

Realisierung und Monitoring von ETRS89 in Österreich



Helmut Titz, Norbert Höggerl, Erich Imrek, Wien; Günter Stangl, Graz

Kurzfassung

Koordinatenbezugssysteme für Vermessung, Kataster und Geo-Wissenschaften wurden in den letzten 25 Jahren durch die Einbeziehung von Satellitenmessungen gravierend verändert. Die globale Vernetzung und länderübergreifende Projekte machten die Einführung eines 3-D Referenzsystems erforderlich. Gemeinsam mit den meisten anderen europäischen Ländern hat das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) beschlossen, das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) als nationales 3-D Bezugssystem zu nutzen. Mit der Fertigstellung des Echtzeitdienstes APOS (Austrian Positioning Service) ist die permanente Realisierung von ETRS89 in Österreich gewährleistet. Im Beitrag wird ein Überblick über die Realisierung von ETRS89 gegeben. Es versteht sich von selbst, dass neben der Realisierung ein permanentes Monitoring eine entscheidende Aufgabe darstellt, um die Qualität der Realisierung sicher zu stellen. Über die Vorgangsweise beim Monitoring, sowie die sich daraus ergebenden Konsequenzen in Hinblick auf die Stabilität der Koordinaten wird berichtet. Abschließend wird die Nutzung von ETRS89 in Zusammenhang mit der EU-Richtlinie INSPIRE dargestellt.

Schlüsselwörter: AMON, APOS, ETRS89 Austria 2002, Bezugsrahmen, Bezugssystem, Monitoring

Abstract

The generation of coordinate reference systems for geodesy, surveying and geo-sciences has been strongly changed by the use of satellite measurements over the last 25 years. 3-D reference systems are necessary to provide a common base for regional and global projects. The Federal Office of Metrology and Surveying (BEV) decided to use ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) as the official 3-D system. The newly established Austrian Positioning Service (APOS) is used to implement ETRS89 in Austria. This article intends to give a survey of the implementation process of ETRS89 in Austria. Once realized, permanent monitoring is necessary to secure quality standard. In this article the monitoring process will be described and the necessity of coordinate stability as well as the consequences of possible changes in coordinates will be discussed. Finally the use of ETRS89 data within INSPIRE, the EU directive, will be referred to.

Keywords: AMON, APOS, ETRS89 Austria 2002, Reference Frame, Reference System, Monitoring

1. Einleitung

Nach 1980 wurde die Landesvermessung durch die Einführung von Satellitenmessmethoden in allen Ländern stark verändert. Erstmals wurde es möglich, kartesische Koordinaten in allen drei Dimensionen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Vermessungen konnten über viel weitere Entfernungen und mit einer viel höheren Genauigkeit als bisher unter Verwendung von Lage- und Höhenfestpunkten durchgeführt werden. Die Ungenauigkeiten der Satellitenbahnen, der Satelliten- und Empfängeruhren, sowie der atmosphärischen Einflüsse, besonders die der Ionosphäre und der Troposphäre, bedingen jedoch Relativverfahren, die diese Ungenauigkeiten und entfernungsabhängigen Einflüsse größtenteils eliminieren. Das Prinzip der Vernetzung von Permanentstationen, auf deren Basis korrigierte Messungen z.B. in Form der „Virtuellen Referenzstation – VRS“ den Anwendern in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden, wurde konzipiert und umgesetzt. Durch das Bundesamt

für Eich- und Vermessungswesen (BEV) wurde in Österreich APOS, das Austrian Positioning Service, geschaffen. Die Modellierung der entfernungsabhängigen Einflüsse für eine VRS-Übertragung basiert auf Stationskoordinaten höchster Genauigkeit. Die Koordinaten müssen einerseits genauer als jene der zu messenden Einzelpunkte und andererseits in einem präzise definierten Bezugssystem bestimmt worden sein. Die Bestimmung, Überwachung und Einbindung in internationale Bezugssysteme wird im folgenden Überblick geschildert.

2. ITRS und ETRS89 als übergeordnete Systeme und ihre Realisierung

Will man ein nationales geodätisches Referenzsystem aus einem internationalen realisieren, stehen derzeit zwei zur Auswahl:

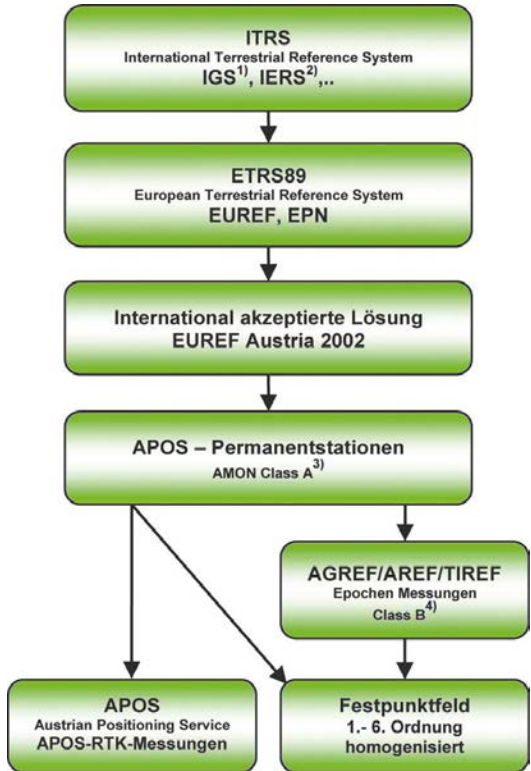
- 1) das International Terrestrial Reference System (ITRS) und
- 2) das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89).

ITRS ist definiert als dreidimensionales kartesisches System mit dem Ursprung im Schwerpunkt der Erde. Das System rotiert definitionsgemäß mit der Erde [1]. Das Problem dabei ist, dass durch die Kontinentalverschiebung jeder reale Punkt auf der Erdoberfläche zeitabhängige Koordinaten besitzt. Für Europa betragen die jährlichen Veränderungen im Durchschnitt 25 mm pro Jahr. Deshalb wurde für die Bedürfnisse der Landesvermessungen in Europa nach einem System gesucht, das Koordinaten von Vermessungspunkten und anderen Punkten auf lange Zeit stabil im Rahmen der geforderten Genauigkeit hält. Im Jahr 1989 wurde vom ITRS ETRS89 abgeleitet, das für den „stable part of the Eurasian plate“ fast konstante Koordinaten liefern sollte [2]. Die Ansprüche an die Genauigkeit lagen damals im Bereich von 3-5 cm. ITRS und ETRS89 werden durch Messungen realisiert. Die Realisierungen von ITRS werden durch ITRF (International Terrestrial Reference Frame) und der Jahreszahl (z.B. ITRF89, ITRF2005) ausgedrückt. Die Realisierung von ITRS geschieht durch die Kombination von Messungen unter Verwendung von GPS (Global Positioning System), SLR (Satellite Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Interferometry zu Quasaren) und DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Die Kombination erfolgt aus einem Netz von globalen Referenzstationen, für welche Koordinaten und Geschwindigkeiten (Koordinatenänderungen pro Jahr) inklusive mittlerer Fehler berechnet werden. Mit jeder Realisierung ändern sich die Werte, da neue Modelle und mehr sowie bessere Messungen verwendet werden. Für idente Stationen erhält man daher je nach Realisierung unterschiedliche Werte. Eine signifikante systematische Differenz in Koordinaten und Geschwindigkeiten besteht zwischen ITRF2000 und ITRF2005. Da die Realisierungen von ETRS89 bisher immer von denen des ITRS abgeleitet wurden, sind die Differenzen auch in den Realisierungen ETRF2000 und ETRF2005 vorhanden. Deshalb wird von EUREF¹ bis auf weiteres die Verwendung von ETRF2000 (ETRF2000-Release 05) für eine Neurechnung von ETRS89 Koordinaten empfohlen [3], [4]. Von ETRS89 abgeleitete nationale Realisierungen wurden bis vor wenigen Jahren in Form von Kampagnen, die an die Permanentstationen von IGS (International GNSS Service) und EPN (EUREF Permanent Network) angebunden wurden, durchgeführt [5].

3. Realisierung von ETRS89 in Österreich

Die Messungen zur Realisierung von ETRS89 in Österreich reicht bis in die Mitte der 90-er Jahre des 20. Jahrhunderts zurück und spiegelt auch sehr stark die technische Entwicklungen auf dem Gebiet der Realisierung von satellitengestützten 3-D Bezugssystemen wider. Wie in Abb. 1 dargestellt, ist die Realisierung von ETRS89 in Österreich ein mehrstufiges Verfahren, welches sich aus den folgenden Hierarchieebenen zusammensetzt:

- *International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002*
- APOS Permanentstationen
- AGREF, AREF, TIREF
- Homogenisiertes Festpunktfeld
- APOS – Austrian Positioning Service



1) IGS: International GNSS Service
 2) IERS: International Earth Rotation Service
 3) CLASS A: < 1cm, perm. (reproduzierbar)
 4) CLASS B: ± 1 cm, 3x24 h. (ev. 1x24 h)

Abb.1: Hierarchieschema für die Realisierung von ETRS89 in Österreich

1) Reference Frame Subcommittee for Europe/IAG Commission I

3.1 International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002

Im Jahre 2003 wurde der EUREF Subkommission eine Koordinatenlösung für 11 Punkte (10 Permanentstationen und 1 Epochenstation) in Österreich für die GPS-Woche 1176 (Juni 2002) vorgelegt, welche nach den damals gültigen Kriterien eine ETRS89 Koordinatenberechnung beinhaltete. Diese Berechnungen wurden vom BEV gemeinsam mit dem Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien durchgeführt. Die Berechnungen beinhalteten vier Punkte als Ankerpunkte (stabile Permanentstationen der höchsten Hierarchieebene). Diese Lösung wurde als eine dem internationalen Standard entsprechende Realisierung von ETRS89 akzeptiert und ist als Lösung ETRS89 Austria 2002 (exakt: ETRS89/ETRF2000 Austria 2002.45) in der Resolution 1 von EUREF aus 2003 bestätigt worden [6].

3.2 APOS Permanentstationen

APOS nutzt derzeit 43 GPS/GNSS Permanentstationen in Österreich (BEV: 32, ÖAW: 3, KELAG: 8) und weitere 33 GPS/GNSS Permanentstationen im grenznahen Ausland. Die APOS Permanentstationen in Österreich dienen zur Realisierung von ETRS89 in Österreich, 8 dieser Stationen waren bereits in der unter Kap. 3.1 angeführten *international akzeptierten Lösung ETRS89 Austria 2002* enthalten. Die restlichen APOS Permanentstationen wurden seit 2003 kontinuierlich in die Lösung ETRS89 Austria 2002 eingerechnet.

3.3 AGREF, AREF und TIREF

Seit 1990 wurde durch GPS-Epochenmessungen ein Netz von Festpunkten, welches die Bezeichnung AGREF (Austrian Geodynamic Reference Frame) trägt, realisiert. Durch die spezielle örtliche Auswahl und Monumentierung der Messpunkte sollten einerseits hochgenaue 3-D Referenzpunkte geschaffen, gleichzeitig aber durch Wiederholungsmessungen aktuelle tektonischen Bewegungen untersucht werden [7], [8]. Die ersten Ergebnisse des Gesamtnetzes wurden 1997 gemeinsam von BEV und dem Institut für Weltraumforschung (IWF) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) publiziert [9], [10]. Aus finanziellen Gründen konnte das Konzept einer in regelmäßigen Abständen stattfindenden Übermessung jedoch nicht eingehalten werden.

Im Jahr 1996 wurde von privater Seite die GPS-Kampagne AREF-96 (Austrian Reference Frame) durchgeführt, die ca. 300 Punkte, vor allem Triangulierungspunkte der Landesvermes-

sung und AGREF-Punkte, umfasste. Die vom IWF und der TU Wien/Institut für Geodäsie und Geophysik durchgeführten Koordinatenberechnungen ergaben damals Ergebnisse im System ITRF1994 [11].

Im Jahre 2002 wurden die Ergebnisse von AREF durch das BEV übernommen. In den Jahren 2004-2009 wurde die Qualität der Erstmessung durch Kontrollmessungen geprüft (Messdauer > 24 h), wo erforderlich verbessert, und in den österreichischen Referenzrahmen ETRS89 Austria 2002 eingerechnet. Die bei den Berechnungen erzielte Genauigkeit ist:

$$m_{x,y} < \pm 1,0 \text{ cm,}$$

$$m_h < \pm 2,0 \text{ cm.}$$

Seitens der Tiroler Landesregierung wurden im Jahre 2000 im Rahmen eines Leistungsausgleichs die GPS Messdaten von 35 Punkten an das BEV übergeben, welche die Basis für das TIREF (Tyrolean Reference Frame) bildeten. AGREF, AREF und TIREF stellen die 3. Hierarchiestufe der Realisierung von ETRS89 in Österreich dar.

3.4 Homogenisiertes Festpunktfeld

Die im klassischen Festpunktfeld (FPF) enthaltenen Fehler erreichen in Österreich gesamt gesehen ca. 1,5 m, lokal können Maßstabsdefekte von bis zu 3 cm/km auftreten. Zur Behebung dieser Mängel laufen im BEV folgende Arbeiten:

- FP 1.-5.Ordnung: statische GPS Messungen auf FP (fertig),
- FP 1.-5.Ordnung: Neurechnung mit vorhandenen klassischen Messungen,
- FP 6.Ordnung: Übermessung von FP 6. O. (Einschaltpunkte) mittels APOS.

Zunächst werden die seit dem Jahre 1989 an 36.700 Punkten gemessenen 122.000 GPS-Basislinien (mittlere Entfernung 1.8 km) ausgeglichen, wobei die Koordinatenwerte der APOS Permanentstationen, sowie von AGREF, AREF und TIREF datumsbestimmend sind. Die Ergebnisse dieser Ausgleichs legen wiederum das Datum für die nachfolgenden Ausgleichs der terrestrischen Messungen (1,5 Millionen Richtungen, Strecken und Zenitdistanzen) fest. Die Grundlage für alle Berechnungen bildet eine umfangreiche Beobachtungsdatenbank aller Messungen seit dem Jahr 1920. Nachdem für den überwiegenden Teil (65 %) der 60.000 Triangulierungspunkte redundante Messergebnisse aus unterschiedlichen Messepochen vorliegen, können Aussagen über die Stabilität von Punkten und Massenbewe-

gungen (Rutschungen, Senkungen) abgeleitet werden. Im Bereich der Einschaltpunkte findet die Realisierung des ETRS89 bei etwa 120.000 Punkten statt, wobei 25.000 Punkte über gemessene Basislinien und die restlichen Punkte mittels APOS-RTK-Messungen bestimmt werden.

Nach Abschluss dieser Arbeiten stehen für alle gültigen FP 1.-6.O. ETRS89 Koordinaten im Bezugsrahmen ETRF89 Austria 2002 zur Verfügung.

3.5 Echtzeit-Koordinatenbestimmung mittels APOS

APOS – der Austrian Positioning Service, erfüllt bei der Realisierung von ETRS89 in Österreich zwei Funktionen:

- die APOS-Permanentstationen stellen nach der *International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002* die höchste Hierarchieebene in der Realisierung von ETRS89 in Österreich dar,
- das Echtzeit Positionierungsservice APOS liefert dem Nutzer Koordinaten im nationalen ETRF89 Bezugsrahmen in Echtzeit [12].

Diese Doppelfunktion von APOS zeigt dessen große Bedeutung für die Realisierung von ETRS89 in Österreich auf, da nicht nur die Nutzung als Echtzeit-Positionierungsservice ETRS89 Koordinaten liefert, sondern auch alle unter Kap. 3.4 angeführten Arbeiten zur Homogenisierung des Festpunktfeldes auf den ETRS89 Koordinaten der APOS-Permanentstationen aufbauen.

In der Funktion als Echtzeit-Positionierungsservice nutzt APOS derzeit 67 Stationen des Stationsnetzes (siehe Abb. 2).

4. Festlegung der ETRS89 Koordinaten in Österreich

Die Festlegung eines nationalen Koordinatenbezugsrahmens orientiert sich heute an internationalen Regeln, welche man auch als top-down-Prinzip bezeichnen kann: ausgehend von den GPS orbits erfolgt die Berechnung im weltweiten ITRF, im nächsten Schritt wird dann in den europäischen Bezugsrahmen ETRF umgerechnet um abschließend in einer nationalen Lösung zu münden: GPS orbits → ITRF → ETRF → nationale Realisierung. Für Zwecke der praktischen Vermessung (z. B. Kataster) sollen die einmal veröffentlichten Koordinaten möglichst lange unverändert erhalten bleiben. Andererseits verlangen Echtzeit-Positionierungsdienste, wie z. B. APOS, die bestmöglichen aktuellsten Koordinaten. Dieser Widerspruch wird sich nie ganz auflösen lassen, ist aber in Österreich mit seinen geringen Koordinatenänderungen aufgrund tektonischer Stabilität zu handhaben.

Wie unter Kap. 3.1 beschrieben, gilt als Grundlage für die Realisierung von ETRS89 in Österreich die *International akzeptierte Lösung ETRS89 Austria 2002*. Zum Zeitpunkt der Bestimmung dieses Bezugsrahmens waren 10 APOS Permanentstationen in Österreich verfügbar, die

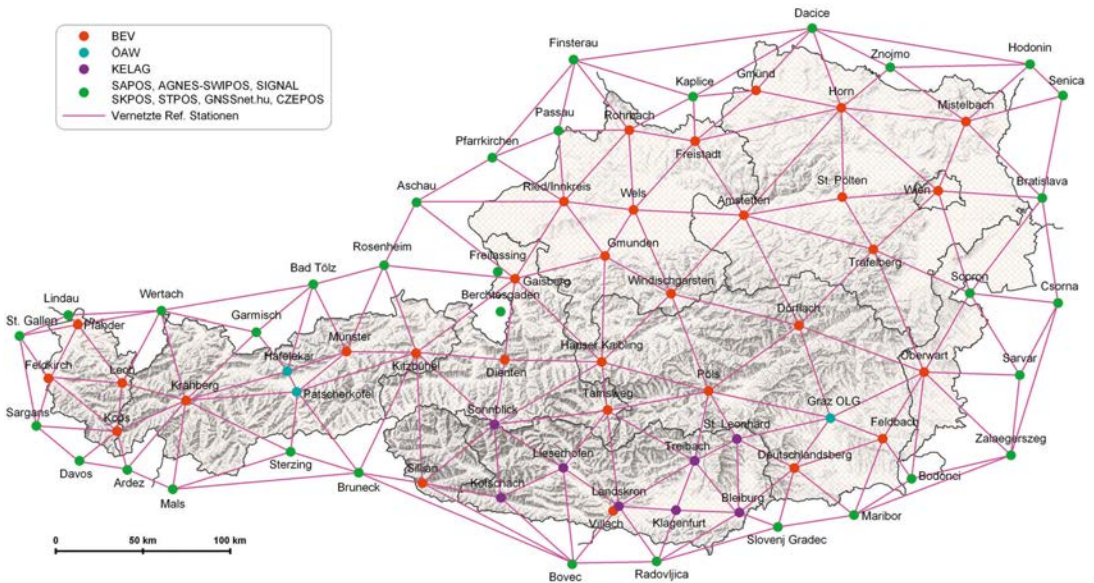


Abb. 2: Permanentstationen und internationale Vernetzung von APOS

weiteren 33 Permanentstationen wurden sukzessive bis einschließlich 2008 aufgebaut und in APOS integriert. D. h., der Prozess der Koordinatenneubestimmung für die 33 Permanentstationen fällt mit dem Koordinatenmonitoring der bereits existierenden Stationen zusammen.

4.1 Berechnungsgrundlagen

Für die Berechnungen von Koordinaten der APOS Permanentstationen werden RINEX-Daten (Intervall 30 sec.) verwendet. Diese Berechnungen erfolgen nach folgenden Grundlagen:

- Internationale Standards wie bei EPN (European Permanent Network),
- Tageslösungen vereint zu Wochenlösungen (GPS week),
- Fixierung der IGS Stationen: GRAZ (A), PENC (H), WTZR (Wetzell/D), ZIMM (Zimmerwald/CH); ergänzt durch STPO (St. Pölten/A),
- jährliche Berechnung von kumulierten Mehrjahreslösungen (Start 2001, jedes neue Jahr wird angehängt).

4.2 Veränderungen mit GPS week 1400

Die mit GPS week 1400 (November 2006) eingeführten neuen Vorgaben für die internationale Bestimmung von 3-D Koordinaten brachten folgende Änderungen mit sich:

- Einführung von absoluten Antennenkalibrierdaten für Satelliten- und Empfängerantennen (statt relativer),
- Referenzrahmen IGS05 (statt ITRF2000),
- Cut off Winkel für Beobachtungen 3° (statt 10°),
- verbesserte Troposphärenmodelle,
- Einführung von Geschwindigkeitsschätzung bei der Zeitreihenauswertung.

Durch die Einführung der o. a. neuen Regeln für die Koordinatenbestimmung erfahren alle Koordinaten mit der GPS week 1400 einen Sprung, der sich vor allem in der Höhenkomponente auswirkt [13]. Diese Sprünge verfälschen die Geschwindigkeiten, wenn sie nicht eliminiert werden. Vor GPS week 1400 wurden nach den damaligen internationalen Regeln die Sprünge geschätzt und angebracht [14]. In der Zwischenzeit werden kleine Sprünge nach dem Vorbild von ITRF als „discontinuities“ ausgewiesen und nur große ab ca. 10 mm angebracht.

4.3 Endgültige ETRS89 Koordinatenfestlegung

Wie sich in den letzten Jahren gezeigt hat, konvergieren die Koordinatenbestimmungen sehr schnell, je weiter sie sich von dem Zeitpunkt GPS week 1400 entfernen. Deshalb wurde mit der Lösung 2008 (Messdaten aus den Jahre 2001 bis Ende 2008) ein Kompromiss gefunden, der im Bereich der Genauigkeit von 10 mm praktikabel ist. Die in ITRF2000 gerechnete Lösung wurde mithilfe einer Helmert-Transformation auf die identen Punkte GRAZ, PENC, STPO, WTZR, ZIMM der *International akzeptierten Lösung ETRS89 Austria 2002* (vor GPS week 1400) mit gutem Erfolg transformiert. Der mittlere Fehler der Transformation betrug $\pm 2,5$ mm. Diese Lösung 2008 wurde „eingefroren“, die Koordinaten der APOS-Permanentstationen werden auf unbestimmte Zeit fixiert und die Stationsgeschwindigkeiten als Information ausgewiesen, ohne dass sie verwendet werden. Die Werte der entsprechenden Stationen von ETRS89 Austria 2002 werden durch die Lösung 2008 ersetzt. Die nationale Referenz, ETRS89 realisiert durch ETRF2000 Epoche 2002.45, bleibt unverändert. Wie gezeigt werden kann, ist die Realisierung durch die Lösung 2008 verbessert. Die Lösung 2008 enthält viel mehr Stationen als die von 2002, da der Aufbau von APOS 2008 abgeschlossen war.

Im Vergleich zu den Nachbarstaaten, die alle Realisierungen von ETRS89 aus verschiedenen Jahren verwenden, gilt, dass je zeitlich näher diese Realisierungen sind, desto kleiner sind die Koordinatendifferenzen gemeinsamer Punkte (=Permanentstationen). Trotz der großen Zeitspanne der Realisierungen von ETRS89 in Deutschland (1993) und Italien (2008), betragen die Koordinatendifferenzen maximal 1–2 cm. D.h., die nationalen Realisierungen von ETRS89 sind für grenzüberschreitende Anwendungen nahezu unbeschränkt verwendbar.

4.4 Rechtliche Grundlage für ETRS89

Die Nutzung des ETRF89 Bezugsrahmens für die APOS Permanentstationen wurde im Amtsblatt für Vermessungswesen velautbart [15] und in der Vermessungsverordnung 2010 präzisiert. Gültiges geodätisches Bezugssystem der Landesvermessung bleibt jedoch weiterhin das System des Militärgeographischen Institutes (MGI).

5. Monitoring des Bezugsrahmens ETRF89

Die Realisierung von nationalen Bezugssystemen im System ETRS89 unterliegt, wie in Kap. 3.1 beschrieben, genauen Vorgaben seitens EUREF.

Genauso wichtig wie die Bestimmung international gültiger ETRS89 Koordinaten ist die laufende Kontrolle der einmal festgelegten Koordinaten. Für das Monitoring des österreichischen ETRF89 Bezugsrahmens wurde das Austrian Monitoring Network (AMON) geschaffen (Abb. 3), welches neben allen APOS-Permanentstationen auch öffentlich zugängliche Stationen in Österreich und dem benachbarten Ausland umfasst.

5.1 AMON – Austrian Monitoring Network

Die Berechnung von Zeitreihen für AMON ist ein Prozess, welcher, wie in Kap. 4 beschrieben, gemeinsam mit der Berechnung der Stationskoordinaten durchgeführt wird. Diese Zeitreihen für AMON werden mehrmals im Jahr erneuert und liefern Koordinaten (x, y, z) zu einer bestimmten Epoche und die Geschwindigkeiten (V_x , V_y , V_z) in ITRF2000. Die Koordinaten werden dann in ETRF2000 transformiert. Die Geschwindigkeiten werden durch Subtraktion der Rotation der Eurasischen Platte in ITRF2000 [16] auf ETRF2000 reduziert. Die Geschwindigkeiten der APOS-Stationen betragen in ETRF2000 nicht einmal 10 % der Werte von ITRF2000. Trotz aller tektonischen Strukturen bewegt sich das österreichische Staatsgebiet fast im Gleichklang mit der Eurasischen Platte. Allerdings bewegen sich die einzelnen Stationen unterschiedlich. In Tab.1 sind die beiden Stationen PFAN (Pfänder bei Bregenz) und WIEN (Wien BEV) exemplarisch angeführt,

deren Geschwindigkeitsschätzungen bereits seit Jahren stabil und kaum mehr von eventuellen Rechen- oder Modellungenauigkeiten beeinflusst sind. Die relative Geschwindigkeit beträgt im Mittel ca. 3 mm pro Jahr. Das bedeutet, dass 2011 die Realisierung von 2008 um einen Zentimeter von der aktuellen abweichen wird, wenn die Koordinaten von 2008 beibehalten werden.

Bezugsrahmen / Geschwindigkeit V	PFAN [mm/Jahr]	WIEN [mm/Jahr]
ITRF2000 V_x	-13,4	-17,0
ITRF2000 V_y	18,0	16,4
ITRF2000 V_z	11,6	9,3
ETRF2000 V_x	0,5	-1,2
ETRF2000 V_y	-0,2	-1,1
ETRF2000 V_z	1,8	0,1
ETRF2000 V_{North}	0,9	1,1
ETRF2000 V_{East}	-0,3	-0,8
ETRF2000 V_{Up}	1,7	-0,9

Tab. 1: Stationsgeschwindigkeiten in ITRF2000 und ETRF2000

Wie die Abb. 3 zeigt, gibt es zwischen Wien und Bregenz einige Stationen, die Abweichungen von mehreren mm pro Jahr gegenüber den Nachbarstationen aufweisen, darunter auch

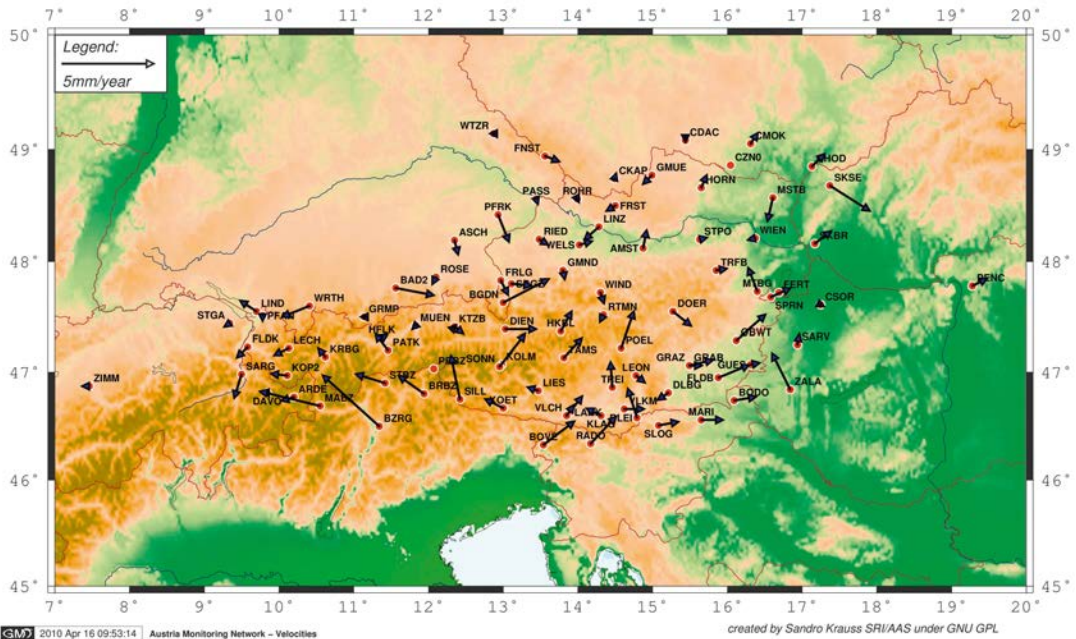


Abb. 3: Horizontale Stationsgeschwindigkeiten in ETRF2000 für das Austria Monitoring Network (AMON) 2009

APOS-Stationen (z.B. SILL, Sillian). Aus den Zeitreihen lässt sich auch herauslesen, dass die Koordinaten von saisonalen Effekten betroffen sind [17]. Ein Paradebeispiel ist das Hafelekar (HFLK), dessen Nordkomponente seit mehr als 10 Jahren saisonal um ± 5 mm schwankt. In der Höhenkomponente sind saisonale Schwankungen von ± 10 mm nicht ungewöhnlich, obwohl durch verbesserte Troposphärenmodelle seit GPS week 1400 die Amplitude um 50 % reduziert wurde (z.B. PATK, Patscherkofel). Ein permanentes Monitoring ist deshalb notwendig, um das Verhalten zu beobachten und die Ursachen zu erforschen.

Eine moderne Methode der Beurteilung saisonal variierender Stationskoordinaten ist die Frequenzanalyse. Zunächst berechnet man das so genannte Autospektrum jeder Komponente der Koordinatenzeitreihe. Zeigen sich im Autospektrum deutliche Spitzen bei bestimmten Frequenzen, so kann man diese Information zur Filterung der Zeitreihe heranziehen und dadurch einen wesentlich glatteren Verlauf der Koordinatenzeitreihe erreichen. Diese trendreduzierte Zeitreihe kann dann zur Berechnung verbesserter, mittlerer Koordinaten und Geschwindigkeiten

herangezogen werden. Am Beispiel der Station Hafelekar (Abb. 4, unten) erkennt man in der Nordkomponente einen sehr stark ausgeprägten Autokorrelationskoeffizienten bei einer jährlichen Periode. Durch die Filterung und Trendreduktion kann die saisonale Schwankung von ± 5 mm auf ca. $\pm 1,5$ mm reduziert werden (Abb. 4, oben). Es handelt sich bei der Frequenzanalyse um eine rein empirische Methode, die Ursachen derartiger Effekte werden dabei allerdings nicht aufgedeckt und bedürfen tiefergehender Untersuchungen. Vermutet werden können Zusammenhänge der Koordinatenvariationen mit Frost, Grundwassereinflüssen oder auch atmosphärischen Parametern wie inhomogene Schichtungen atmosphärischen Wassers oder Föhnwind. Vielfach haben sich auch die noch immer nicht ausgereiften Troposphärenmodelle der Auswertesoftware als Ursache scheinbarer saisonaler Effekte herausgestellt und weiteren Forschungsbedarf aufgezeigt, speziell bei der Höhenkomponente.

5.2 Echtzeitkoordinatenmonitoring

Typischerweise erfolgt die AMON Auswertung aufgrund der Verfügbarkeit der Precise Orbits des IGS mit einer Verzögerung von mindestens

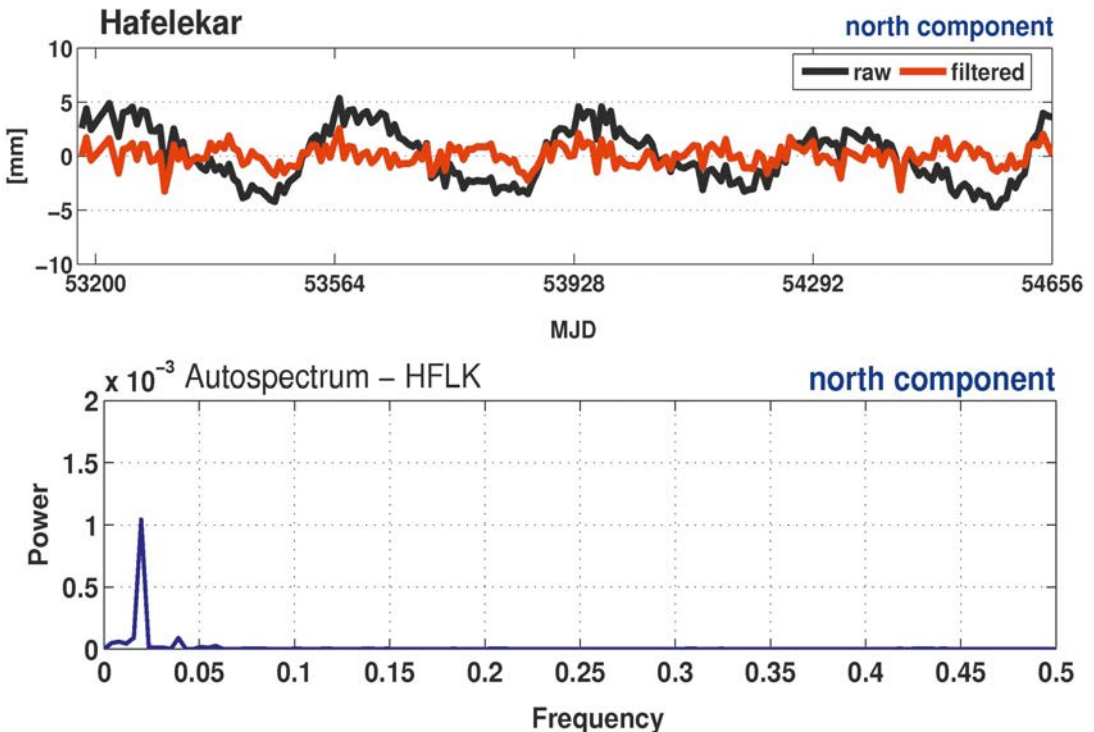


Abb. 4: Hafelekar – Vergleich roher und gefilterter Nordkomponente (oben), sowie Autospektrum (unten). Einheit (Frequency) ist [1/week].

2 Wochen nach der Messdatenaufzeichnung auf Basis von Tagesfiles mit dem Ziel die Langzeitstabilität zu untersuchen. Dieses Verfahren liefert die höchste erreichbare Genauigkeit, hat aber den Nachteil, dass spontane Veränderungen an den Stationen, wie z.B. Beschädigungen der Fundamentierung durch Bauarbeiten, nicht unmittelbar erkannt werden können. Auch schleichende Veränderungen, z.B. durch zunehmende Vereisung der Antennen im Winter werden erst extrem verspätet – 4 Wochen und mehr – erkannt. Für ein Echtzeitsystem wie APOS würde das Nichterkennen von Koordinatenänderungen an den Permanentstationen bedeuten, dass das ETRS89-Referenzsystem nicht mehr in der erforderlichen Genauigkeit realisiert werden kann und die RTK-Nutzer im Bereich der beeinträchtigten Station verschobene Positionen ihrer Messpunkte erhalten würden. Es ist deshalb durch geeignete Monitoringverfahren und Alarmmechanismen sicherzustellen, dass die zugrunde liegenden Permanentstationen stabile Koordinaten besitzen und im Fall von Abweichungen, die einen Alarmlevel übersteigen, Maßnahmen gesetzt werden können.

Das Echtzeitmonitoring gestaltet sich nun zweistufig. Einerseits kontrolliert sich ein typisches Echtzeitsystem mittels spezieller Koordinatenmonitore selber, indem es für alle Stationen laufend ETRF89-Koordinaten aus aktuellen Beobachtungen rechnet und mit den Sollkoordinaten,

die aus der AMON Berechnung stammen, vergleicht. Beim Überschreiten definierter Schranken für Abweichungen wird unmittelbar ein Alarm generiert und ein Operator kann Sofortmaßnahmen setzen. Derartige Selbstkontrollen garantieren einen reibungsfreien Betrieb und sichern die Qualität von APOS als ETRS89-Realisierung im Zentimeterbereich.

5.3 Near Realtime Monitoring

Als zweite Stufe der Koordinatenüberwachung hat sich ein Verfahren als sehr gut geeignet herauskristallisiert, welches „Near Realtime Monitoring“ genannt wird. Auf Basis gespeicherter Stundendateien wird jede Stunde eine komplette Netzwerklösung, ähnlich jener der AMON Langzeitauswertung, durchgeführt und das Ergebnis wieder den Sollkoordinaten gegenübergestellt. Diese Methode hat zwei wesentliche Vorteile. Da das Ergebnis sehr rasch vorliegt, kann man im Fall von Veränderungen unmittelbar Maßnahmen setzen. Der Einsatz von zusätzlichen Softwareprodukten, welche von der Echtzeitssoftware (Vernetzungssoftware) unabhängig sind, schützt außerdem vor Softwarebugs. Typischerweise verwendet Postprocessingsoftware auch andere Auswertelgorithmen als Echtzeitssoftware, wodurch sich eine weitere Kontrollmöglichkeit ergibt. Das Near Realtime Monitoring von APOS befindet sich derzeit noch im Stadium eines Prototypen. Erste Ergebnisse zeigen aber bereits, dass ein Erkennen von Koordinatenänderungen

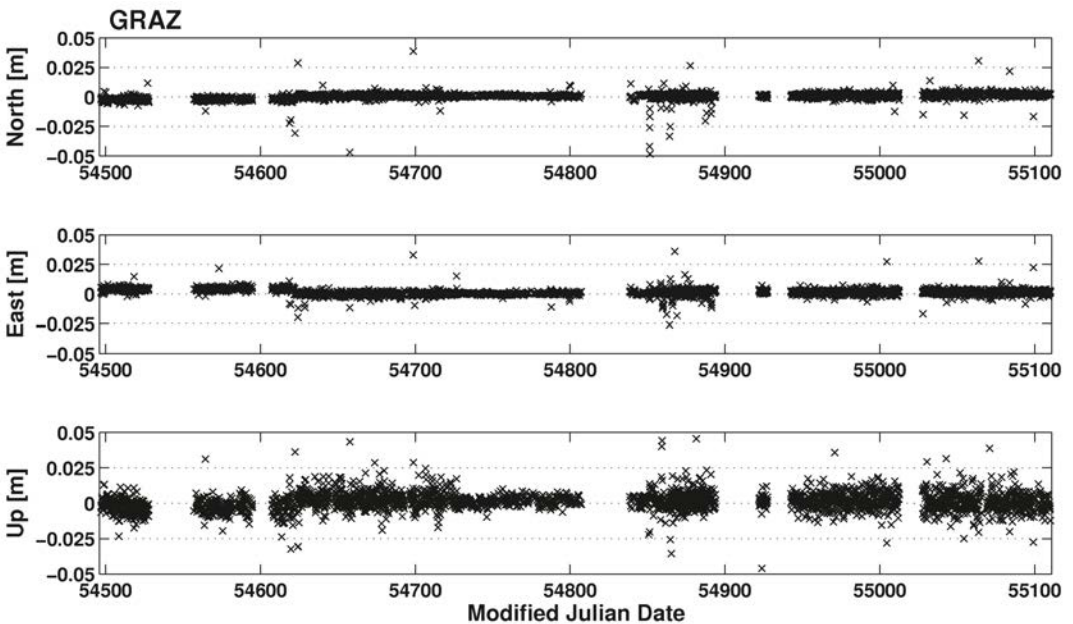


Abb. 5: Near Realtime Monitoring für GRAZ

der Permanentstationen zuverlässig möglich ist. Als problematisch erweisen sich jedoch abrupte Geometrieänderungen an der Permanentstation, wie sie durch das Hinzukommen neuer Satelliten oder das Wegfallen untergehender Satelliten auftreten (Abb. 5). Die dabei festgestellten, scheinbaren, sprunghaften Koordinatenänderungen führen bisweilen zu Fehlalarmen. Nachgeschaltete Filter würden diese Fehlalarme zwar abfangen, bergen aber die Gefahr, echte Koordinatenänderungen zu „verschmieren“ und die Reaktionszeiten zu verlängern. Hier ist ein Kompromiss und geschicktes Finetuning erforderlich, um einerseits Stationsprobleme rechtzeitig zu erkennen aber andererseits nicht zu viele Fehlalarme zu erhalten.

6. Nutzung von ETRS89 in INSPIRE

Mit dem Bundesgesetz über eine umweltrelevante Geodateninfrastruktur des Bundes (Geodateninfrastrukturgesetz – GeoDIG) vom 1. März 2010, wurde die Richtlinie 2007/2/EG zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE) in nationales Recht umgesetzt. Mit dem Aufbau von INSPIRE wird eine internationale Infrastruktur verfügbar gemacht, die auf Ebene aller 27 EU Mitgliedstaaten den Datenaustausch und die Datenbereitstellung für umweltrelevante Daten zum Ziel hat. Damit diese Datenbereitstellung auch entsprechend effizient verwirklicht werden kann, wurden von Seite der EU Vorgaben über die Nutzung einheitlicher Referenzsysteme gemacht. Als einheitliche europäische Bezugssysteme sind die von der EUREF Kommission definierten Referenzsysteme ETRS89 und EVRS (European Vertical Reference System) zu verwenden [18]. Ausnahmen gibt es nur für nicht auf der Eurasischen Platte befindliche Gebiete (z. B. Reunion im Indischen Ozean). Folgende Koordinatentypen und deren Kombination sind vorgesehen:

- 3-dimensional (3-D):
Räumliche kartesische Koordinaten in ETRS89, geografische Koordinaten in ETRS89 und GRS80 (Breite, Länge, ellipsoidische Höhe),
- 2-dimensional (2-D):
Geodätische (geografische) Koordinaten in ETRS89 und GRS80 (Breite, Länge), ebene Koordinaten (N, E oder Y, X) abgeleitet aus geografischen Koordinaten unter Verwendung einer Projektion,
- kombinierte Referenzsysteme (2-D und 1-D):
Höhen aus dem EVRS (physikalisch definierte Höhen) kombiniert mit geografischen oder ebenen Koordinaten.

Ob alle möglichen Kombinationen der oben angeführten Koordinatentypen genutzt werden, oder ob sich so genannte „Favoriten“ herausbilden werden, ist derzeit noch nicht klar.

7. Zusammenfassung

Der Aufbau des österreichischen 3-D Bezugsrahmens ETRF89 wurde in den 90-er Jahren des vorigen Jahrhunderts begonnen, und wird seinen Abschluss in einigen Jahren mit der Bereitstellung von ETRS89-Koordinaten für alle Festpunkte 5. und 6. Ordnung erreicht haben. Trotz dieses mehr als zwei Jahrzehnte dauernden Aufbaus wurde ein ausgezeichnetes Ergebnis dadurch erreicht, dass, wie in Kap. 3 beschrieben, streng hierarchisch bei den Berechnungsarbeiten vorgegangen wurde. Die vorhandenen Ergebnisse stellen einen österreichweit homogenen und für den internationalen Datenaustausch bestens geeigneten Bezugsrahmen dar, der allen technischen Anforderungen gerecht wird. Durch das permanente Monitoring von AMON ist auch sicher gestellt, dass auftretende Veränderungen erkannt und gegebenenfalls auch entsprechende Anpassungen einzelner Stationskoordinaten durchgeführt werden können.

Um das Potential, das in den bereits zwei Jahrzehnte umfassenden Messdaten enthalten ist, auch für die Untersuchung tektonischer Veränderungen nutzen zu können, gibt es derzeit international wie auch national Bestrebungen, ein so genanntes „reprocessing“ durchzuführen. D. h., alle vorhandenen Messdaten werden, soweit wie möglich, nach einheitlichen Standards ausgeglichen. Dieses „reprocessing“ wird auch wieder hierarchisch, von der obersten bis zur untersten Ebene durchgeführt werden (GPS-orbits → ITRF → ETRF → AMON → AGREF/AREF), und damit auch eine Basis für die wissenschaftliche Nutzung dieser Daten bieten.

Referenzen

- [1] http://itrf.eng.ign.fr/itrs_itrf.php.
- [2] Boucher, C. and Altamimi, Z.: The EUREF Terrestrial Reference System and its first realizations, EUREF Meeting, Bern, Switzerland March 4-6, 1992.
- [3] ftp://epncb.oma.be/epncb/general/Guidelines_for_EUREF_Densifications.pdf.
- [4] <ftp://epncb.oma.be/pub/station/coord/EPN/EUREF-DensificationITRF2005.pdf>.
- [5] Höggerl, N., Weber, R., Pesec, P., Stangl, G., Fragner, E.: Realisierung moderner 3-D Referenzsysteme für Wissenschaft und Praxis. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 90. Jg. 2002, Heft 3+4, Wien, ff 92-108, ISSN 0029-9650.

- [6] *Stangl, G., Weber, R., Höggerl, N., Fragner, E.*: EU-REF-Austria 2002, EUREF-Campaign for the introduction of ETRS89 in Austria, International Association of Geodesy / Section I – Positioning; Subcommission for Europe (EUREF), Publication No. 13, Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Toledo, 4 - 7 June 2003.
- [7] *Stangl, G., Hofmann-Wellenhof, B., Pesec, P., Sünkel, H.*: Austrian GPS Reference Network - Concept, Realization, and First Results. XX. IUGG General Assembly, Vienna Aug. 1991.
- [8] *Erker, E., Stangl, G., Pesec, P., Sünkel, H.*: The Austrian Geodynamic Reference Frame - Motivation and Results; IUGG General Assembly, Boulder, July 1995; Österr. Zeitschrift für Vermessung und Geoinformatik Jg. 84, Heft 3/96, pp. 293-298, 1996.
- [9] *Pesec, P., Erker, E., Sünkel, H., Imrek, E., Stangl, G.*: Das Österreichische Geodynamische Bezugssystem AGREF. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Graz 1997.
- [10] *Stangl G.*: AGREF – 7 Jahre Aufbau eines nationalen Referenzsystems. Kombination verschiedener GPS-Kampagnen zu einem österreichischen nationalen Referenzsystem am Beispiel AGREF. 46. DVW-Seminar „GPS-Praxis und -Trends '97“ 29.9.-1.10. 1997 Frankfurt/Main. DVW Schriftenreihe 35/1999 Stuttgart 1999, 274-280.
- [11] *Ahrer, H., Döllner, H.*: AREF-1 – Das GPS Grundnetz von Österreich als Basis der modernen telematischen Geodäsie. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 85. Jg. 1997, Heft 2, Wien, ISSN 0029-9650.
- [12] *Högerl, N., Titz, H., Zahn, E.*: APOS-Austrian Positioning Service. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 95. Jg. 2007, Heft 1, Wien, ff 10-23, ISSN 0029-9650.
- [13] *Haslinger, C., Krauss, S., Stangl, G.*: Changes in the OLG GPS time series due to new adjustment models, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 95. Jg. 2007, Heft 2, Wien, 59-65.
- [14] *Haslinger, C., Krauss, S., Stangl, G.*: The Intra-Plate Velocities of GPS Permanent Stations of the Eastern Alps, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 95. Jg. 2007, Heft 2, Wien, 66-72.
- [15] *Amtsblatt für Vermessungswesen-AVerm (2003); Herausgeber: BEV-Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Jg. 2003, Stück 4, 2788. Verlautbarung.*
- [16] *Boucher, C., Altamimi, Z., Sillard, P., Feissel-Vernier, M.*: The ITRF 2000. IERS Technical note No. 31, 2004, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie.
- [17] <http://gps.iwf.oeaw.ac.at/> ->GPS -> Reference Stations -> AMON Network.
- [18] http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_Specification_CRS_v3.0.pdf

Anschrift der Autoren

DI Helmut Titz, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien. E-Mail: helmut.titz@bev.gv.at

DI Norbert Höggerl, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien. E-Mail: norbert.hoeggerl@bev.gv.at

DI Erich Imrek, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien. E-mail: erich.imrek@bev.gv.at

DI Mag. Dr. phil. Günter Stangl, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, c/o Institut für Weltraumforschung, Schmiedlstraße 6, 8042 Graz. E-Mail: guenter.stangl@oeaw.ac.at