



## Positionierung und Geomonitoring mit GNSS: Anwendungen, Chancen und Risiken

### GNSS based Positioning and Geomonitoring: Applications, Opportunities and Risks

Robert Weber, Wien

#### Kurzfassung

Verglichen mit der Punktaufnahme mittels Theodolit oder Tachymeter stehen die sogenannten modernen Raumtechniken wie SLR, VLBI, GNSS und DORIS den Geodäten erst vergleichsweise kurz zur Verfügung. Unter diesen Techniken hat vor allem die satellitengestützte Punkt- und Zeitbestimmung mittels GPS/GLONASS nicht nur die geodätischen Aufnahmeverfahren revolutioniert, sondern inzwischen alle Bereiche unseres täglichen Lebens erfasst. In jüngster Zeit konnte zudem durch Modernisierung bestehender und dem Aufbau neuer globaler Satellitennavigationssysteme (Galileo, Beidou) die Zahl der unterstützten Applikationen weiter gesteigert werden. Moderne High-end als auch Low-end Sensoren unterstützen den Empfang von zumindest zwei Systemen und in diesem Sinne ist heute auch der Begriff der GNSS-Positionierung (anstelle GPS) mehr als gerechtfertigt. Der vorliegende Artikel basiert auf den Vortragsunterlagen des Autors zur Verleihung der Friedrich-Hopfner Medaille im Oktober 2018. Er soll einerseits die heute von GNSS gebotenen Möglichkeiten zur Positionierung und des Geomonitorings mittels GNSS an Hand weniger Beispiele beleuchten und damit auch die rasante Entwicklung verglichen mit den Anfängen von GPS vor ca. 30 Jahren dokumentieren. Im Anschluss soll ein Ausblick auf die absehbaren GNSS-Entwicklungen, aber auch Risiken im kommenden Jahrzehnt gewagt werden. Darauf aufbauend werden mögliche weitere Applikationen, die noch vor wenigen Jahren undenkbar erschienen, diskutiert.

**Schlüsselwörter:** GNSS-Applikationen, GNSS-Entwicklung, PPP, Galileo-HAS, Friedrich Hopfner

#### Abstract

In contrast to long time established point positioning methods by means of theodolites and tachymeters the so-called modern space techniques like SLR, VLBI, GNSS and DORIS are available for a comparatively short time. Within the space techniques especially the GPS/GLONASS based point-positioning and time determination has revolutionized not only geodesy but all domains of daily live. Recently, the modernization of existing satellite navigation systems as well as the built-up of new systems like Galileo and Beidou have increased the number of supported applications dramatically. Modern high-end GNSS sensors are able to track at least two or even more systems at various frequencies. This manuscript is based on the author's presentation slides commemorating the Friedrich Hopfner Award in October 2018. The manuscript shall discuss by means of a few examples the potential of current GNSS in terms of positioning and geomonitoring and will also briefly highlight the rapid development of this technique over the past 30 years. Subsequently, a forecast on medium-term GNSS developments and also risks shall be dared. Finally, feasible GNSS applications, which seemed to be impossible even a few years ago, shall be listed.

**Keywords:** GNSS-applications, GNSS-development, PPP, Galileo-HAS, Friedrich Hopfner

#### Friedrich Hopfner

In Erinnerung an den Namensgeber der Hopfner-Medaille und in Würdigung seiner hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen erscheint es mehr als angebracht hier vorab kurz den Lebenslauf von Prof. Friedrich Hopfner zu skizzieren. Hopfner, 1881 in Böhmen geboren, studierte in den Jahren 1899 – 1904 an den Universitäten in Prag und München die Fächer Mathematik, Physik, Astronomie und Meteorologie. Er promovierte 1905 und bekleidete zwischen 1905 – 1912 Assistenzstellen an verschiedenen Instituten in Wien, Berlin, Innsbruck und in Triest. 1912 wechselte er als Adjunkt an das Gradmessungsbüro in Wien. Im 1. Welt-

krieg war er der Leiter des Feldwetterdienstes an der italienischen Front.

1921 avancierte Hopfner zum Chefastronom für den wissenschaftlichen Vermessungsdienst im damaligen Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien. 1936 wurde er zum ordentlichen Professor für Höhere Geodäsie und Sphärische Astronomie an die Technische Hochschule in Wien berufen. In den Kriegsjahren 1938 – 1945 zwangsweise pensioniert wurde er rasch nach Kriegsende 1948/49 zum Rektor der Technischen Hochschule Wien bestellt.

Unter seinen reichen wissenschaftlichen Publikationen finden sich Arbeiten zur Experimentalphysik, zur Geophysik und zur Bahnrechnung klei-

ner Planeten. Besondere Beachtung fanden seine Beiträge über die ‚Gezeiten der Meere‘ (1931) und ‚Die Figur der Erde, Dichte und Druck im Erdinneren‘ (1933). Ebenfalls höchst bemerkenswert sind seine Arbeiten zur solaren Steuerung des Klimas, welche ihn seit 1906 beschäftigten, da sie im Wesentlichen bereits die Theorie von Milankovich als Spezialfall enthalten. 1949 publizierte er das Lehrbuch über die ‚Grundlagen der Höheren Geodäsie‘. Friedrich Hopfner verfasste insgesamt 81 fachbezogene Publikationen.

## 1. Rückblick GNSS

Sucht man nach dem Ereignis an dem am vormaligen Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik der TU-Wien die Forschungen im Bereich GPS-Positionierung aufgenommen wurden, so könnte man hier wohl am besten den Ankauf eines Wild/Magnavox WM102 GPS Receivers durch Investitionsmittel der Universität im Jahr 1990 nennen. Mit Hilfe dieses Empfängers und weiterer geliehener Geräte wurden erste Erfahrungen in den Bereichen Datenaufnahme und Datenauswertungen in diversen nationalen Testkampagnen und Kleinprojekten gewonnen. Unter der Voraussetzung präziser Bahn- und Uhrkorrekturdaten versprach GPS als global verfügbares Positionierungsverfahren im Optimalfall Genauigkeiten von wenigen cm auch für Basislinienlängen von wenigen km bis hin zu mehreren hundert km. Um diese Bahninformation der Öffentlichkeit mit hoher Qualität und täglich zur Verfügung zu stellen wurde der IGS (vormalig: *International GPS Service*) an der IUGG Generalversammlung in Wien im Juni 1991 ins Leben gerufen.

Ein Zeitsprung von 25 Jahren führt die unglaubliche Entwicklung dieser Raumtechnik vor Augen. Im Rahmen dieses Artikels kann und soll natürlich nur auf die Aspekte der geodätischen Punktbestimmung und der Nutzung als Geomonitoring-Verfahren eingegangen werden.

Der IGS lieferte Mitte der 90-er Jahre nur GPS-Satellitenbahndaten und korrespondierende Uhrkorrekturen mit einer Genauigkeit weniger dm basierend auf der Auswertung von Messdaten von ca. 30 Referenzstationen (siehe Abbildung 1) mit einer Verzögerung von einigen Tagen. Heute bezeichnet IGS den ‚*International GNSS Service*‘ und stellt täglich neben den Kernprodukten ( $\pm 2$  cm Bahngenauigkeit,  $\pm 0.1$  ns Uhrkorrekturen) noch Modelle der atmosphärischen Verzögerung und Erdrotationsparameter weitgehend in Echtzeit zur Verfügung. Beobachtungsdatenströme



Abb. 1: IGS-GPS Referenznetz 1994

von mehreren 100 GNSS-Stationen werden dazu von den IGS-Analysezentren prozessiert ([www.igs.org](http://www.igs.org)). Im Rahmen des IGS-MGEX Projektes werden Produkte basierend auf Messdaten zu allen 4 operablen GNSS (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou) verarbeitet.

Musste 1991 für die Besetzung eines Messpunktes noch ein ca. 20 kg schwerer 12-Kanalempfänger transportiert werden, kann der Geodät heute hochqualitative Sensoren mit einem Gewicht von 1 kg oder weniger zum Einsatz bringen. Die modernen GNSS-Receiver verfügen über hohe Konnektivität, bis zu 864 Aufnahmekanäle, und sind nicht selten in Multisensorsystemen integriert. Vor 25 Jahren waren Messzeiten von 6-24 Stunden für die  $\pm 1$  cm Positionierung bei optimalen Abschattungsverhältnissen unumgänglich. Heute sind wir zunehmend verärgert, wenn die ermittelte Koordinate im bewaldeten oder innerstädtischen Gebiet im 2-3 cm Bereich schwankt, obwohl der Punkt nun schon seit 30 Sekunden besetzt ist. Ermöglicht wurde diese Revolution durch eine stetige Entwicklung der Mess- und Kommunikationstechnik. Wesentlich für die Entwicklung sind aber auch die heute in den meisten Ländern verfügbaren GNSS-Referenzstationsnetze, welche dem Nutzer über standardisierte Korrekturdaten (RTCM 3.x) Modelle der dispersiven und nicht-dispersiven Fehleranteile, als auch Referenzrahmeninformationen in Echtzeit übermitteln.

## 2. GNSS Signale

Noch vor wenigen Jahren war die Zahl der frei verfügbaren (nicht verschlüsselten) GNSS Signale mit GPS C/A und GLONASS L1, L2 einfach überschaubar. Daneben erlaubten spezielle Korrelationstechniken sowohl die P1- und P2-Codestrecken als auch die zugrunde liegenden Phasenstrecken nutzbar zu machen. Heute hat

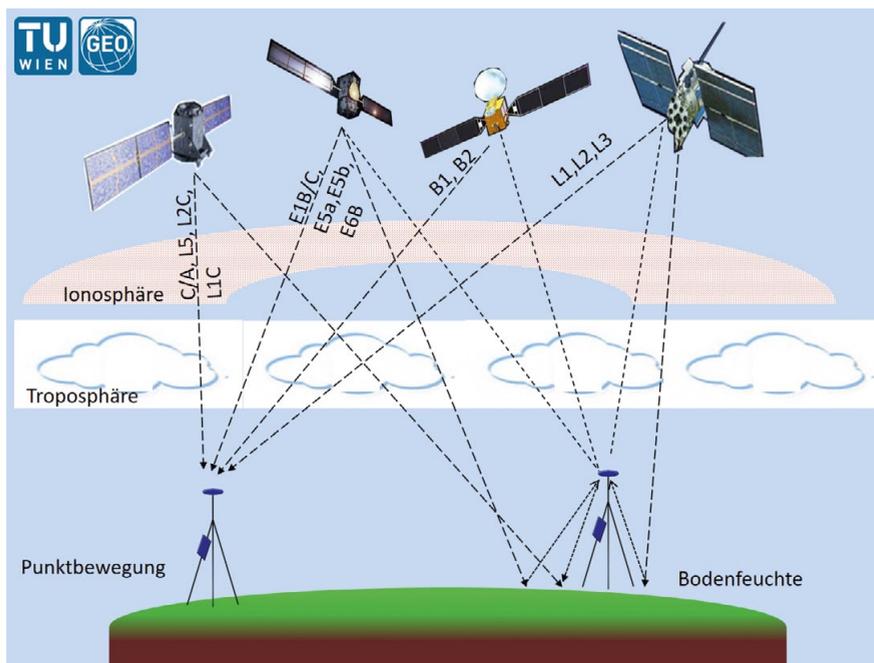


Abb.2: GNSS Signale

sich das Bild total gewandelt, und ist in gewissem Sinne auch schwerer überschaubar geworden. Abbildung 2 zeigt das heute zur Verfügung stehende Portfolio nicht verschlüsselter GNSS Signale. Je nach Zählweise und Empfängertyp können bis zu 15 freie Signale aufgenommen werden. Nicht alle Signale sind für geodätische Anwendungen notwendig oder nützlich und zudem fokussieren Massenmarktempfängerhersteller ihr Interesse auf den L1/E1 Frequenzbereich bei 1575,42 MHz. 2-Frequenzempfänger erlauben dagegen die einfache Reduktion des ionosphärischen Streckenfehlers und sind für die schnelle RTK-Positionierung unabdingbar. 3- oder Mehrfrequenzempfänger erweisen sich bei der schnellen PPP-Lösung als nützlich und wären z. B. im Fall von Galileo auch in der Lage den HAS-Dienst zu nützen (siehe Kapitel 5).

Ab 2020 werden sich ca. 100 GNSS Satelliten im All befinden. Aufgrund des großzügigen Angebots an Navigationssatelliten, der Signalfülle, kostengünstiger Bodenempfänger und dichter Referenzstationsnetze sind die GNSS-Anwendungsfelder heute breit gefächert. In Abbildung 2 wurden das Monitoring von Punktbewegungen als auch die Bestimmung der Bodenfeuchte über GNSS Multipath exemplarisch angeführt. Eine optimale Signal- oder Systemkombination hier anzuführen

wäre jedenfalls unseriös. Es kann aber festgestellt werden, dass Interoperabilität einen wesentlichen Faktor für die Receiver-Hersteller darstellt. GPS und Galileo weisen eine hohe Interoperabilität in den Frequenzbändern L1/E1 und L5/E5a auf. Es ist deshalb davon auszugehen, dass Signale auf diesen Frequenzen in Zukunft den Markt beherrschen werden. Studien zeigen des Weiteren, dass bei Nutzung von bereits drei GNSS-Systemen ein Optimum in der Beobachtungsgeometrie erreicht werden kann.

### 3. Geomonitoring mittels GNSS

Beispielhaft sollen in der Folge Arbeiten unseres Forschungsbereichs zur Bestimmung von Erdrotationsparametern und Atmosphärenmonitoring beschrieben werden.

#### 3.1 Erdrotation

GNSS-Verfahren stellen nicht zuletzt aufgrund des dichten Stationsnetzes das heute primäre Verfahren zur Bestimmung der Erdrotationsparameter dar. Unter den Erdrotationsparametern versteht man die Polkoordinaten  $x_p$ ,  $y_p$  und die Zeitdifferenz  $dUT1 = UT1 - UTC$ , welche im Prinzip den Unterschied der wahren Erddrehung und 24h Atomzeit beschreibt.  $dUT1$  kann allerdings mittels Satellitenverfahren aufgrund der Korrelation mit Bahnparametern nicht mit höchster Präzision bestimmt

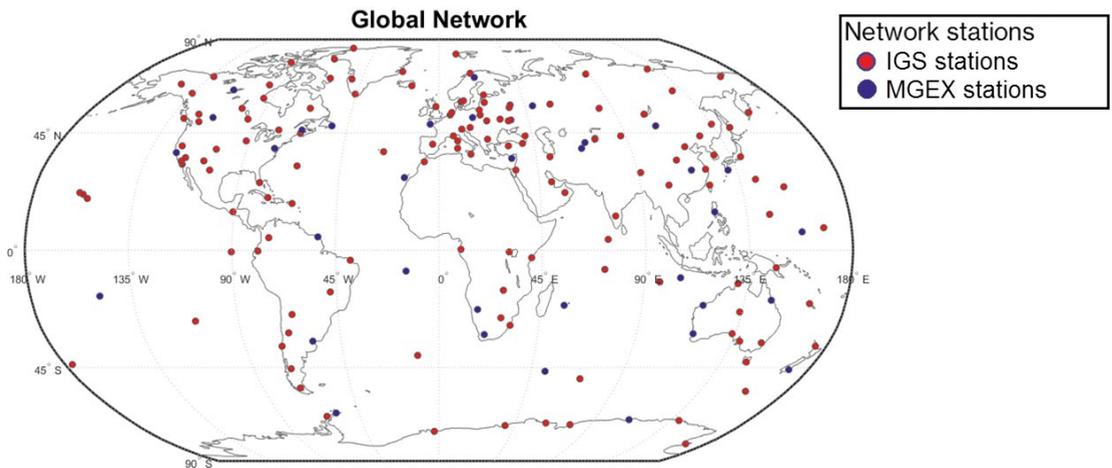


Abb. 3: Globales IGS+MGEX Netzwerk (Quelle: Horozovic [6])

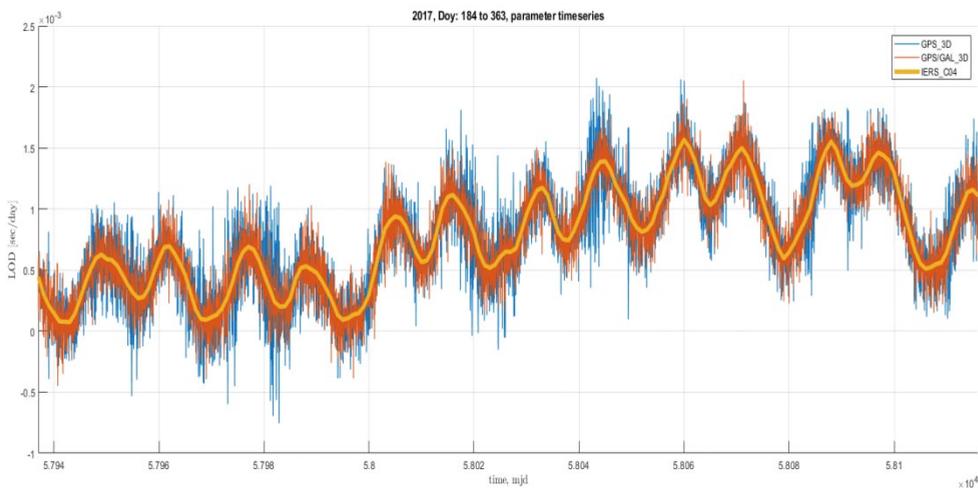


Abb. 4: LOD Zeitserie berechnet aus globalen GPS + Galileo Beobachtungen (Quelle: Horozovic [6])

werden. Die Änderung  $dUT1/dt = LOD$  (Length of Day) ist dagegen so genau wie mit keinem anderen Verfahren aus GNSS Daten berechenbar. Die Polkoordinaten können so mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.03$  mas und LOD mit  $\pm 0.01$  msec mit hoher zeitlicher Auflösung bestimmt werden. Werden nur GPS-Beobachtungen genutzt sind allerdings systematische Fehleranteile, die vor allem von der 1:2 Resonanz der Satellitenumlaufperiode mit der Erdrotation herrühren, nachgewiesen. Hier kann die Nutzung weiterer Satellitensystemdaten, z. B. von Galileo, Abhilfe schaffen (siehe [10]). Das IGS-MGEX Projekt erlaubt heute Zugriff auf globale Stationsdaten mit Multi-GNSS-Empfängern. Auf Basis der Messdaten von 190 Stationen mit kombinierten GPS/GLONASS Mehrfrequenz-

empfängern (siehe Abbildung 3) konnten somit Zeitreihen der Erdrotationsparameter mit einer zeitlichen Auflösung von 1 h im Zeitraum Juni-Dezember 2017 berechnet werden. Die präzisen Bahndaten stammen von ESA/ESOC, als Koordinaten-Referenzrahmen diente der ITRF2014 als modernste Realisierung des ITRS. Abbildung 4 zeigt LOD-Zeitreihen berechnet mit kombinierten GPS/Galileo Daten (orange) im Vergleich zu einer reinen aus GPS abgeleiteten Zeitreihe (blau). Die gelbe Linie bezeichnet die mit täglicher Auflösung vom IERS veröffentlichten C04 LOD Serie. Deutlich ist die 13.7-tägige zonale Tide der festen Erde als Hauptperiode in den Serien ersichtlich. Klar ist auch das höhere Rauschen der GPS-only Zeitserie erkennbar.

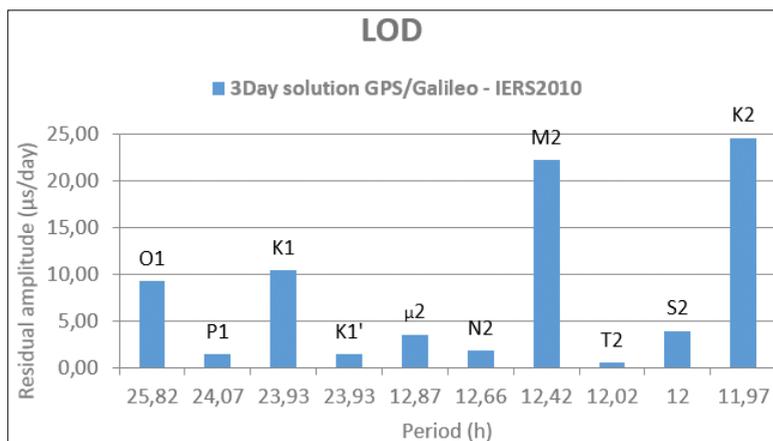


Abb. 5: LOD- Amplitudendifferenzen zum IERS2010 Modell für 10 sub-tägliche Haupttiden (Quelle: Horozovic [6])

Ziel der Untersuchung war allerdings die Bestimmung sub-täglicher Gezeitenperioden. Diese LOD-Variationen lassen sich vor allem auf die Wirkung der Ozeane zurückführen. Diese Wirkung hat ja bereits 1931 F. Hopfner beschrieben, natürlich noch ohne die Option sie mit künstlichen Erdsatelliten mit hoher Präzision messtechnisch erfassen zu können. Subtrahiert man von den LOD-Zeitserien die C04-LOD Werte und unterzieht diesen Restanteil einer Spektralanalyse, so lassen sich bei bekannten sub-täglichen Tidenperioden Korrekturen zum derzeitigen Standardmodell IERS2010 ableiten. Abbildung 5 zeigt die Amplituden-Abweichungen für die Haupttiden im täglichen und halb-täglichen Bereich, die in der Größenordnung von bis zu 25 µs/Tag betragen. Hier sind natürlich noch weitere auf einen längeren Datensatz basierende Untersuchungen nötig, um diese Abweichung als statistisch signifikant zu verifizieren.

### 3.2 Atmosphärenmonitoring

Im Forschungsbereich Höhere Geodäsie werden vielfältige Arbeiten zur Modellierung der ionosphärischen und troposphärischen Signalverzögerung durchgeführt. Am bekanntesten sind in diesem Zusammenhang die Entwicklung der Vienna Mapping Funktionen durch Prof. Johannes Böhm, welche heute weltweit ihren Einsatz finden. An dieser Stelle soll allerdings ein Beispiel zur GNSS-gestützten 3D-Modellierung der Refraktivität der Troposphäre vorgestellt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Troposphären-Tomographie. Liegen ausreichend GNSS-Mehrfrequenz-Beobachtungen

eines dichten Referenzstationsnetzes vor, kann aus diesen der Feuchtanteil der troposphärischen Signal-Zenitverzögerung geschätzt werden. Der Trockenanteil (hydrostatischer Anteil) kann über apriori Modelle bzw. aus gemessenen Druckwerten an den Stationen genau berechnet werden. Projiziert man nun diese Zenitverzögerungen mit Hilfe der Satellitenelevation zwischen Empfangsstationen und den Satelliten, im besten Fall unter Einbeziehung von Gradienteninformation, so erhält man die

feuchten und hydrostatischen Signalverzögerungen entlang der Sichtlinien. Bei durchschnittlich 15 sichtbaren Satelliten und einer Aufzeichnungsrate von 30 Sekunden ergeben sich über 40 000 Beobachtungen pro Station und Tag. Teilt man nun, wie in Abbildung 6 gezeigt, den Raumbereich über dem Interessensgebiet in 3D-Quader (Voxel), so lässt sich mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung die hydrostatische und feuchte Refraktivität in jedem Voxel berechnen, da die Beobachtungen von verschiedenen Stationen und zu verschiedenen Satelliten die Voxel passieren.

Natürlich ergeben sich hier auch eine Vielzahl von Problemen. Nicht alle Voxel werden von Beobachtungen passiert und das hier beschriebene Inversionsverfahren ist damit sehr schwach konditioniert. Geeignete Inversionsmethoden sind in [9] beschrieben. Hilfreich ist jedenfalls ein gutes apriori Modell der Refraktivität, welches entwe-

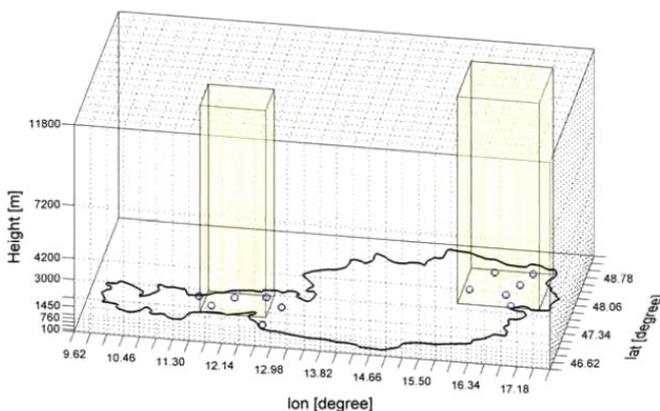


Abb. 6: Bereich regionaler Voxel Modelle (Quelle Möller [9])

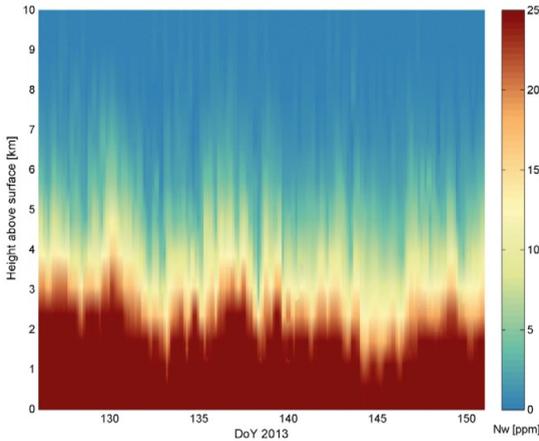


Abb. 7: Feuchter Refraktivitätsverlauf – Gebiet Innsbruck – Mai 2013 (Quelle Möller [9])

der auf 3D-Modellinformation der ZAMG oder auf dem letzten Inversionsschritt basieren kann. Der Vorteil des hier beschriebenen Verfahrens liegt in der abgeleiteten 3D-Information der Refraktivität im Gegensatz zu der im Prinzip nur 1-dimensionalen integralen Refraktivitätsinformation in Zenitrichtung der Referenzstation. Die GNSS-Troposphärentomographie ist seit mehreren Jahren ein sehr aktives Forschungsgebiet und wird aus Sicht des Autors in Zukunft das Standardverfahren zur Verarbeitung der GNSS-Messdaten. Abbildung 7 zeigt den mittels GNSS-Tomographie abgeleiteten

Höhenverlauf der feuchten Refraktivität über Innsbruck für den Monat Mai 2013.

Auch auf dem Gebiet der Ionosphärenmodellierung zur Reduktion von GNSS-Messungen ist unser Forschungsbereich aktiv. Aus den Messdaten eines österreichischen Referenzstationsnetzes wird regelmäßig ein regionales VTEC-Modell (IONEX-Format) mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  TECU für Postprozessingzwecke zur Verfügung gestellt (siehe [3], [8]). Zudem ist auch ein auf globalen Messdaten basierendes Modell für die Echtzeitdatenverarbeitung mit etwas geringerer Genauigkeit verfügbar. Mit beiden Modellen können z. B. alle in Österreich bis zu einem tiefen Elevationswinkel von 5 Grad aufgenommenen 1-Frequenz-GNSS-Beobachtungen um die ionosphärische Signalverzögerung korrigiert werden.

Abbildung 8 zeigt die VTEC-Differenzen des an der TU-Wien erstellten regionalen Ionosphärenmodells relativ zu den vom IGS Analysezentrum CODE publizierten VTEC-Maps. Die Karten wurden mit einer zeitlichen Auflösung von 2h erstellt und zeigen über das gesamte Interessensgebiet Differenzen von nur wenigen TECU. Mit diesen Korrekturmodellen ist es möglich bis in tiefe Elevationswinkel 70% der GNSS 1-Frequenz-Distanzmessungen im sub-Meter-Bereich zu reduzieren. Für zenitnahe Beobachtungen ergeben sich Streckenfehler von max. 30 cm.

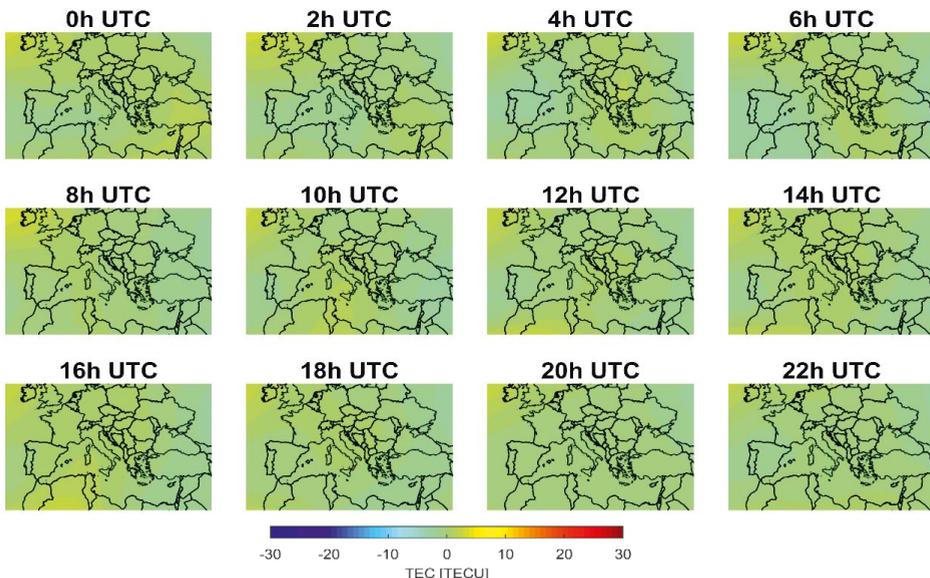


Abb. 8: Differenz regionales VTEC Modell TU-Wien – CODE VTEC Maps, 26. November 2018 (Quelle Magnet [8])

#### 4. GNSS Referenznetze versus PPP (Precise Point Positioning)

Die derzeit geeignetste Methode zur geodätischen Punktbestimmung in nahe-Echtzeit wird mit RTK (Real-Time-Kinematic) bezeichnet. Bedient man sich der Dienste eines GNSS-Korrekturanbieters, so überträgt dieser Dienst die an den Referenzstationen gewonnenen Beobachtungen bzw. Beobachtungskorrekturen inklusive allfälliger Fehlermodelle an den Rover mittels RTCM-Standardformat (aktuell RTCM 3.1-3.3 Formate) und erlaubt in knapp 1 Minute (oder kürzer) Positionierungsgenauigkeiten von  $\pm 1-3$  cm in Lage und etwas schwächer in der Höhenkomponente. Zu den zu modellierenden Fehlern zählen unter anderem der Satellitenuhrfehler, der Satellitenbahnfehler, sowie der Einfluss der Ionosphäre und Troposphäre. Diese systematischen Einflüsse sind in der Regel entfernungsabhängig und weisen unterschiedliche räumliche wie auch zeitliche Auflösungen auf. In der Regel werden die Fehlereinflüsse in Korrekturmodellen erfasst, die eine Interpolation innerhalb des vom Referenznetz abgedeckten Gebietes erlauben. Zur Vereinfachung werden meistens troposphärischer Einfluss und Bahnfehlerinfluss zum nicht-dispersiven (geometrischen) Korrekturterm zusammengefasst. Die Trennung in disperse (ionosphärische) und nicht-dispersive Korrekturmodelle hat Vorteile in Bezug auf den notwendigen zeitlichen Aufdatierungsabstand. Basierend auf diesen Korrekturen werden Beobachtungen oder Beobachtungskorrekturen (Observation Space Representation (OSR)) generiert, die in weiterer Folge an den Nutzer übertragen werden.

Für die kommenden Jahre zeichnet sich allerdings ein Übergang von den Differenztechniken wie RTK zu der auf Code- und Phasenstrecken beruhenden Einzelpunktbestimmung PPP ab. In dieser Technik sind alle Fehleranteile individuell zu modellieren (SSR = State Space Representation). Diese Darstellung der Fehler ist näher an den physikalischen Fehlerquellen und ermöglicht daher eine bessere Darstellung der Fehlercharakteristik. Des Weiteren können die Fehler besser voneinander getrennt werden, was zu einer Verbesserung in der Performance als auch zu einer niedrigeren benötigten Bandbreite bei der Datenübertragung führt.

Das Konzept des Precise Point Positioning wurde bereits 1970 von R. R. Anderle [1] als Einzelpunktbestimmung unter Nutzung von Doppelbeobachtungen mit präziser Bahninformation

vorgeschlagen. Erste Untersuchungen unter Nutzung von Zweifrequenzmessdaten eines einzelnen GPS-Empfängers im Postprocessing wurden bereits 1997 am JPL (Jet Propulsion Laboratory) von Zumberge [11] publiziert. Sie zeigten bereits das Potenzial dieser Technik einer globalen absoluten Positionierung im sub-dm Bereich. Eine präzise Positionsbestimmung ist möglich, sofern Satellitenbahn- und Satellitenuhrkorrekturen (Korrekturen zur Almanachinformation) durch externe Datenquellen zur Verfügung stehen.

Diese präzisen Ephemeriden für Post-Processing als auch Echtzeitanwendungen werden derzeit unter anderem von Organisationen wie z. B. dem IGS veröffentlicht. Die ionosphärische Signalverzögerung wird durch Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination fast vollständig eliminiert. Im Fall von 1-Frequenzmessungen muss ein qualitativ hochwertiges Ionosphärenmodell angebracht werden. Die troposphärische Verzögerung wird entweder modelliert oder im Allgemeinen mitgeschätzt. Einige der relevanten Fehlerquellen sind in Abbildung 9 dargestellt. Unter den oben genannten Voraussetzungen gelingt die Positionierung abhängig von der Beobachtungsdauer bis in den Bereich von wenigen Zentimetern. In der vergangenen Dekade wurde die PPP-Technik deutlich weiterentwickelt, um verschiedenste Applikationen bis hin zur Echtzeitpositionierung zu bedienen.

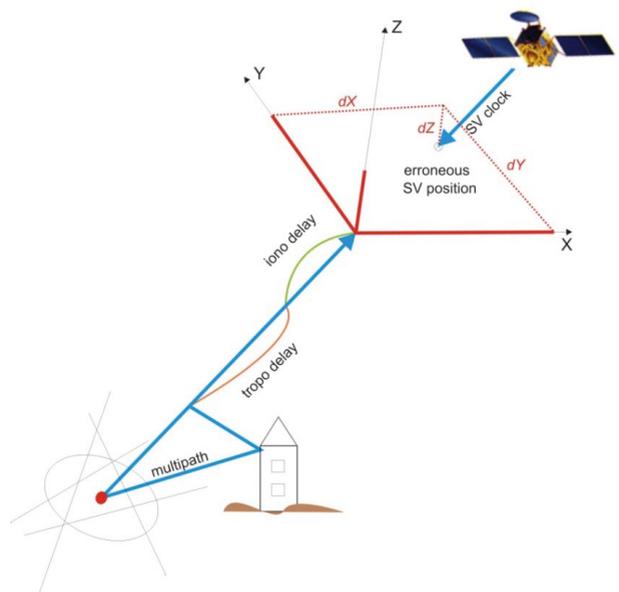


Abb. 9: PPP-Fehleranteile (Quelle: Hinterberger [5])

Das funktionale Modell von PPP basiert auf der ionosphärenfreien Linearkombination der Code- und Phasenstrecken. Die vereinfachten Beobachtungsgleichungen haben dabei folgende Gestalt:

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + \Delta\rho_{r,Ion,i}^s + \Delta\rho_{r,Trop}^s + c\Delta t_r - c\Delta t^s + \upsilon_{r,i}^s$$

$$L_{r,i}^s = \rho_r^s - \Delta\rho_{r,Ion,i}^s + \Delta\rho_{r,Trop}^s + c\Delta t_r - c\Delta t^s + \lambda_i \cdot (N_{r,i}^s + B_{R,i}^s) + \epsilon_{r,i}^s$$

Der Term  $\rho$  bezeichnet die geometrische Distanz zwischen der Satelliten- und der Empfängerantenne,  $c$  steht für die Lichtgeschwindigkeit und die Größen  $\Delta t^s$  und  $\Delta t_r$  bezeichnen die Satelliten- und Empfängeruhrkorrekturen.  $\Delta\rho_{Trop}$  entspricht der troposphärischen Signalverzögerung. Die Phasengleichung enthält zusätzlich die ionosphärenfreie effektive Trägerphasenwellenlänge  $\lambda_{IF}$  und den Parameter  $b_{IF} = N + B$ , der sich aus der ganzzahligen Mehrdeutigkeit  $N$  und einem reell-wertigen Phasenstück  $B$  (UPD = uncalibrated phase delay) zusammensetzt.

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung einer PPP-Positionslösung berechnet mit einem Kalman-Filter-Modell. Das Phasenreststück wird hier noch reell-wertig geschätzt und bewirkt deshalb eine noch relativ langsame Konvergenz. Gelingt es in dieser Zero-Difference Technik auch die Mehrdeutigkeiten ganzzahlig zu schätzen, so lässt sich die Konvergenzzeit wesentlich reduzieren. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich deshalb weltweit mit dieser PPP-Integerfixierung

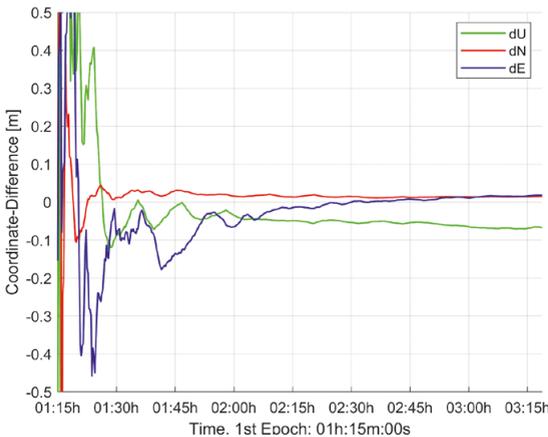


Abb. 10: GPS only / Float Solution-Konvergenz im 1 dm-Bereich nach ca. 20 Minuten (Quelle M.F. Glaner)

der Phasenunbekannten. Dies gelingt unter Berücksichtigung von GNSS-Signalen auf zumindest drei Frequenzen und hochauflösender Ionosphärenmodelle.

### 5. Galileo-High Accuracy Service (HAS)

Im Rahmen der Galileo-Services ist vorgesehen, ab dem Zeitraum 2021 über die Galileo Satelliten auch einen kostenpflichtigen SIS (Signal in Space) Dienst (Commercial Service (CS)) anzubieten. Dieser umfasst zwei Kernfelder, nämlich einen High-Accuracy Service (HAS) und einen Authentifizierungsdienst (CAS). Die entsprechenden Korrektur- und Authentifizierungs-codes sollen vorrangig den Galileo Trägerwellen im E6-Band (E6B, E6C) bzw. E1-Band (open-CAS) aufmoduliert werden. Der HAS Dienst beruht auf der PPP-Technik und wird gemäß einer Entscheidung der EC im Herbst 2018 frei für alle Nutzer verfügbar sein.

Die Mehrzahl der Galileo-Satelliten ist zu diesem Zweck direkt und weitgehend permanent mit den Upload-Stationen des Bodensegments in Verbindung, um möglichst aktuelle Bahn- und Uhrkorrekturen den Nutzern zur Verfügung stellen zu können. Der HAS Dienst verspricht auf Basis von globalen Satellitenbahn- und Uhrkorrekturen im PPP-Mode für Nutzer mit geodätischen High-End GNSS-Empfängern Positionsgenauigkeiten im 1 dm-Bereich (nach einer Koordinaten-Konvergenzzeit von wenigen Minuten). Die Korrekturdaten werden von einem sogenannten Commercial Service Provider (CSP) geliefert (siehe Abbildung 11). Dieser überträgt in Echtzeit seine Korrekturdaten an das GSC (Galileo Service Center) von dem aus die Daten an die Galileo Satelliten hochgeladen werden. Abbildung 11 zeigt die geplante Architektur (das Interface zwischen CSP und GSC) des Galileo Commercial Service High Accuracy.

Der Vorteil gegenüber derzeitigen SIS-Diensten besteht in der Abstrahlung der Korrekturdaten über Satelliten in inklinierten MEO (Medium Earth Orbiter) Bahnen, welche damit Nutzer über den gesamten Globus erreichen können. Derzeit sind diese Dienste vor allem durch die geostationären Bahnen ihres Satellitensegments begrenzt. Eine Erhöhung der Galileo Uplink Kapazitäten (20 ULS) erlaubt es, in Echtzeit Korrekturdaten an 20 Galileo Satelliten gleichzeitig hochzuladen.

### 6. GNSS Risiken

GNSS-Signale werden mit einer Signalstärke von rund 20 Watt von den Satelliten abgestrahlt. An



nalaufnahmen gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt dem Empfänger zugespielt werden.

## 7. Entwicklungen EGNSS (2025+)

Unter dem Acronym EGNSS wird allgemein European GNSS verstanden und dieser Begriff umfasst im Wesentlichen die Systeme EGNOS und Galileo.

Unter dem Begriff EGNOS V3 soll das derzeit in Betrieb befindliche europäische Augmentationsystem EGNOS unter anderem eine komplette Neuausstattung des Bodensegments mit über 50 Bodenstationen erfahren. EGNOS wird in Zukunft neben dem GPS L1 Signal auch die Signale GPS L5 und Galileo E1/E5 unterstützen. Neben der Aussendung der bekannten Korrekturen für Satellitenbahn, Satellitenuhr, dem Ionosphärenmodell NeQuick und der Integritätsmessage ist im Rahmen des EGNOS/EDAS Services auch eine künftige Abstrahlung von Authentifizierungs- bzw. VRS-Korrekturinformationen angedacht.

Auch das Galileo-Raumsegment wird im kommenden Jahrzehnt wesentliche technische Entwicklungsstufen durchlaufen. Nachdem alle FOC-Satelliten der ersten Generation sich im All befinden werden mit Hilfe einer weiteren Gruppe von Galileo-Satelliten (Transition Batch) technische Neuerungen erprobt, welche bei Erfolg dann zum Standard der G2G-Satelliten (Galileo 2nd Generation) gehören werden. Diese G2G Satelliten werden jedenfalls nicht vor 2025 gestartet, ihre technischen Spezifikationen werden aber gerade 2019 endgültig festgelegt. Hoher Wert wird auf die Steigerung der Galileo-Performance gelegt. So soll die Zeit bis zur ersten Positionsermittlung im Receiver (Time to First Fix, TFFF) auch für Massenmarktreceiver deutlich verringert werden. Die Signale sollen sich robuster gegen Multipath verhalten und der heute bei <1 m liegende User Range Error soll durch verschiedene Weiterentwicklungen im Bodensegment und im Raum auf 30 cm gesenkt werden. Die Weiterentwicklung des Galileo Commercial Services HAS soll um 2030 PPP Positionierung mit 10 cm Genauigkeit bei Konvergenzzeiten von 1-2 Minuten erlauben.

Aber auch die Empfängertechnologie ist in stetiger Weiterentwicklung. Dies betrifft natürlich nicht nur die geodätischen High-end Empfänger, sondern auch den heiß umkämpften Massenmarkt. Smartphones mit kombiniertem GPS/Galileo Signaltracking sind fast schon Standard. Kürzlich wurde auch das erste Smartphone mit 2-Frequenz-GNSS-Empfangstechnologie

vorge stellt. Bei geeigneter Performance der eingebauten GNSS-Antenne ist der Weg zur Smartphone-Positionierung im sub-Meter-Bereich nicht mehr weit. Zudem können bei Nutzung des Android-Betriebssystems bereits seit 2016 die rohen Code- und Phasenstreckendaten ausgelesen und in quasi-Echtzeit weiterverarbeitet bzw. veredelt werden. In diesem Genauigkeitsbereich kommt auch das geodätische Wissen über Koordinatensysteme wieder zum Tragen, da auch die genaueste Positionierung nicht ohne das Wissen über das zugrundeliegende Koordinatensystem auskommt.

Last but not least sei die fortschreitende Sensorfusion erwähnt. Häufig werden heute kombinierte GNSS/INS (Inertial Navigation System)-Sensoren angeboten, welche GNSS-Signalausfälle mit immer höherwertigen INS-Sensoren überbrücken. In Zukunft wird auch eine Kombination von GNSS und dichten 5G-Netzen zur Positionierung an Bedeutung gewinnen. Bereits heute wird an geeigneten Standards gearbeitet, die in wenigen Jahren die schnelle gemeinsame Verarbeitung von GNSS/5G Daten gewährleisten sollen.

## Dank

Speziell danken möchte ich meinen Dissertanten, deren Beiträge hier in diesen Artikel mit eingeflossen sind. Mein Dank geht an dieser Stelle aber auch generell an all meine Kollegen und Kolleginnen, Dissertanten und Diplomanden, mit denen ich über die letzten nun fast 35 Jahre im Forschungsbereich Höhere Geodäsie zusammenarbeiten durfte. Viele darf ich auch heute zu meinem Freundeskreis zählen.

Einige Personen möchte ich dennoch hier namentlich erwähnen, deren Unterstützung und fachlicher Enthusiasmus meinen wissenschaftlichen Lebensweg wesentlich beeinflusst haben. Dies waren und sind die Professoren Hermann Mucke, Kurt Bretterbauer, Thomas Wunderlich, Johannes Böhm, und vor allem Gerhard Beutler. Vor allem sei aber meiner Gattin Michaela und meinem Sohn Nicolas gedankt, die nur allzu oft unter meinem zeitaufwendigen Hang zur Satellitengeodäsie zu leiden hatten.

Es war mir immer eine Ehre, am Lehrstuhl für Höhere Geodäsie arbeiten zu dürfen, an dem bereits vor rund 80 Jahren Friedrich Hopfner gewirkt hat.

## Referenzen

- [1] Anderle, R.J., *Point positioning concept using precise ephemeris*. In: Satellite Doppler positioning; Proceedings of the International Geodetic Symposium, Las Cruces, N. Mex., October 12-14, 1976. Vol. 1.(A77-47370 22-43) Las Cruces, N. Mex., New Mexico State University, 1976, pp. 47-75.
- [2] J. Böhm, A. Niell, P. Tregoning, H. Schuh, *Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on data from numerical weather model data*, Geophysical Research Letters, Vol. 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546, 2006.

- [3] J. Boisits, *Ionospheric Delay Modeling; Vortragsunterlagen: Geoweb - GNSS Course Vienna 2016*, Department Geodäsie und Geoinformation, Austria; 31.05.2016 - 10.06.2016.
- [4] F. Hinterberger, F. Blauensteiner, A. Eichhorn, R. Weber, "GNSS/IMU integration for the precise determination of highly kinematic flight trajectories"; *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), Austrian Contributions to the XXV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)*, 2011, S. 110 - 113.
- [5] F. Hinterberger, R. Weber, K. Huber, R. Lesjak, *Ambiguity fixing in real-time PPP-Determination of uncalibrated phase delays using a regional network; Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, 2015, S. 130 - 137.
- [6] D. Horozovic, R. Weber, *Bestimmung von hochfrequenten Erdrotationsparametern unter Verwendung von GPS und Galileo Beobachtungsdaten; Geodätische Woche 2018, Frankfurt; 16.10.2018 - 18.10.2018; in: „Abstract Book Geodätische Woche 2018“.*
- [7] K. Huber, F. Hinterberger, R. Lesjak, R. Weber, *Real-time PPP with Ambiguity Resolution - Determination and Application of Uncalibrated Phase Delays; Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014, 2014, S. 976 - 985.*
- [8] N. Magnet, *Giomo: A robust modeling approach of ionospheric delays for GNSS real-time positioning applications; Dissertation Department für Geodäsie und Geoinformation / Höhere Geodäsie, 2019, in Begutachtung.*
- [9] G. Möller, *Reconstruction of 3D wet refractivity fields in the lower atmosphere along bended GNSS signal paths; Dissertation Department für Geodäsie und Geoinformation / Höhere Geodäsie, 2017.*
- [10] R. Weber, M. Schindelegger, D. Horozovic, J. Nastula, A. Brzezinski, E. Schönemann, W. Enderle, *Determination of High Frequency Earth Rotation Parameters from GPS+Galileo observation data; 6th International Colloquium - Scientific and Fundamental Aspects of GNSS/Galileo, 2018.*
- [11] Zumbege, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M. & Webb, F., *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, 1997, pp. 5005-5017.*

#### Anschrift des Autors

Ao. Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Robert Weber, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsbereich Höhere Geodäsie, TU-Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.

Email: robert.weber@geo.tuwien.ac.at



# Jetzt Mitglied werden!



## Wir bieten vieles..

- ➡ Netzwerken und Weiterbilden
- ➡ Kostenlose Fachzeitschrift vgi
- ➡ Vorträge und Seminare
- ➡ Ermäßigungen und Förderungen
- ➡ Mitgliederbereich auf der Homepage

➡➡➡ Näheres unter [www.ovg.at](http://www.ovg.at) ➡➡➡

:: Be part of it! ::

