

Simulation globaler terrestrischer Referenzrahmen für das Globale Geodätische Beobachtungssystem GGOS

Susanne Glaser, Harald Schuh und Rolf König

Zusammenfassung

Aktuelle globale terrestrische Referenzrahmen, wie der ITRF2014, erfüllen bisher nicht die geforderte Genauigkeit des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems GGOS der IAG (Internationale Assoziation für Geodäsie). Mittels Simulationen können der Einfluss zukünftiger Stationen und Satellitenkonstellationen, geplante Weiterentwicklungen der Weltraumverfahren sowie alternative Kombinationsstrategien, wie z.B. die Ko-lokation im Weltraum durch spezielle Satelliten, auf den Referenzrahmen untersucht werden. Einzelne Stationen der Beobachtungsnetze spielen dabei eine zentrale Rolle, hervorzuheben ist das Radioteleskop des Argentinisch-Deutschen Geodätischen Observatoriums (AGGO) in La Plata.

Summary

Current global terrestrial reference frames, such as the ITRF2014, do not yet meet the required accuracy of the Global Geodetic Observing System GGOS of the IAG (International Association of Geodesy). Simulations allow to investigate the impact of future stations and satellite constellations, of planned further developments of the space techniques and of alternative combination strategies, such as co-location in space by special satellites, on the reference frame. Individual stations of the observing networks play a crucial role, as highlighted by the radio telescope of the Argentine-German Geodetic Observatory (AGGO) in La Plata.

Schlüsselwörter: Geodätische Weltraumverfahren, Globale terrestrische Referenzrahmen, Globales Geodätisches Beobachtungssystem

1 Einleitung und Motivation

Die Realisierung eines Referenzsystems wird als Referenzrahmen bezeichnet und wird für den globalen terrestrischen Referenzrahmen mittels dreidimensionaler kartesischer Koordinaten (X, Y, Z) global verteilter Beobachtungsstationen und deren zeitlicher Veränderung angegeben. In der letzten Realisierung wurde dieses lineare Modell erweitert, indem postseismische Deformationen und saisonale Signale Berücksichtigung finden. Geodätische Referenzrahmen stellen die unerlässliche Grundlage zur Erdsystembeobachtung dar (Müller und Pail 2019), da sie den absoluten Bezug der zunächst nur relativen geodätischen Messgrößen ermöglichen. Folgend

der klassischen Definition der Geodäsie von Friedrich Robert Helmert als »der Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche« (Helmert 1880) kann die Bereitstellung geeigneter Referenzrahmen als eine der Kernaufgaben der Geodäsie angesehen werden.

Im Rahmen der Realisierung eines Globalen Geodätischen Beobachtungssystems (*Global Geodetic Observing System – GGOS*) der IAG (*International Association of Geodesy*) wird für einen Referenzrahmen gefordert, dass dieser eine Genauigkeit von 1 mm und eine Langzeitstabilität von 1 mm/Dekade aufweisen soll (Gross et al. 2009). Diese Anforderungen sind vorrangig durch geophysikalische Prozesse innerhalb des Erdsystems motiviert, die im globalen Mittel als relativ klein angesehen werden können. Ein besonders relevantes Beispiel, gerade in Zeiten des Klimawandels, ist dabei der globale Meeresspiegelanstieg von aktuell ungefähr $3,1 \pm 0,3$ mm/Jahr mit einer Beschleunigung von $0,1$ mm/Jahr² (WCRP Global Sea Level Budget Group 2018, IPCC Special Report 2019, Oppenheimer et al. 2019).

Die GGOS-Anforderungen müssen erfüllt werden, um belastbare und zuverlässige Aussagen zu Klimaindikatoren, wie dem globalen Meeresspiegelanstieg, treffen zu können. Die Vereinten Nationen haben die Wichtigkeit genauer und stabiler globaler Referenzrahmen in ihrer im Februar 2015 verabschiedeten UN-Resolution No. 69/266 »A global geodetic reference frame for sustainable development« (United Nations Resolution A/RES/69/266) deutlich gemacht. Dies ist die erste UN-Resolution, die sich mit Geodäsie beschäftigt, und hebt dieses Thema auf eine politische Ebene.

Der aktuelle Stand ist jedoch, dass die zurzeit verfügbaren globalen Referenzrahmen, wie die aktuelle Realisierung ITRF2014 (*International Terrestrial Reference Frame 2014*) des Internationalen Terrestrischen Referenzsystems ITRS, fast eine Größenordnung ungenauer sind als die von GGOS geforderten und benötigten Genauigkeiten. Es besteht daher in der gesamten geodätischen Gemeinschaft ein sehr großes Interesse an einem globalen Referenzrahmen, der die o.g. Anforderungen erfüllt. Simulationen eignen sich in besonderer Weise für das Abschätzen potenzieller Verbesserungen aktueller und zukünftiger Referenzrahmen. Nachdem die Bestimmung globaler Referenzrahmen in Abschnitt 2 erläutert wird, werden verschiedene Ergebnisse der Referenzrahmensimulationen im Hinblick auf GGOS in Abschnitt 3 vorgestellt. Abschnitt 4 fasst die erhaltenen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick für zukünftige Arbeiten.

2 Bestimmung globaler terrestrischer Referenzrahmen

Die vier geodätischen Weltraumverfahren

- Globale Navigationssatellitensysteme (*Global Navigation Satellite Systems* – GNSS),
- Laserentfernungsmessungen zu Satelliten (*Satellite Laser Ranging* – SLR),
- Radiointerferometrie auf sehr langen Basislinien (*Very Long Baseline Interferometry* – VLBI), sowie das
- französische Dopplermessverfahren (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* – DORIS)

werden kombiniert, um einen bestmöglichen globalen terrestrischen Referenzrahmen zu bestimmen. Jedes der Verfahren weist individuelle Stärken und Schwächen auf, sodass nur eine optimale Kombination erlaubt, einen Referenzrahmen mit höchster Genauigkeit und Stabilität zu erhalten.

Die aktuelle offizielle Realisierung ITRF2014 weist eine Genauigkeit von ungefähr 3 mm zur Bezugsepoche 2010.0 und eine Stabilität von 0,2 mm/Jahr für den Ursprung auf (Altamimi et al. 2016). Dies betrifft allerdings nur die innere Genauigkeit in Bezug auf die vorherige Realisierung ITRF2008 (Altamimi et al. 2011). Der Netzmaßstab ist mit einer größeren Unsicherheit behaftet. Dieser wurde bisher als gewichtetes Mittel der Maßstäbe von SLR und VLBI erhalten. Obwohl beide Techniken den gleichen oder einen sehr ähnlichen Netzmaßstab zeigen sollten, gibt es einen Unterschied zwischen beiden Techniken von 1,37 ppb zur Epoche 2010.0, was auf der Erdoberfläche nahe dem Äquator fast 9 mm entspricht. Vergleicht man diese Genauigkeiten mit der von GGOS geforderten Genauigkeit von 1 mm, wird deutlich, dass eine erhebliche Diskrepanz zwischen aktuell erreichbarer und benötigter Genauigkeit vorliegt.

Neben der offiziellen Realisierung ITRF2014, die am Kombinationszentrum IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière) in Paris erstellt wird, gibt es noch zwei weitere aktuelle Realisierungen, die an ITRS Kombinationszentren des IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) erstellt werden. Der DTRF2014 wird am Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM; Seitz et al. 2016) und der JTRF2014 am Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA in Pasadena, USA (Abbondanza et al. 2017) berechnet.

Generell zeigen die Realisierungen DTRF2014 und ITRF2014 eine gute Übereinstimmung im Bereich weniger Millimeter für die GNSS-, VLBI- und SLR-Stationen und einiger Millimeter im Falle der DORIS-Stationen (Seitz et al. 2015). Der JTRF2014 stimmt mit dem ITRF2014 ebenfalls im Millimeterbereich überein (Abbondanza et al. 2017). Festzustellen ist jedoch, dass die Diskrepanz im Netzmaßstab zwischen VLBI und SLR für den DTRF2014 wesentlich kleiner ist als für den ITRF2014. Basierend auf Untersuchungen von Bloßfeld et al. (2018) zeigen sich im

DTRF2014 nur sehr geringe Unterschiede im Netzmaßstab in den Einzeltechniklösungen von SLR und VLBI. Die Ursache der Diskrepanz zwischen beiden Techniken scheint nicht in den Techniken, sondern in der gewählten Kombinationsstrategie begründet zu sein. Andere Studien (Sarti et al. 2011, Altamimi et al. 2016, Appleby et al. 2016, Gross und Herring, 2017) zeigen nach wie vor eine unzureichende Modellierung von Restsystematiken in den einzelnen Techniklösungen. In Vorbereitung auf die nächste Realisierung des ITRS, dem ITRF2020, werden umfassende Bestrebungen unternommen, um diese Restsystematiken zu reduzieren. Das betrifft zum einen eine verbesserte Behandlung der SLR-spezifischen Entfernungabweichungen (*range biases*; Luceri et al. 2019) und zum anderen die Modellierung der Deformationen einiger VLBI-Radioteleskope aufgrund von Selbstgravitation (Sarti et al. 2011, Nothnagel et al. 2019).

Es kann festgestellt werden, dass die Genauigkeiten aktueller Referenzrahmen aufgrund der technik-spezifischen Systematiken limitiert sind. Die Kombination mit klassischen Messverfahren, wie auch innovative Methoden, wie die Ko-lokation im Weltraum (d. h. alle vier geodätischen Weltraumverfahren auf einem Satelliten), sollten Gegenstand zukünftiger intensiver Forschung sein (Schuh et al. 2015a, Müller und Pail 2019).

3 Simulationsstudien

Simulationen erlauben es, den Einfluss der einzelnen Techniklösungen und der Kombinationsstrategie auf den Referenzrahmen zuverlässig und eindeutig zu beurteilen (Schuh et al. 2015b). Dazu wurden die Beobachtungsgrößen aller vier Techniken, die aktuell zur Erstellung von globalen terrestrischen Referenzrahmen beitragen, über einen Zeitraum von sieben Jahren (2008–2014) simuliert, wobei von den vier Systemen des GNSS nur GPS (*Global Positioning System*) betrachtet wurde. Ausschlaggebend ist, dass die Simulationen die reale Situation der Techniken hinsichtlich Genauigkeit und Verfügbarkeit der Beobachtungen möglichst gut widerspiegeln. Auch das für die Simulationen angesetzte Netz beinhaltet tatsächlich vorhandene ITRF-Stationen (Abb. 1), wobei im Fall von GPS nur einige Stationen ausgewählt wurden, um den Rechenaufwand zu begrenzen.

Die stochastischen Eigenschaften der simulierten Beobachtungen basieren auf normalverteilten zufälligen Unsicherheiten; es wurden aber keine systematischen Unsicherheiten oder Unstetigkeiten, wie sie gewöhnlich auftreten können, simuliert. Das hat den Vorteil, dass die Eingangsdaten bekannt sind und der Einfluss auf die kombinierte Lösung, den finalen Referenzrahmen, eindeutig untersucht werden kann. Im Falle von VLBI wurden zusätzlich die relevanten stochastischen Unsicherheiten in Form atmosphärischer Turbulenzen und des Verhaltens der Stationsuhren simuliert (Böhm et al. 2006, Nilsson und Haas 2010, Pany et al. 2011, Plank et al. 2013).

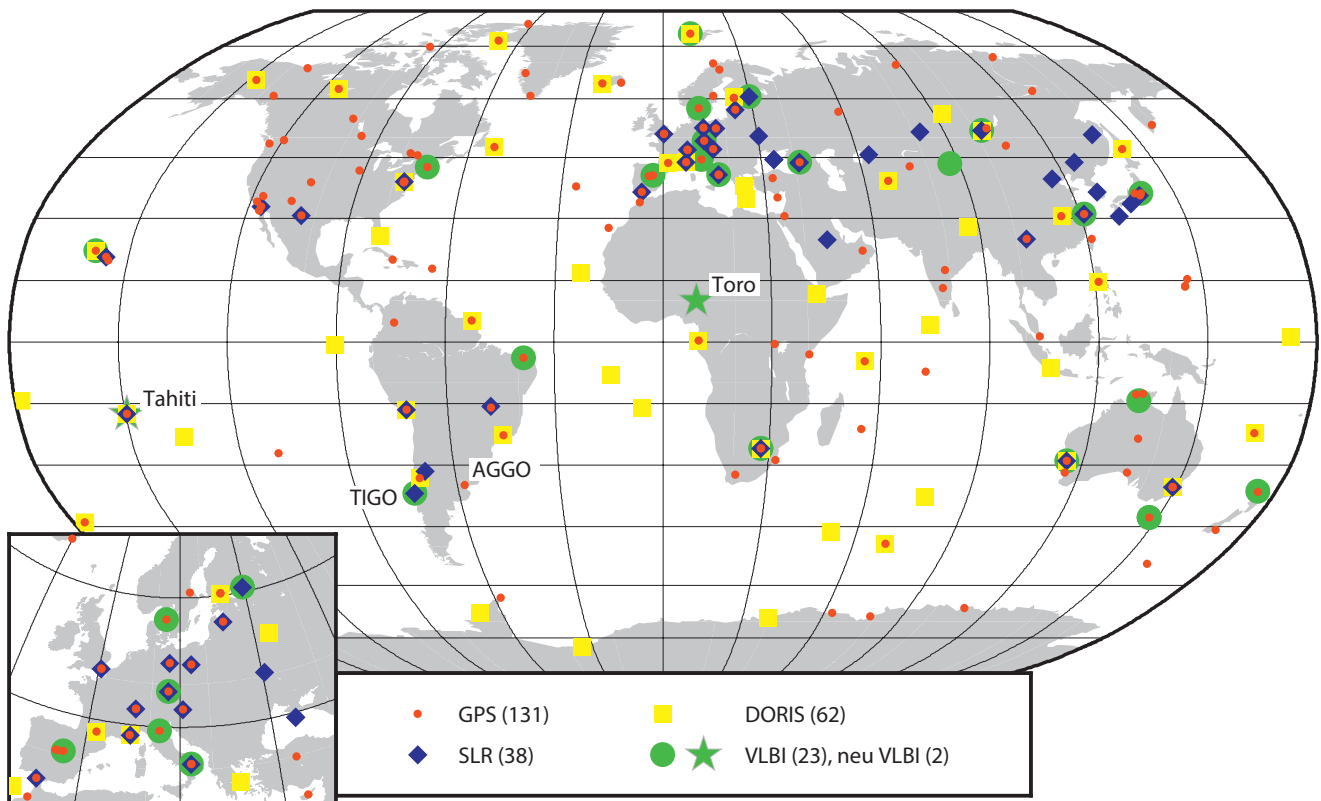


Abb. 1: Simulation aktueller Stationsnetze von GPS, SLR, VLBI und DORIS, zusätzliche VLBI-Stationen Tahiti (Französisch-Polynesien) und Toro (Nigeria), gekennzeichnet mit einem grünen Stern, sowie das Transportable Integrierte Geodätische Observatorium (TIGO) in Concepción (Chile) und das Argentinisch-Deutsche Geodätische Observatorium (AGGO) in La Plata (Argentinien).

Angefangen mit der Simulation der Einzeltechniklösungen aktueller Stationsnetze wurden für VLBI die zwei standardmäßigen 24-Stunden-Sessions pro Woche über einen Zeitraum von sieben Jahren für ein globales Netz aus 23 bestehenden Beobachtungsstationen unter Verwendung der realen Beobachtungspläne (»Schedules«) für verschiedene Varianzen der normalverteilten zufälligen Unsicherheiten simuliert (Glaser et al. 2016). Für bestehende Stationsnetze wurde im Folgenden für die Varianz der normalverteilten zufälligen Unsicherheiten die Unsicherheit der realen Beobachtungen im gleichen Zeitraum verwendet. Diese Lösung stimmt mit der a priori Lösung, hier ITRF2008, im Bereich weniger Millimeter überein.

Die VLBI- und SLR-Stationsnetze weisen global gesehen eine inhomogene Verteilung mit zudem deutlich weniger Stationen im Vergleich zu GNSS und DORIS auf. Eine Erweiterung des VLBI-Bodennetzes um einzelne Stationen der nächsten Generation des VLBI-Systems (VLBI Global Observing System – VGOS; Abb. 1) zeigte eine Verbesserung der geschätzten Stationspositionen (Standardabweichungen gemittelt über alle Stationen) um 13 % im Falle einer einzigen zusätzlichen Station auf Tahiti, Französisch-Polynesien, und um 12 % für Toro, Nigeria, in Bezug auf eine Referenzlösung. Hinsichtlich Genauigkeit und Verfügbarkeit der Beobachtungen wurde die Referenzlösung konsistent zu den Lösungen mit den zusätzlichen Stationen bestimmt. Die Erdrotationsparameter (terrestrische Polkoordinaten x-Pol, y-Pol

sowie UT1-UTC) verbessern sich ebenfalls deutlich bereits durch einzelne zusätzliche Stationen, falls diese bestehende Lücken im globalen Netz schließen; um 17 % im Falle von Tahiti und um 11 % in Falle von Toro. Neben dem geplanten Ausbau des Stationsnetzes wird für VLBI ebenfalls eine Weiterentwicklung der Verfügbarkeit der VLBI-Beobachtungen von bisher zwei 24-Stunden-Standard-Sessions pro Woche hin zu kontinuierlichen 24/7-Sessions (d. h. sieben Tage pro Woche) im Rahmen von VGOS angestrebt. Die Simulationen zeigen, dass sich dadurch die Erdrotationsparameter signifikant um bis zu 65 % verbessern könnten in Bezug zur Referenzlösung mit den zwei Sessions pro Woche (Glaser et al. 2017).

Des Weiteren wurden Simulationen zum Einfluss des vom BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) betriebenen Argentinisch-Deutschen Geodätischen Observatoriums (AGGO; Abb. 1) in La Plata, Argentinien, auf den Referenzrahmen durchgeführt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf dem Vorhandensein eines weiteren VLBI-Radioteleskopes in Südamerika, neben dem derzeit einzigen anderen in Fortaleza, Brasilien. In Tab. 1 sind die Standardabweichungen der geschätzten Stationspositionen und Erdrotationsparameter (ERP) verschiedener simulierter Referenzrahmen aufgelistet. Für ein globales VLBI-Stationsnetz mit dem Transportablen Integrierten Geodätischen Observatorium (TIGO) in Concepción/Chile ergibt sich eine deutliche Verbesserung in den geschätzten Erdrotationsparametern von bis zu 10 % im Falle des y-Pols verglichen zu einem Stationsnetz bestehend

Tab. 1: Standardabweichungen s der geschätzten Koordinaten \bar{x} (gemittelt über alle Stationen) und der geschätzten Erdrotationsparameter x -Pol, y -Pol, $UT1-UTC$ für drei verschiedene Szenarien: Ohne TIGO in Concepción, Chile, bzw. AGGO in La Plata, Argentinien; mit TIGO; Umzug von TIGO nach AGGO.

	Weder TIGO noch AGGO	Mit TIGO	Umzug TIGO nach AGGO
Anzahl an Stationen	22	23	23
$s_{\bar{x}}$ [mm]	1,50	1,49 (-0 %)	1,46 (-2 %)
s_{x-Pol} [μ as]	54,1	51,5 (-5 %)	51,0 (-6 %)
s_{y-Pol} [μ as]	67,1	60,1 (-10 %)	59,7 (-11 %)
$s_{UT1-UTC}$ [μ s]	3,9	3,5 (-9 %)	3,5 (-10 %)

aus 22 Stationen ohne TIGO. Der Grund ist eine deutlich bessere Geometrie des globalen Stationsnetzes, nicht die Hinzunahme von Beobachtungen. Der Umzug von TIGO nach AGGO zeigt weitere Verbesserungen von 2 % in den Stationspositionen und Verbesserungen in den ERPs von bis zu 11 %. Dies verdeutlicht die besondere Bedeutung einer VLBI-Station im Süden von Südamerika, da es in dieser Region keine weiteren Stationen gibt. Der Beitrag zum globalen geodätischen Referenzrahmen und zur Bestimmung der ERP ist somit besonders wichtig.

Zurzeit wird die Kombination der einzelnen Techniken mittels Differenzvektoren (*local ties* – lokale Verbindungsvektoren) an Stationen mit mindestens zwei verschiedenen Verfahren durchgeführt. Diese Differenzvektoren werden aus lokalen klassisch-geodätischen und GNSS-Messungen erhalten. Allerdings weisen diese Messungen Diskrepanzen zu den Messungen der Raumverfahren von bis zu einigen Zentimetern auf (Glaser et al. 2015b, Altamimi et al. 2016) und beeinflussen somit die erreichbaren Genauigkeiten des Referenzrahmens signifikant. Kombinationen mittels der simulierten GPS-, SLR- und VLBI-Beobachtungen und lokaler Verbindungsvektoren zeigen, dass die lokalen Verbindungsvektoren eine Genauigkeit von besser als 1 cm aufweisen müssen, damit die Kombination innerhalb der von GGOS geforderten Genauigkeit von 1 mm realisiert werden kann. Die lokalen Verbindungsvektoren der GPS-Stationen spielen in der Kombination eine bedeutende Rolle, was anhand der Simulation systematisch verfälschter lokaler Verbindungsvektoren gezeigt wurde. Falls lediglich einzelne lokale Verbindungsvektoren systematisch verändert werden, zeigt dagegen die kombinierte Lösung Differenzen von nur weniger als 1 mm (Glaser et al. 2019a).

Neben den lokalen Verbindungsvektoren kann die Kombination ebenfalls über weitere gemeinsame Parameter erfolgen, zu denen die verschiedenen geodätischen Weltraumverfahren Zugang haben. Die Erdrotationsparameter werden dann als globale Verbindung (*global ties*; Seitz et al. 2012, Glaser et al. 2015a, 2017) und die Tropo-

sphärenparameter als atmosphärische Verbindung (*atmospheric ties*¹; Krügel et al. 2007, Thaller 2008, Rothacher et al. 2011, Heinkelmann et al. 2019, Balidakis et al. 2020) bezeichnet; diese Ansätze führen zu einer stabileren und konsistenteren kombinierten Lösung.

Eine Erweiterung des SLR-Stationsnetzes auf Grundlage der erstmalig durchgeführten Simulation der lokalen Wolkenbedeckung aus dem numerischen Wettermodell ERA5 hat ergeben, dass einzelne zusätzliche Stationen eine Verbesserung im Ursprung und im Netzmaßstab des Referenzrahmens von bis zu 4 % nach sich ziehen in Bezug zur Referenzlösung aus den derzeit bestehenden Stationen, siehe Abb. 2. Einige der zusätzlichen Stationen wurden als »zukünftige Stationen«² vom Internationalen Laser Ranging Service (Pearlman et al. 2002) klassifiziert. Alle 14 simulierten zusätzlichen Stationen führen insgesamt zu Verbesserungen von 22 % im Ursprung und von 20 % im Netzmaßstab. Ähnliche Verbesserungen im WRMS der Helmerttransformationsparameter zeigen auch Kehm et al. (2018, 2019). In einer Kombination von SLR mit GPS und VLBI können kleine Verbesserungen von 1 % durch zusätzliche Verbindungsvektoren (*local ties*) an ko-lokierten Stationen festgestellt werden (Glaser et al. 2019b).

Bei SLR tragen bisher im Wesentlichen die Satelliten LAGEOS (LAsER GEODynamics Satellite) und LAGEOS-2 sowie zu einem geringen Teil auch Etalon und Etalon-2 zur Bestimmung des Referenzrahmens bei. Der Einfluss eines erweiterten Raumsegmentes durch zusätzliche Satelliten, wie LARES, und geplante zukünftigen Missionen, wie LARES-2, zeigte für den Ursprung und Netzmaßstab eine Verbesserung von 25 % im Vergleich zu einer Lösung, die nur auf den beiden LAGEOS-Satelliten basiert (König et al. 2019). Eine Verbesserung in geschätzten Stationspositionen, ERP und den Kugelfunktionskoeffizienten des Erdschwerefeldes durch die Erweiterung des SLR-Raumsegmentes zeigten ebenfalls Bloßfeld et al. (2018).

In Ergänzung zur Kombination mittels *local ties* stellen alternative Kombinationsstrategien, wie die Ko-lokation im Weltraum, eine vielversprechende Aussicht auf eine Verbesserung globaler Referenzrahmen und das Aufdecken von technik-spezifischen Restsystematiken dar (Thaller et al. 2011, Sośnica et al. 2018, 2019). Falls in Zukunft VLBI-Beobachtungen zu entsprechenden Satelliten zuverlässig durchgeführt werden können, wäre auch die VLBI sensitiv zum Ursprung des Referenzrahmens und könnte damit zu dessen Realisierung beitragen.

Technologische Weiterentwicklungen im Hinblick auf nächste GNSS-Generationen wurden ebenfalls simuliert und deren Einfluss auf geodätische Parameter, einschließlich Referenzrahmen, untersucht. Die zukünftige GNSS-Infrastruktur namens »Kepler« soll auf der Grundlage zweier zukünftiger Schlüsseltechnologien (optische

1 www.gfz-potsdam.de/en/section/space-geodetic-techniques/projects/iag-jwg-atmospheric-ties

2 <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/stations/future/index.html>

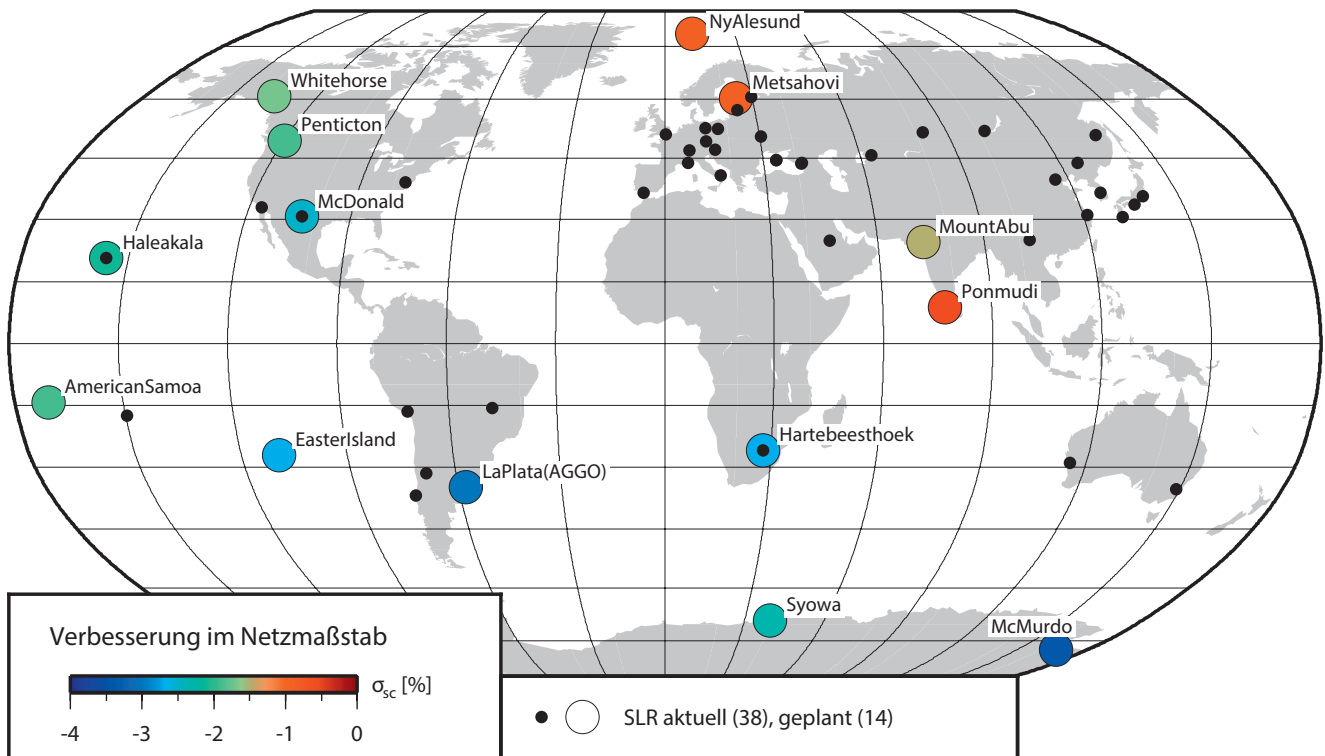


Abb. 2: Verbesserung im Netzmaßstab durch 14 zusätzliche SLR-Stationen als Ergebnis der Simulationsstudien. Durch die Farben wird gezeigt, welche Stationen einen besonders großen Einfluss auf den Maßstab des SLR-Netzes haben.

Uhren und Inter-Satelliten-Links) basieren (Giorgi et al. 2019). In Abb. 3 ist ein Überblick über die geplante Konstellation gegeben.

Der Einfluss von Kepler auf die Bestimmung globaler Referenzrahmen ist hauptsächlich mit der konzeptionellen Frage verbunden, ob und wie weit diese zukünftige Konstellation erlauben wird, dass GNSS zur Realisierung des Ursprungs und Netzmaßstabes beitragen kann. Bisher wird GNSS aufgrund von systemspezifischen Limitierungen

nicht zur Bestimmung des Ursprungs eines Referenzrahmens verwendet.

Weiterhin trägt GNSS ebenfalls nicht zur Realisierung des Netzmaßstabes bei, der bisher von SLR und VLBI vorgegeben wird. Der Grund ist, dass bisher verwendete Antennenphasenzentrumskorrekturen der GNSS-Satelliten von einem Referenzrahmen wie dem ITRF2014 abhängen und damit der Maßstab nicht unabhängig bestimmt werden kann (Schmid et al. 2007). Allerdings haben Studien gezeigt, dass GNSS unter bestimmten Voraussetzungen zum Ursprung und Netzmaßstab beitragen könnte (Heflin et al. 2002, Rülke et al. 2008, Rebischung 2014, Haines et al. 2015, Glaser et al. 2015a). Zudem eröffnet die Veröffentlichung der Antennenkorrekturen für die Galileo-Satelliten durch die *European GNSS Agency* erstmalig und in einzigartiger Weise die Chance, den Netzmaßstab mittels GNSS unabhängig zu bestimmen (Rebischung 2019, Villiger 2019). Die Kepler-Konstellation wurde mit 24 höher fliegenden Satelliten (MEO – Medium Earth Orbit) und vier niedrig fliegenden Satelliten (LEO – Low Earth Orbit) sowie Inter-Satelliten-Links zwischen den MEO-Satelliten und den MEO- und LEO-Satelliten simuliert. Für die nahezu perfekte Synchronisation aller Satellitenuhren innerhalb der Konstellation wurden fixierte Uhren angenommen. Der realisierte Ursprung innerhalb der Kepler-Konstellation verbesserte sich damit um den Faktor 43 in der Z- und um 8 in der X- und Y-Komponente in Bezug auf eine gewöhnliche MEO-Konstellation, die mit einer großen Unsicherheit in der Z-Komponente des Ursprungs charakterisiert ist. Der Netzmaßstab verbessert sich dabei um 34 % in Bezug auf Galileo (Glaser et al. 2020).

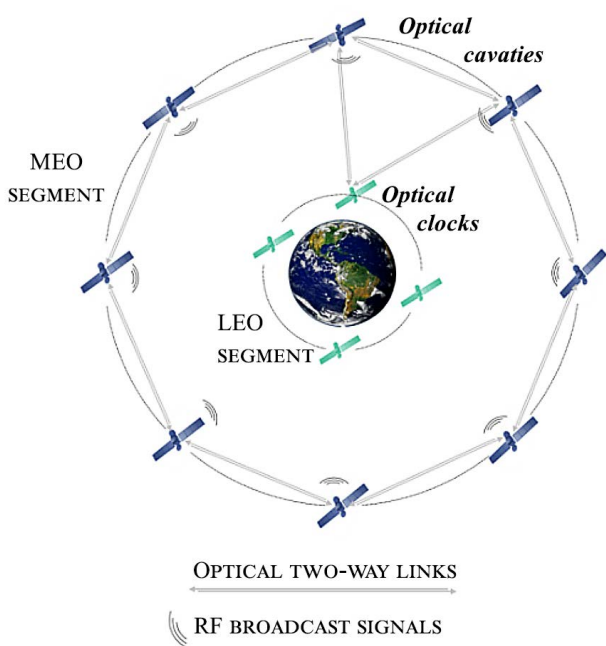


Abb. 3: Schematische Darstellung der geplanten Kepler-Konstellation <https://hgf-advantage.de/strategies>

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Vorhandensein geeigneter globaler Referenzrahmen ist eine zwingend erforderliche Voraussetzung für die Erdsystembeobachtung. Aktuell besteht allerdings eine Diskrepanz zwischen erreichter und benötigter Genauigkeit vorliegender Referenzrahmen für das Globale Geodätische Beobachtungssystem GGOS. Es ist zu erwarten, dass diese Diskrepanz in der nächsten Realisierung, dem ITRF2020, signifikant reduziert werden kann. Dabei werden von den einzelnen Analysezentren aller Techniken, die zum ITRF beitragen, beachtliche Bestrebungen unternommen, um die technik-spezifischen Restsystematiken aufzudecken und zu eliminieren. Des Weiteren wird eine konsistente Modellierung entsprechend festgelegter Standards, wie den IERS-Konventionen³, angestrebt (Petit und Luzum 2010). Simulationen stellen dabei die einzige Möglichkeit dar, zuverlässig zukünftige Entwicklungen, wie zusätzliche Stationen und technologische Verbesserungen der geodätischen Weltraumverfahren, abschätzen zu können. Im Rahmen der hier durchgeführten Simulationsstudien kann die Größenordnung der zu erwartenden Verbesserungen auf den Referenzrahmen bewertet werden. Dabei ist es unerlässlich, dass verschiedene Gruppen ähnliche und weiterführende Simulationsstudien (Pavlis und Kuzmich-Cieslak 2009, Otsubo et al. 2016, MacMillan 2017, Kehm et al. 2018, 2019) durchführen, um gesicherte und belastbare Aussagen für GGOS geben zu können. Die ständige GGOS-Arbeitsgruppe PLATO (*Performance Simulations and Architectural Trade-Offs*) koordiniert dabei die verschiedenen Arbeiten und erstattet dem *GGOS Bureau of Networks and Observations* Bericht (Männel et al. 2019).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bereitstellung hinreichend genauer und zuverlässiger Referenzrahmen Gegenstand intensiver Forschung verschiedener nationaler und internationaler Gruppen ist und es auch zukünftig sein muss, da globale geodätische Referenzrahmen eine hohe Relevanz für die zentralen gesellschaftlichen Fragestellungen, besonders in Zeiten des Klimawandels und der zunehmenden Schäden durch Naturgefahren, aufweisen (Müller und Pail 2019).

Dank

Diese Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Fördernummer SCHU 1103/8-1 (GGOS-SIM, Simulation des Globalen Geodätischen Beobachtungssystems) und von der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. unter der Fördernummer ZT-0007 (ADVANTAGE, Advanced Technologies for Navigation and Geodesy) gefördert. Besonders möchten wir uns bei den Gutachtern für die nützlichen und konstruktiven Hinweise bedanken, die zur Verbesserung des Manuskriptes beigetragen haben.

³ <http://iers-conventions.obspm.fr/index.php>

Literatur

- Abbondanza, C., Chin, T.M., Gross, R.S., Heflin, M.B., Parker, J.W., Soja, B.S., van Dam, T., Wu, X. (2017): JTRF2014, the JPL Kalman filter and smoother realization of the International Terrestrial Reference System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 8474–8510. DOI: 10.1002/2017JB014360.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L. (2011): ITRF2008: an improved solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, 85, 457–473. DOI: 10.1007/s00190-011-0444-4.
- 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: Solid Earth*, 121, 6109–6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.
- Appleby, G., Rodriguez, J., Altamimi, Z. (2016): Assessment of the accuracy of global geodetic satellite laser ranging observations and estimated impact on ITRF scale: estimation of systematic errors in LAGEOS observations. *Journal of Geodesy*, 90, 1371–1388. DOI: 10.1007/s00190-016-0929-2.
- Balidakis, K., Glaser, S., Zus, F., Nilsson, T., Schuh, H., Gross, R. (2020): On the multi-technique combination with atmospheric ties EGU2020-7818. *EGU General Assembly 2020*. DOI: 10.5194/egu-sphere-egu2020-7818.
- Bloßfeld, M., Angermann, D., Seitz, M. (2018): DGFI-TUM Analysis and Scale Investigations of the Latest Terrestrial Reference Frame Realizations. In: Freymueller, J., Sánchez, L. (eds): *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*. International Association of Geodesy Symposia, vol 149, Springer, Cham. DOI: 10.1007/1345_2018_47.
- Böhm, J., Wresnik, J., Pany, A. (2006): Simulation of wet zenith delays and clocks. Technical report, IVS Memorandum 2006-013v03. <http://ivscc.bkg.bund.de/publications/memos/ivs-2006-013v03.pdf>.
- Giorgi, G., Schmidt, T., Mata-Calvo, R., Fuchs, C., Hoque, M., Berdermaan, J., Furthner, F., Günther, C., Schuldt, T., Sanjuan, J., Gohlke, M., Braxmaier, C., Balidakis, K., Dick, G., Flechtner, F., Ge, M., Glaser, S., König, R., Michalak, G., Murböck, M., Semmling, M., Schuh, H. (2019): Advanced Technologies for Satellite Navigation and Geodesy. *Advances in Space Research*. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117719304260.
- Glaser, S., Fritsche, M., Sośnica, K., Rodríguez-Solano, C.J., Wang, K., Dach, R., Hugentobler, U., Rothacher, M., Dietrich, R. (2015a): A consistent combination of GNSS and SLR with minimum constraints. *Journal of Geodesy*, 89, 1165–1180. DOI: 10.1007/s00190-015-0842-0.
- Glaser, S., Fritsche, M., Sośnica, K., Rodríguez-Solano, C.J., Wang, K., Dach, R., Hugentobler, U., Rothacher, M., Dietrich, R. (2015b): Validation of Components of Local Ties. In: van Dam, T. (ed): *REFAG 2014*. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 146, Springer, Cham. DOI: 10.1007/1345_2015_190.
- Glaser, S., Ampatzidis, D., König, R., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Flechner, F., Schuh, H. (2016): 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*. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 147, Springer, Cham. DOI: 10.1007/1345_2016_256.
- Glaser, S., König, R., Ampatzidis, D., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Flechner, F., Schuh, H. (2017): A Global Terrestrial Reference Frame from simulated VLBI and SLR data in view of GGOS. *Journal of Geodesy*, 91, 723–733. DOI: 10.1007/s00190-017-1021-2.
- Glaser, S., König, R., Neumayer, K., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Flechtner, F., Schuh, H. (2019a): On the impact of local ties on the datum realization of global terrestrial reference frames. *Journal of Geodesy*, 93, 655–667. DOI: 10.1007/s00190-018-1189-0.
- Glaser, S., König, R., Neumayer, K.H., Balidakis, K., Schuh, H. (2019b): Future SLR station networks in the framework of simulated multi-technique terrestrial reference frames. *Journal of Geodesy*, 93, 2275–2291. DOI: 10.1007/s00190-019-01256-8.
- Glaser, S., Michalak, G., Männel, B., König, R., Neumayer, K.H., Schuh, H. (2020): Reference system origin and scale realization within the future GNSS constellation “Kepler”. *Journal of Geodesy*, (in Begutachtung).

- Gross, R., Beutler, G., Plag, H.P. (2009): Integrated scientific and societal user requirements and functional specifications for the GGOS. In: Plag, H.P., Pearlman, M. (eds): *Global Geodetic Observing System*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-02687-4_7.
- Gross, R., Herring, T. (2017): IAG/GGOS/IERS Unified Analysis Workshop (UAW) IERS Annual Report 2017. Edited by Wolfgang R. Dick and Daniela Thaller. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 207 S. ISBN 978-3-86482-131-8.
- Haines, B.J., Bar-Sever, Y.E., Bertiger, W.I., Desai, S.D., Harvey, N., Sibois, A.E., Weiss, J.P. (2015): Realizing a terrestrial reference frame using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 5911–5939. DOI: 10.1002/2015JB012225.
- Heflin, M., Argus, D., Jefferson, D., Webb, F., Zumberge, J. (2002): Comparison of a GPS-defined global reference frame with ITRF2000. *GPS Solutions*, 6, 72–75. DOI: 10.1007/s10291-002-0015-5.
- Heinkelmann, R., Dousa, J., Balidakis, K., Zus, F. (2019): IAG JWG Tropospheric Ties – Activities During the Last Term. IUGG19-3573, 27th IUGG General Assembly July 8–18, 2019, Montréal, Canada. https://www.czech-in.org/cmPortalV15/CM_W3_Searchable/iugg19/normal/#abstractdetails/0000760500.
- Helmert, F. (1880): *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. Einleitung und I. Teil: Die Mathematischen Theorien*. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1962 (Nachdruck).
- Kehm, A., Bloßfeld, M., Pavlis, E.C., Seitz, F. (2018): Future global SLR network evolution and its impact on the terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 92, 625–635. DOI: 10.1007/s00190-017-1083-1.
- Kehm, A., Bloßfeld, M., König, P., Seitz, F. (2019): Future TRFs and GGOS – Where to put the next SLR station?. *Advances in Geosciences*, 50, 17–25. www.adv-geosci.net/50/17/2019.
- König, R., Glaser, S., Ciufolini, I., Paolozzi, A. (2019): Impacts of the LARES and LARES-2 satellite missions on the terrestrial reference frame. In: *International Association of Geodesy Symposia*, Springer, Berlin, Heidelberg. (Online first) https://link.springer.com/chapter/10.1007/1345_2019_84.
- Krügel, M., Thaller, D., Tesmer, V., Rothacher, M., Angermann, D., Schmid, R. (2007): Tropospheric parameters: combination studies based on homogeneous VLBI and GPS data, *Journal of Geodesy*, 81, 515–527. DOI: 10.1007/s00190-006-0127-8.
- Luceri, V., Pirri, M., Rodriguez, J., Appleby, G., Pavlis, E.C., Müller, H. (2019): Systematic errors in SLR data and their impact on the ILRS products. *Journal of Geodesy*, 93, 2357–2366. DOI: 10.1007/s00190-019-01319-w.
- MacMillan, D.S. (2017): EOP and scale from continuous VLBI observing: CONT campaigns to future VGOS networks. *Journal of Geodesy*, 91, 819–829. DOI: 10.1007/s00190-017-1003-4.
- Männel, B., Thaller, D., Rothacher, M., Böhm, J., Müller, J., Glaser, S., Dach, R., Biancale, R., Bloßfeld, M., Kehm, A., Pinzón, I.H., Hofmann, F., Andritsch, F., Coulot, D., Pollet, A. (2019): Recent Activities of the GGOS Standing Committee on Performance Simulations and Architectural Trade-Offs (PLATO). In: Freymueller, J., Sánchez, L. (eds): *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 149, 161–164, Springer, Cham. DOI: 10.1007/1345_2018_30.
- Müller, J., Pail, R. (2019): Erdmessung 2030. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 1/2019, 4–16. DOI: 10.12902/zfv-0243-2018.
- Nilsson, T., Haas, R. (2010): Impact of atmospheric turbulence on geodetic very long baseline interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, B03407. DOI: 10.1029/2009JB006579.
- Nothnagel, A., Holst, C., Haas, R., (2019): A VLBI delay model for gravitational deformations of the Onsala 20 m radio telescope and the impact on its global coordinates. *Journal of Geodesy*, 93, 2019–2036. DOI: 10.1007/s00190-019-01299-x.
- Oppenheimer, M., Glavovic, B.C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A.K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R.M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B., Sebesvari, Z. (2019): Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M. (eds.)).
- Otsubo, T., Matsuo, K., Aoyama, Y., Yamamoto, K., Hobiger, T., Kubooka, T., Sekido, M. (2016): Effective expansion of satellite laser ranging network to improve global geodetic parameters. *Earth Planets Space*, 68, 65. DOI: 10.1186/s40623-016-0447-8.
- Pany, A., Böhm, J., MacMillan, D., Schuh, H., Nilsson, T., Wresnik, J. (2011): Monte Carlo simulations of the impact of troposphere, clock and measurements errors on the repeatability of VLBI positions. *Journal of Geodesy*, 85, 39–50. DOI: 10.1007/s00190-010-0415-1.
- Pavlis, E.C., Kuzmich-Cieslak, M. (2009): SLR and the Next Generation Global Geodetic Networks of low satellites. In: Schilliak, S. (ed): *Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging*. https://cddis.nasa.gov/lw16/docs/papers/ggo_5_Pavlis_p.pdf.
- Pearlman, M.R., Degnan, J.J., Bosworth, J.M. (2002): The International Laser Ranging Service. *Advances in Space Research*, 30, 135–143. DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00277-6.
- Petit, G., Luzum, B. (Hrsg.) (2010): *IERS Conventions (2010)*. Band 36 von IERS Technical Note, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 179 S., ISBN 3-89888-989-6.
- Plank, L., Spicakova, H., Böhm, J., Nilsson, T., Pany, A., Schuh, H. (2013): Systematic Errors of a VLBI Determined TRF Investigated by Simulations. In: Altamimi, Z., Collilieux, X. (eds): *Reference Frames for Applications in Geosciences*, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 138, 197–202, Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-32998-2_29.
- Rebischung, P. (2014): Can GNSS contribute to improving the ITRF definition?, PhD thesis (Observatoire de Paris). http://recherche.ign.fr/labos/lareg/pdf/Theses/these_paul_rebischung_2014.pdf.
- Rebischung, P. (2019): Possible Contribution of GNSS to the Definition of the ITRF2020 Scale Based on the Galileo Satellite Phase Center Offsets – Part 2. Unified Analysis Workshop 2019, October 2–4, 2019, Paris, France. www.ggos.org/media/filer_public/53/d8/53d8ed8e-d3c2-4dbd-9de8-babda253bdda/uaw_gnss_2b-rebischung_gnssorbitmodeling.pdf.
- Rothacher, M., Angermann, D., Artz, T., Bosch, W., Drewes, H., Gerstl, M., Kelm, R., König, D., König, R., Meisel, B., Müller, H., Nothnagel, A., Panafidina, N., Richter, B., Rudenko, S., Schwegmann, W., Seitz, M., Steigenberger, P., Tesmer, S., Tesmer, V., Thaller, D. (2011): GGOS-D: homogeneous reprocessing and rigorous combination of space geodetic observations. *Journal of Geodesy*, 85, 679–705. DOI: 10.1007/s00190-011-0475-x.
- Rülke, A., Dietrich, R., Fritsche, M., Rothacher, M., Steigenberger, P. (2008): Realization of the Terrestrial Reference System by a reprocessed global GPS network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113, B08403. DOI: 10.1029/2007JB005231.
- Sarti, P., Abbondanza, C., Petrov, L., Negusini, M. (2011): Height bias and scale effect induced by antenna gravitational deformations in geodetic VLBI data analysis. *Journal of Geodesy*, 85, 1–8. DOI: 10.1007/s00190-010-0410-6.
- Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M., Rothacher, M. (2007): Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *Journal of Geodesy*, 81, 781–798. DOI: 10.1007/s00190-007-0148-y.
- Schuh, H., Wickert, J., Sips, M., Schöne, T., Rogaß, C., Roessner, S., König, R., Klemann, V., Heinkelmann, R., Dobslaw, H., Beyerle, G. (2015a): Zukunft der globalen Geodäsie und Fernerkundung aus Sicht des Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam. In: *Freeden, W., Rummel, R. (eds): Handbuch der Geodäsie*, Springer Reference Naturwissenschaften, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2_16-1.
- Schuh, H., König, R., Ampatzidis, D., Glaser, S., Flechtner, F., Heinkelmann, R., Nilsson, T.J. (2015b): GGOS-SIM: simulation of the reference frame for the Global Geodetic Observing System. In: van Dam T (eds): *REFAG 2014*. International Association of Geodesy Symposia, vol 146, 95–100, Springer, Cham. DOI: 10.1007/1345_2015_217.
- Seitz, M., Angermann, D., Bloßfeld, M., Drewes, H., Gerstl, M. (2012): The 2008 DGI realization of the ITRS: DTRF2008. *Journal of Geodesy*, 86, 1097–1123. DOI: 10.1007/s00190-012-0567-2.

- Seitz, M., Angermann, D., Bloßfeld, M., Gerstl, M., Müller, H. (2015): ITRS Combination Centres – Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI). In: Dick, W.R., Thaller, D. (eds): International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 130–135. www.iers.org/IERS/EN/Publications/AnnualReports/AnnualReport2015.html.
- Seitz, M., Bloßfeld, M., Angermann, D., Schmid, R., Gerstl, M., Seitz, F. (2016): The new DGFI-TUM realization of the ITRS: DTRF2014 (data). Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Munich. DOI: 10.1594/PANGAEA.864046.
- Sośnica, K., Bury, G., Zajdel, R. (2018): Contribution of multi GNSS constellation to SLR derived terrestrial reference frame. *Geophysical Research Letters*, 45, 2339–2348. DOI: 10.1002/2017GL076850.
- Sośnica, K., Bury, G., Zajdel, R., Strugarek, D., Drożdżewski, M., Kazmierski, K. (2019): Estimating global geodetic parameters using SLR observations to Galileo, GLONASS, BeiDou, GPS, and QZSS. *Earth Planets Space*, 71, 20. DOI: 10.1186/s40623-019-1000-3.
- Thaller, D. (2008): Inter-technique combination based on homogeneous normal equation systems including station coordinates, earth orientation and troposphere parameters. PhD Thesis, (Scientific Technical Report STR; 08/15), Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam. DOI: 10.2312/GFZ.b103-08153.
- Thaller, D., Dach, R., Seitz, M., Beutler, G., Mareyen, M., Richter, B. (2011): Combination of GNSS and SLR observations using satellite co-locations. *Journal of Geodesy*, 85, 257–272. DOI: 10.1007/s00190-010-0433-z.
- United Nations General Assembly (2015): Resolution adopted by the General Assembly on 26 February 2015, A/RES/69/266. https://ggim.un.org/documents/A_RES_69_266_E.pdf.
- Villiger, A. (2019): Possible Contribution of GNSS to the Definition of the ITRF2020 Scale Based on the Galileo Satellite Phase Center Offsets – Part 1. Unified Analysis Workshop 2019, October 2–4, 2019, Paris, France. http://ggos.org/media/filer_public/2a/27/2a27965f-a556-4362-a651-b776ec7b35b7/uaw_gnss_2a-villiger_contribution_itrf2020.pdf.
- WCRP Global Sea Level Budget Group (2018): Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data*, 10, 1551–1590. 10.5194/essd-10-1551-2018.

Kontakt

Dr.-Ing. Susanne Glaser susanne.glaser@gfz-potsdam.de
 Prof. Dr. Dr. h.c. Harald Schuh harald.schuh@gfz-potsdam.de

Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,
 Sektion 1.1: Geodätische Weltraumverfahren
 Telegrafenberg, A17, 14473 Potsdam

und

Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und
 Geoinformationstechnik, Fachgebiet Satellitengeodäsie
 Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Dr.-Ing. Rolf König rolf.koenig@gfz-potsdam.de

Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ,
 Sektion 1.2: Globales Geomonitoring und Schwerefeld
 Claude-Dornier-Straße 1, 82230 Weßling

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.