

Die Gestalt der Erde

Hochgenaue Referenzsysteme sind fundamental für viele Bereiche des täglichen Lebens. Beispielsweise bilden sie die Voraussetzung für die Nutzung von Navigationssystemen. Auch zahlreiche Aussagen zum globalen Wandel setzen ein stabiles Referenzsystem voraus.

VON DETLEF ANGERMANN, MANUELA SEITZ, MATHIS BLOSSFELD,
LAURA SÁNCHEZ UND FLORIAN SEITZ

GEODÄTISCHE Referenzsysteme und deren Realisierungen, die als Referenzrahmen bezeichnet werden, bilden die Grundlage für die Beschreibung der Gestalt der Erde sowie von Vorgängen auf der Erdoberfläche, im erdnahen Raum und im Erdinnern. Sie sind damit wesentlich für nahezu alle Arbeiten in der geodätischen Positionierung, der Navigation, für die Referenzierung von Geoinformationsdaten und für wissenschaftliche Untersuchungen des Systems Erde. Dazu gehören beispielsweise die Bestimmung der Bewe-

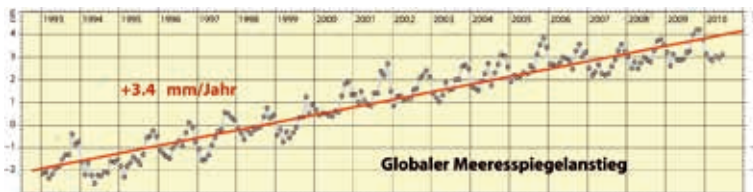


Abb. 1: Meeresspiegelanstieg aus Daten der Satellitenaltimetrie von 1993 bis 2010.

gung der Lithosphärenplatten, der Variation des Meeresspiegels, periodischer, episodischer und säkularer Bewegungen der Erdoberfläche sowie von Veränderungen der Erdrotation und der Orientierung der Erde im Weltraum.

Geodätische Referenzsysteme werden definiert durch eine Auswahl von Konstanten, Modellen und Parametern, die zur Festlegung geodätischer Größen (z. B. Positionskordinaten und deren zeitliche Veränderungen, also Geschwindigkeiten) erforderlich sind. Vereinbarte Konstanten sind u. a. die Lichtgeschwindigkeit oder die geozentrische Gravitationskonstante GM . Als geometrisches Modell für die Beschreibung der Bewegung von Körpern (Punkten) auf der Erde wird ein dreidimensionales Koordinatensystem verwendet. Dieses wird durch die Festlegung eines Koordinatenursprungs (im Massenzentrum der Erde), dreier orthogonaler Basisvektoren und einer Längeneinheit beschrieben. Das so definierte Referenzsystem wird durch einen Referenzrahmen festgelegt, also durch eine Anzahl

auf der Erdoberfläche vermarkter Vermessungspunkte, deren Positionen und Geschwindigkeiten man mittels geodätischer Raumberechnungsverfahren mit hoher Präzision bestimmen kann.

Die hohen Genauigkeiten der Raumberechnungsverfahren im Bereich von wenigen Millimetern (global) erlauben es heute, auch Folgen des Globalen Wandels wie z. B. den Meeresspiegelanstieg quantitativ zu erfassen. Seit nahezu 20 Jahren liefert die Satellitenaltimetrie wertvolle Beobachtungen für die Bestimmung des gegenwärtigen Meeresspiegelanstiegs, der nach Berechnungen am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) heute gut 3 mm pro Jahr beträgt (Abb. 1). Dieser Wert steht in Einklang mit anderen wissenschaftlichen Studien und Ergebnissen, etwa dem bekannten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) von 2007. Dem IPCC-Bericht ist auch zu entnehmen, dass der gegenwärtige Anstieg etwa doppelt so groß ist wie das Langzeitmittel für das 20. Jahrhundert von 1,7 mm pro Jahr, was auf eine Beschleunigung dieses Phänomens hindeutet. Ein hochgenaues und langzeitstabiles Referenzsystem ist hier von fundamentaler Bedeutung, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

In der Geodäsie sind zwei Arten von Referenzsystemen gebräuchlich: raumfeste Systeme, mit denen man Vorgänge im Weltraum (z. B. die Navi-





schen Produkten) international hervorragend koordinieren. Auch das DGFI ist über diese Dienste intensiv vernetzt. Zahlreiche seiner Mitarbeiter gestalten zudem an maßgeblichen Positionen innerhalb der Dienste die Zielrichtung künftiger internationaler Forschungsaktivitäten mit. Abbildung 2 zeigt das Geodätische Observatorium Wettzell im Bayerischen Wald mit den Raumb Beobachtungsverfahren VLBI, SLR und GNSS. Die gegenwärtige weltweite Stationsverteilung der vier Beobachtungsverfahren ist in Abbildung 3 dargestellt.

Realisierung des terrestrischen Referenzsystems

Das terrestrische Referenzsystem wird durch den Internationalen Terrestrischen Referenzrahmen (engl.: International Terrestrial Reference Frame, ITRF) realisiert,

der einen Satz von Positionen und Geschwindigkeiten der Beobachtungsstationen umfasst. Den ITRF berechnet man, indem man Stationskoordinaten (Positionen und Geschwindigkeiten) kombiniert, die aus den Beobachtungen der geodätischen Raumb Beobachtungsverfahren VLBI, SLR, GNSS und DORIS abgeleitet werden. Bei der Kombination werden die individuellen Stärken der verschiedenen Verfahren optimal ausgeschöpft. Die Beobachtungen der verschiedenen Verfahren beziehen sich in der Regel nicht auf gemeinsame Referenzpunkte. Für die Kombination werden daher terrestrisch oder mit GPS gemessene Differenzvektoren (engl.: local ties) zwischen benachbarten Instrumenten verschiedener Raumverfahren benötigt. Realisierungen des terrestrischen Referenzsystems werden vom Internationalen Erdrotations- und Referenzsystemdienst (engl.: International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) seit 1988 in Abständen von einem bis zu fünf Jahren veröffentlicht.

Die aktuelle Realisierung: ITRF2008

Die neueste Realisierung des terrestrischen Referenzsystems, der ITRF2008, wurde 2011 vom ITRS-Produktzentrum (Institute Géographique National [IGN], Frankreich) veröffentlicht. Er wurde von zwei Kombinationszentren des IERS, dem DGFI

gation von Raumfahrzeugen) beschreibt, und erdfeste Systeme, welche zur Referenzierung von Vorgängen auf der Erdoberfläche dienen.

Geodätische Raumb Beobachtungsverfahren

Raumb Beobachtungsverfahren sind Messverfahren, die mit Hilfe extraterrestrischer Objekte (z. B. Satelliten, Mond, Quasare) die Beobachtung von Vorgängen im Erdsystem ermöglichen. Wichtige geodätische Anwendungen sind die Bestimmung von Stationspositionen auf der Erdoberfläche und deren zeitlicher Veränderung, die Bestimmung von Quasarpositionen, die Beschreibung der Rotation der Erde und ihrer Orientierung im Weltraum sowie die Bestimmung des zeitvariablen Erdschwerefeldes. Für die Realisierung von geodätischen Referenzsystemen werden heute vier Raumb Beobachtungsverfahren verwendet: Interferometrie auf sehr langen Basislinien (engl.: Very Long Baseline Interferometry, VLBI), Laserentfernungsmessungen zu Satelliten (engl.: Satellite Laser Ranging, SLR), Globale Navigationssysteme wie GPS, GLONASS oder Galileo (engl.: Global Navigation Satellite System, GNSS) und das französische Doppler-Messverfahren zu Satelliten (engl.: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite, DORIS).

Die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) hat wissenschaftliche Dienste für diese Raumb Beobachtungsverfahren eingerichtet, welche die Arbeiten (Stationsbetrieb, Datenmanagement, Auswertung und Bereitstellung von geodäti-

Abb. 2: Das Geodätische Observatorium Wettzell wird gemeinsam vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) an der TU München betrieben. In der Aufnahme von 2011 sind die kürzlich installierten Twin-Teleskope, das 20-m-Radioteleskop sowie die Kuppeln der zwei Lasermesssysteme deutlich zu sehen.

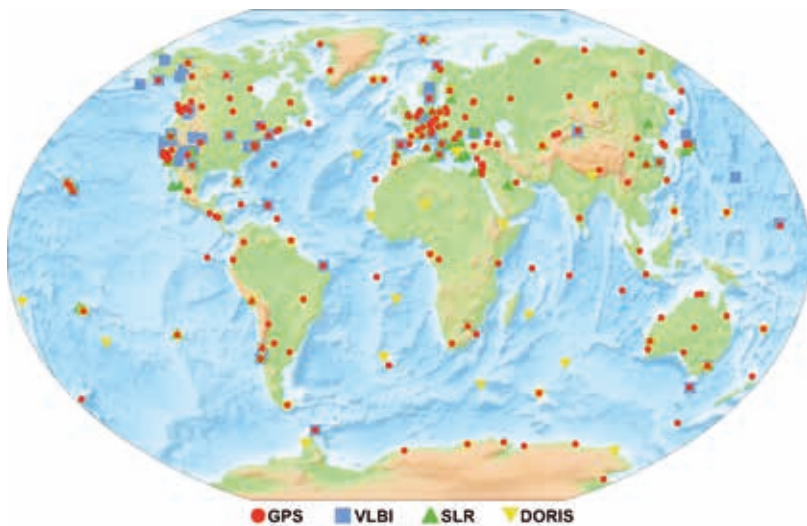


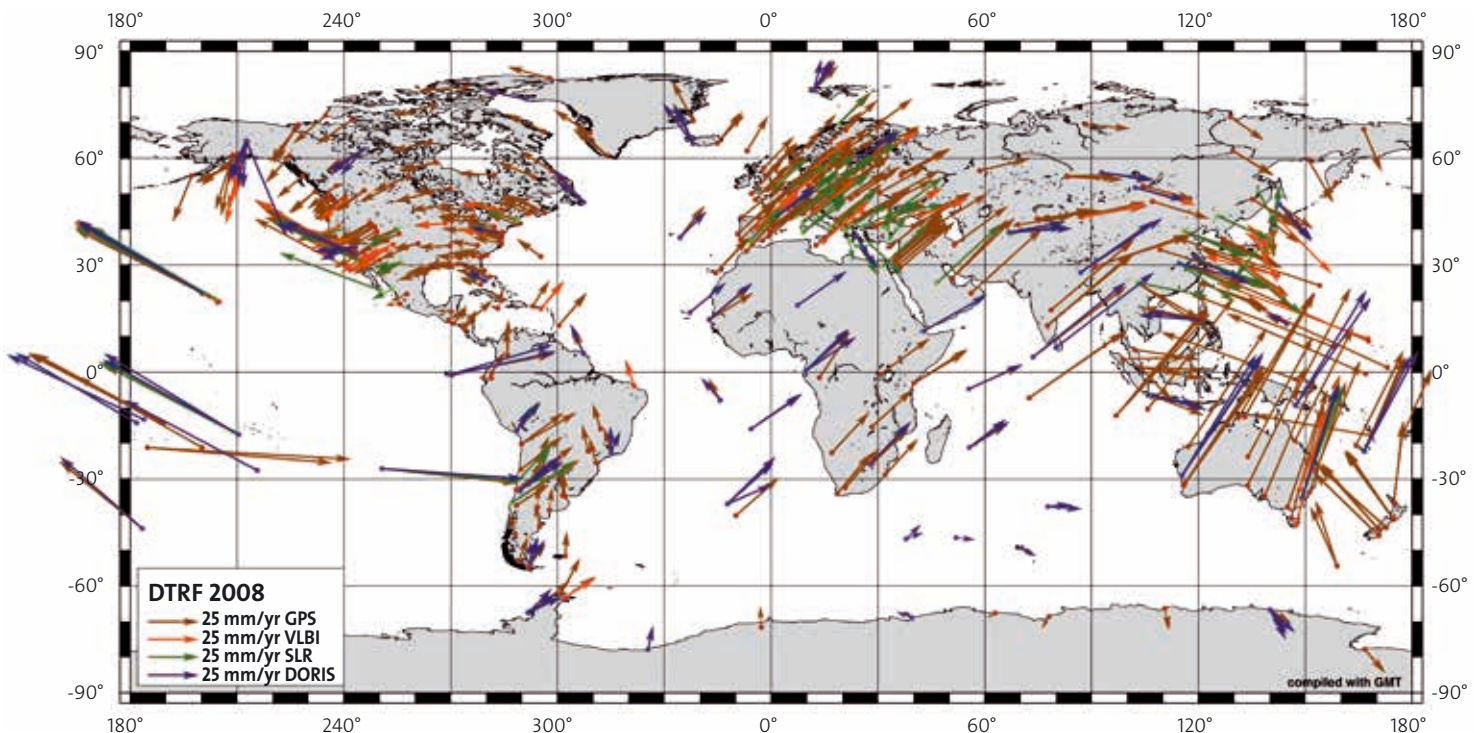
Abb. 3: Globale Beobachtungsnetze der geodätischen Raumbeobachtungsverfahren.

und dem IGN, berechnet. Die Eingangsdaten für den ITRF2008 sind Zeitreihen wöchentlicher GPS-, SLR- und DORIS-Lösungen sowie 24-stündiger VLBI-Kampagnen in Form ausgeglichener Stationskoordinaten und Erdorientierungsparameter (EOP), die von den internationalen Diensten der IAG zur Verfügung gestellt wurden. Die Daten der Raumverfahren liegen für unterschiedliche Zeitspannen von 12 bis 29 Jahren vor (Tab. 1).

Tab. 1: Eingangsdaten für den ITRF2008.

Technik	Daten	Zeitspanne
GPS	wöchentlich	1980 – 2009
VLBI	24-stündig	1983 – 2009
SLR	wöchentlich	1993 – 2009
DORIS	wöchentlich	1997 – 2009

Abb. 4: Horizontale Stationsgeschwindigkeiten der am DGFI berechneten Lösung DTRF2008.



Das DGFI und das IGN haben durch Kombination der Raumbeobachtungsdaten jeweils eine Lösung für den ITRF2008 berechnet. So ist die unentbehrliche Qualitätskontrolle der Ergebnisse gewährleistet. Ein Vergleich beider Lösungen zeigt eine mittlere Übereinstimmung der Stationspositionen von besser als 3 mm und der Geschwindigkeiten von besser als 1 mm pro Jahr. Abbildung 4 zeigt die horizontalen Geschwindigkeiten der am DGFI berechneten Lösung DTRF2008.

Verdichtung des ITRF in Lateinamerika und in der Karibik

Der ITRF wird durch regionale Referenzrahmen verdichtet, um a) den Zugang des globalen Referenzrahmens auf regionaler bzw. nationaler Ebene zu ermöglichen, b) die Grundlage für wissenschaftliche Anwendungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu gewährleisten und c) die Erzeugung und Nutzung präziser georeferenzierter Daten zu unterstützen.

Das DGFI ist maßgeblich an den Arbeiten zum regionalen Referenzrahmen für Lateinamerika und die Karibik (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, SIRGAS) beteiligt. Das SIRGAS-Netz besteht gegenwärtig aus etwa 300 kontinuierlich beobachtenden GNSS-Stationen. Die Beobachtungen dieser Stationen werden wöchentlich von den SIRGAS-Analyse-

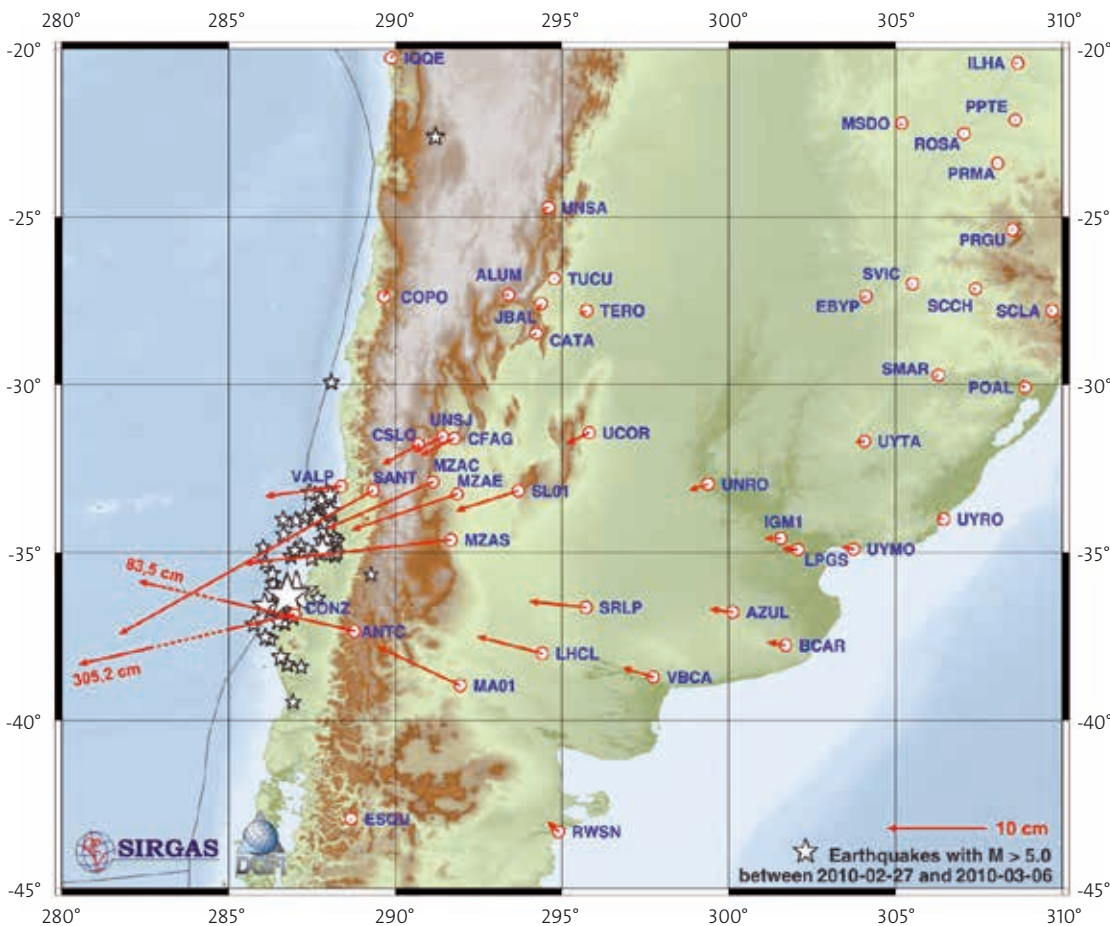


Abb. 5: Punktverschiebungen, verursacht durch das Maule-Erdbeben ($M_w=8,8$) vom 27. Februar 2010 in Chile.

zentren prozessiert, um die folgenden Produkte zu berechnen und bereitzustellen: wöchentliche Lösungen für Stationspositionen als Beitrag zu globalen GPS-Lösungen sowie für Anwendungen in Lateinamerika (z. B. GPS-Positionierung, Vermessung, Kataster, etc.) und Mehrjahreslösungen mit Stationspositionen und konstanten Geschwindigkeiten für die Bestimmung der Kinematik des Netzes. Die operationelle Infrastruktur von SIRGAS ist möglich dank der aktiven Beteiligung vieler lateinamerikanischer und karibischer Institutionen, die nicht nur die Messungen ihrer Stationen zur Verfügung stellen, sondern auch SIRGAS-Analysezentren betreiben, um die Verarbeitung der Beobachtungsdaten routinemäßig durchführen zu können.

Am 27. Februar 2010 ereignete sich in Chile in der Nähe von Concepción das Maule-Erdbeben mit einer Magnitude von $M_w=8,8$ auf der Momentenskala. Dieses Erdbeben verursachte an der chilenischen Küste Punktverschiebungen von über drei Metern, auch im Osten von Argentinien waren Veränderungen von einigen Zentimetern noch deutlich messbar (Abb. 5). Als Konsequenz ist der jüngste terrestrische Referenzrahmen ITRF2008 in weiten Teilen Südamerikas nicht mehr als Referenz nutzbar. Deshalb muss für aktuelle Positionierungsarbeiten auf die wöchentlichen SIRGAS-Lösungen zurückgegriffen werden.

Schlussbemerkungen

Dank der hervorragenden Zusammenarbeit der zahlreichen beteiligten Institutionen konnten in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte sowohl bei den geodätischen Raumberechnungsverfahren als auch bei der Entwicklung verbesserter Auswerteverfahren und Kombinationsmethoden für die Berechnung der Referenzrahmen erzielt werden. Mit den heute verfügbaren Genauigkeiten hat sich das Spektrum der Geodäsie enorm ausgeweitet, bis hin zur quantitativen Erfassung von Veränderungen im System Erde z. B. als Folgen des globalen Wandels.

Das DGFI beschäftigt sich intensiv mit der Forschung auf dem Gebiet der Referenzsysteme, um weitere Fortschritte zu erzielen. Zu nennen ist etwa die Verfeinerung der Kombinationsmethodik bei der Berechnung des terrestrischen Referenzrahmens, um z. B. nichtlineare Stationsbewegungen besser berücksichtigen zu können. Ein zentrales Thema ist die Bestimmung des raumfesten und des erdfesten Referenzrahmens in einer gemeinsamen Ausgleichung, um eine Konsistenz beider Referenzrahmen und der sie verbindenden Erdorientierungsparameter zu erreichen.

DIE AUTOREN

Dr.-Ing. Detlef Angermann, Dr.-Ing. Manuela Seitz, Mathis Bloßfeld und Laura Sánchez sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI).

Prof. Dr.-Ing. Florian Seitz, Inhaber des Lehrstuhls für Geodätische Geodynamik an der TU München, leitet das Institut seit 2012.