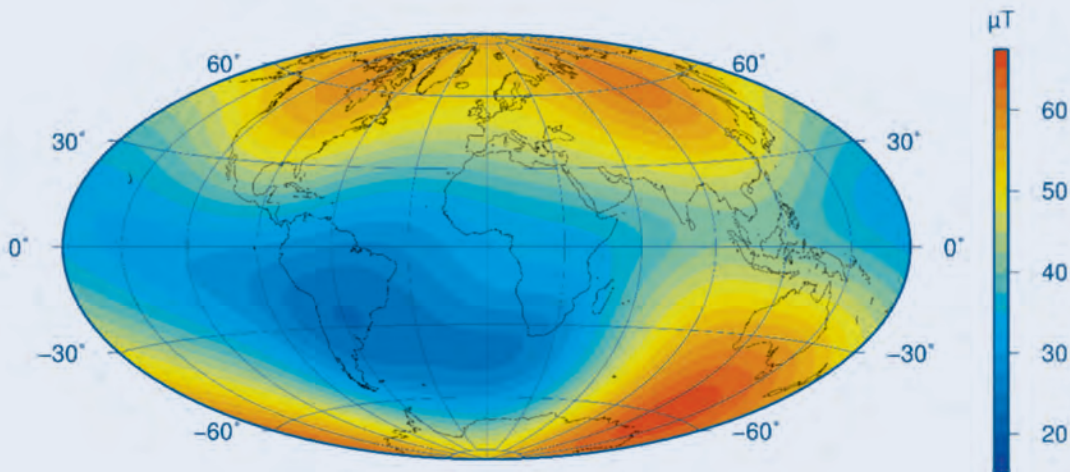


Abb. 8: Stärke des Erdmagnetfelds an der Erdoberfläche in Mikrottesla berechnet für das Jahr 2017 aus dem GFZ-Modell Mag.num

Fig. 8: Strengths of the geomagnetic field at Earth's surface in microtesla for year 2017 estimated by GFZ's model Mag.num

Verfügung. Für starke Erdbeben (Magnitude 7 und höher) liefern GNSS-Daten wertvolle Informationen zur besseren Charakterisierung der Quelle. Im Rahmen einer neuen Entwicklung hat das GFZ einen Echtzeit-GNSS-Dienst für ausgewählte Teststationen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern realisiert. Mit dem Ziel einer integrierten Echtzeitprozessierung wurde damit begonnen, eine Testerfassung von ausgewählten Stationen des vom GFZ betriebenen Integrierten Plattenrandobservatoriums Chile (IPOC) anzusteuern, bei der sowohl GNSS-Daten als auch seismische Daten in Echtzeit übertragen werden. Der Test fokussiert zunächst auf die technische Integration von GNSS-Datenerfassung und -prozessierung in seismologische Standard-Datenformate, damit diese ohne zusätzlichen Aufwand in existierende Prozessketten eingebunden werden können. Im nächsten Schritt sollen die Echtzeit-GNSS-Daten in die globale GEOFON-Routine zum Erdbebenmonitoring eingebunden und über seismologische Standarddienste verteilt werden.

Ausblick

Geodätische, seismologische und geomagnetische Beobachtungsdaten sind die Grundlage zum besseren Verständnis der Prozesse im System Erde. Um dabei der Forderung nach höchstmöglicher Genauigkeit und schneller Verfügbarkeit der Datenprodukte nachzukommen, arbeiten diese Geowissenschaften an der Grenze des technisch und wissenschaftlich Machbaren. Hierbei sind in den einzelnen Fachdisziplinen die fünf Big-Data-Aspekte *Volume*, *Variety*, *Velocity*, *Veracity* und *Value* unterschiedlich gewichtet. Während für Satellitendaten in erster Linie Beschränkungen in Bezug auf die Übertragungsbandbreite und Verzögerungszeiten mit Größenordnungen von einer Orbitperiode von Bedeutung sind, müssen in bodengebundenen Messnetzen mit heterogener Instrumentierung und Netzstruktur Herausforderungen bezüglich Datenvalidierung und Zuverlässigkeit der Datenübertragungen gelöst werden. Die Zusammenführung von Messdaten der verschiedenen boden- und weltraumgestützten Sensoren sowie ihre konsistente Prozessierung, Validierung und Assimilierung in komplexe Erdsystemmodelle tragen in zentraler Weise zur

zukünftigen Realisierung des Globalen Geodätischen Erdbeobachtungssystems GGOS bei.

Literatur

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Collilieux, X. (2016): ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. - *Journal of Geophysical Research*, 121, 8, pp. 6109–6131. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., Ware, R. H. (1992): GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. - *Journal of Geophysical Research*, 97, D14, pp. 15787–15801. DOI: <https://doi.org/10.1029/92JD01517>
- Dahle, C., Flechtner, F., König, R., Michalak, G., Neumayer, K.-H., Gruber, C., König, D. (2014): GFZ RL05: An Improved Time-Series of Monthly GRACE Gravity Field Solutions. - In: Flechtner, F., Sneeuw, N., Schuh, W.-D. (Eds.), *Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and future missions*, (GEOTECHNOLOGIEN Science Report ; 20) (Advanced Technologies in Earth Sciences), Berlin [u.a.] : Springer, pp. 29–39. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32135-1_4
- Deng, Z., Fritsche, M., Nischan, T., Bradke, M. (2016): Multi-GNSS Ultra Rapid Orbit-, Clock- & EOP-Product Series. DOI: <http://doi.org/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. - *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63, 12, pp. 1295–1304. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00248-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00248-0)
- Flechtner, F., Neumayer, K.-H., Dahle, C., Döbrowski, H., Fagiolini, E., Raimondo, J.-C., Güntner, A. (2016): What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications? - *Surveys in Geophysics*, 37, 2, pp. 453–470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y>
- 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. - *Journal of Global Positioning Systems: JGPS*, 11, 1, pp. 2–10. DOI: <https://doi.org/10.5081/jgps.11.1.2>
- Gendt, G., Dick, G., Reigber, C., Tomassini, M., Liu, Y. Z., Ramatschi, M. (2004): Near Real Time GPS Water Vapor Monitoring for Numerical Weather Prediction in Germany. - *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 1B, pp. 361–370. DOI: <https://doi.org/10.2151/jmsj.2004.361>

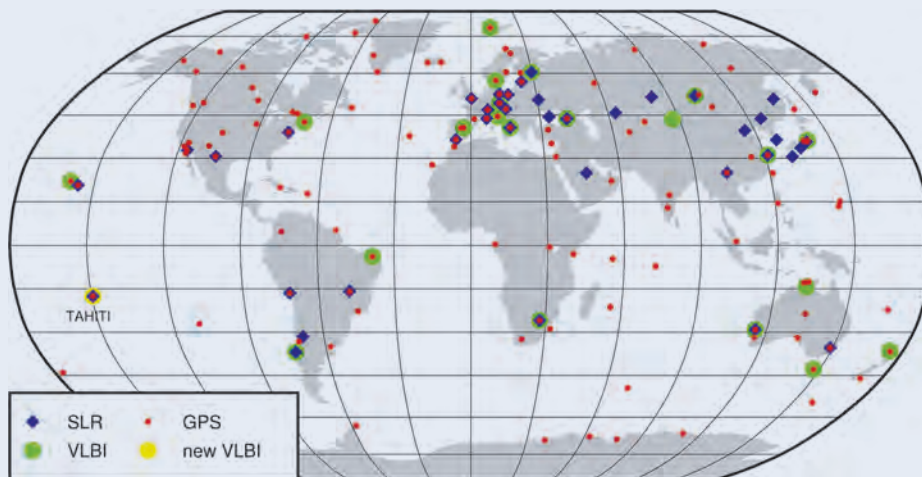


Abb. 9: Simulierte Stationsnetze bestehend aus 131 GPS- (rot), 38 SLR- (blau), 23 VLBI-Stationen (grün) sowie die zusätzliche VLBI-Station Tahiti (gelb)

Fig. 9: Simulated station networks consisting of 131 GPS (red), 38 SLR (blue), and 23 VLBI stations (green) with the new station in Tahiti (yellow)

Glaser, S., Ampatzidis, D., König, R., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Flechtner, F., Schuh, H. (2018): Simulation of VLBI Observations to Determine a Global TRF for GGOS. - In: Freymueller, J. T., Sánchez, L. (Eds.), *International Symposium on Earth and Environmental Sciences for Future Generations: Proceedings of the IAG General Assembly, Prague, Czech Republic, June 22-July 2, 2015*, (International Association of Geodesy Symposia ; 147), Cham : Springer, Online 2016, pp. 3–9. DOI: https://doi.org/10.1007/1345_2016_256

Glaser, S., König, R., Ampatzidis, D., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Flechtner, F., Schuh, H. (2017): A Global Terrestrial Reference Frame from simulated VLBI and SLR data in view of GGOS. - *Journal of Geodesy*, 91, 7, pp. 723–733. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1021-2>

Heinkelmann, R. (2013): VLBI Geodesy: Observations, Analysis and Results. - In: Jin, S. (Ed.), *Geodetic Sciences : Observations, Modeling and Applications*, Rijeka : InTech Open, pp. 127–156. DOI: <https://doi.org/10.5772/54446>

Irisov, V., Duly, T., Nguyen, V., Rocken, C., Gorbunov, M. (2017): Radio occultation profile results obtained from Spire's CubeSat GNSS-RO constellation – COSMIC – IROWG 2017 Abstracts (Estes Park, USA 2017)

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>

Pail, R., Bruinsma, S., Migliaccio, F., Förste, C., Goiginger, H., Schuh, W.-D., Höck, E., Reguzzoni, M., Brockmann, J. M., Abrikosov, O., Veicherts, M., Fecher, T., Mayrhofer, R., Krasbutter, I., Sanso, F., Tscherning, C. C. (2011): First GOCE gravity field models derived by three different approaches. - *Journal of Geodesy*, 85, 11, pp. 819–843. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0467-x>

Schuh, H., Behrend, D. (2012): VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry. - *Journal of Geodynamics*, 61, pp. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.07.007>

Schuh, H., König, R., Ampatzidis, D., Glaser, S., Flechtner, F., Heinkelmann, R., Nilsson, T. (2017): GGOS-SIM - Simulation of the Reference Frame for the Global Geodetic Observing System. - In: van Dam, T. (Ed.), *REFAG 2014: Proceedings of the IAG Commission 1 Symposium Kirchberg, Luxembourg, 13–17 October, 2014*, (International Association of Geodesy Symposia ; 146), Cham : Springer International Publishing, pp. 95–100. DOI: https://doi.org/10.1007/1345_2015_217

Stolle, C., Shprits, Y., Saynisch, J., Vervelidou, F., Matzka, J. (2017): Geomagnetismus und Partikelstrahlung im Weltraum. - *System Erde*, 7, 2, pp. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.07.02.5>

Trani, L., Koymans, M., Atkinson, M., Sleeman, R., Filgueira, R. (2017): WFCatalog: A catalogue for seismological waveform data. - In: *Computers & Geosciences*, 106, pp. 101–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.06.008>

Wickert, J., Dick, G., Ge, M., Schmidt, T., Semmling, M., Alshawaf, F., Arras, C., Asgarimehr, M., Babeyko, A. Y., Deng, Z., Heise, S., Klotz, J., Li, X., Lu, C., Männel, B., Ramatschi, M., Simeonov, T., Vey, S., Zus, F., Schuh, H. (2017): Erdbeobachtung mit Navigationssatelliten. - *System Erde*, 7, 2, pp. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.07.02.4>

Weiterführende Links

Geomagnetismus

www.gfz-potsdam.de/sektion/geomagnetismus/ueberblick

GFZ Data Services

dataservices.gfz-potsdam.de/portal

GEOFON

geofon.gfz-potsdam.de

IGS

www.igs.org

IVS

ivsc.gsfc.nasa.gov

Swarm-Mission

earth.esa.int/swarm

Nevada Geodetic Laboratory

geodesy.unr.edu