

111. Jahrgang Heft 2/2023

vgi
v
g
i

Österreichische Zeitschrift für
**Vermessung &
Geoinformation**

HxGN SmartNet

GPS
GLONASS
GALILEO
BEIDOU



HEXAGON
GEOSYSTEMS

www.hxgnsmartnet.com/de-at/

**Special Issue of the Austrian Geodetic Commission
on the Occasion of the**

**28th General Assembly of the IUGG –
the International Union of Geodesy and Geophysics**

Berlin, Germany 11 – 20 July 2023





Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation

Organ der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation
und der Österreichischen Geodätischen Kommission

111. Jahrgang 2023

Heft: 2/2023

ISSN: 1605-1653

Schriftleiter: Dipl.-Ing. Andreas Pammer

Stellvertreter: Dipl.-Ing. Ernst Zahn

Dipl.-Ing. (FH) Georg Topf

A-1020 Wien, Schiffamtsgasse 1-3

Internet: <http://www.ovg.at>

Special Issue of the Austrian Geodetic Commission on the Occasion of the

**28th General Assembly of the IUGG – the International Union of Geodesy
and Geophysics, Berlin, Germany 11 – 20 July 2023**

Preface / Vorwort	51
<i>S. Böhm:</i> Earth rotation is gradually slowing down – is it?	52
<i>P. Dumitraschkewitz, T. Mayer-Gürr, S. Strasser:</i> The TU Graz contribution to the International Terrestrial Reference Frame (ITRF 2020): Processing of 27 years of GNSS data	56
<i>N. Hanna, D. Halilovic, R. Weber:</i> NeQuick G model performance for single-frequency users	61
<i>M. Hiermanseder:</i> Internationale Grad- und Erdmessung im 19. Jahrhundert	67
<i>L. Kern:</i> Current status of VLBI Intensive sessions	88
<i>W. Lenhardt, M.-Th. Apoloner, H. Hausmann, A. Haberler:</i> Ferndetektion von Felsstürzen in den Ostalpen	93
<i>M. Sehnal, D. Angermann, L. Sánchez, B. Miyahara:</i> GGOS Contribution to Promote Geodesy and Increase its Visibility in Science and Society	100



Organ der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation und der Österreichischen Geodätischen Kommission

111. Jahrgang 2023 / ISSN: 1605-1653

Herausgeber und Medieninhaber: Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Austrian Society for Surveying and Geoinformation, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien zur Gänze. Bankverbindung: BAWAG P.S.K., IBAN: AT21 60000 00001190933, BIC: OPSKATWW. ZVR-Zahl 403011926.

Präsident der Gesellschaft: Dipl.-Ing. Franz Blauensteiner, Tel. +43 1 21110-822216, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien.

Sekretariat der Gesellschaft: Dipl.-Ing. Dr. Lothar Eysn, Tel. +43 1 21110-822711, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. E-Mail: office@ovg.at.

Schriftleitung: Dipl.-Ing. Andreas Pammer, Tel. +43 1 21110-825262, Dipl.-Ing. Ernst Zahn, Tel. +43 1 21110-823209, Dipl.-Ing.(FH) Georg Topf, Tel. +43 1 21110-823620, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. E-Mail: vgi@ovg.at.

Manuskripte: Bitte direkt an die Schriftleitung senden. Es wird dringend ersucht, alle Beiträge in digitaler Form zu übersenden. Genaue Angaben über die Form der Abfassung des Textteiles sowie der Abbildungen (Autoren-Richtlinien) können bei der Schriftleitung angefordert werden bzw. sind auf <http://www.ovg.at> unter „VGI Richtlinien“ zu ersehen. Beiträge können in Deutsch oder Englisch abgefasst sein; Hauptartikel bitte mit deutschem und englischem Titel, einer deutschsprachigen Kurzfassung und einem englischen Abstract sowie Schlüsselwörter bzw. Keywords einsenden. Auf Wunsch können Hauptartikel einem „Blind-Review“ unterzogen werden. Nach einer formalen Überprüfung durch die Schriftleitung wird der Artikel an ein Mitglied des Redaktionsbeirates weitergeleitet und von diesem an den/die Reviewer verteilt. Artikel, die einen Review-Prozess erfolgreich durchlaufen haben, werden als solche gesondert gekennzeichnet. Namentlich gezeichnete Beiträge geben die Meinung des Autors wieder, die sich nicht mit der des Herausgebers decken muss. Die Verantwortung für den Inhalt des einzelnen Artikels liegt daher beim Autor. Mit der Annahme des Manuskriptes sowie der Veröffentlichung geht das alleinige Recht der Vervielfältigung und Wiedergabe auf den Herausgeber über.

Redaktionsbeirat für Review: Univ.-Prof. Dr. Johannes Böhm, Dipl.-Ing. Julius Ernst, Univ.-Prof. Dr. Werner Lienhart, Univ.-Prof. Dr. Norbert Pfeifer, Prof. Dr. Josef Strobl, O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hans Sünkel und Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.iur. Christoph Twaroch

Copyright: Jede Vervielfältigung, Übersetzung, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen sowie Mikroverfilmung der Zeitschrift oder von in ihr enthaltenen Beiträgen ohne Zustimmung des Herausgebers ist unzulässig und strafbar. Einzelne Photokopien für den persönlichen Gebrauch dürfen nur von einzelnen Beiträgen oder Teilen davon angefertigt werden.

Anzeigenbearbeitung und -beratung: Dipl.-Ing. Andreas Pammer, Tel. +43 1 21110-825262, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. Unterlagen über Preise und technische Details werden auf Anfrage gerne zugesendet.

Erscheinungsweise: Vierteljährlich in zwangloser Reihenfolge (1 Jahrgang = 4 Hefte). Auflage: 1000 Stück.

Abonnement: Nur jahrgangsweise möglich. Ein Abonnement gilt automatisch um ein Jahr verlängert, sofern nicht bis zum 1.12. des laufenden Jahres eine Kündigung erfolgt. Die Bearbeitung von Abonnementangelegenheiten erfolgt durch das Sekretariat. Adressänderungen sind an das Sekretariat zu richten.

Verkaufspreise: Einzelheft: Inland 20 €, Ausland 25 €; Abonnement: Inland 60 €, Ausland 75 €; alle Preise inklusive Mehrwertsteuer. OVG-Mitglieder erhalten die Zeitschrift kostenlos.

Satz und Druck: Buchdruckerei Ernst Becvar Ges.m.b.H., A-1150 Wien, Lichtgasse 10.

Offenlegung gem. § 25 Mediengesetz

Medieninhaber: Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Austrian Society for Surveying and Geoinformation, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien zur Gänze.

Aufgabe der Gesellschaft: gem. § 1 Abs. 1 der Statuten (gen. mit Bescheid der Bundespolizeidirektion Wien vom 26.11.2009): a) die Vertretung der fachlichen Belange der Vermessung und Geoinformation auf allen Gebieten der wissenschaftlichen Forschung und der praktischen Anwendung, b) die Vertretung aller Angehörigen des Berufsstandes, c) die Förderung der Zusammenarbeit zwischen den Kollegen der Wissenschaft, des öffentlichen Dienstes, der freien Berufe und der Wirtschaft, d) die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, e) die Herausgabe einer Zeitschrift mit dem Namen „Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation“ (VGI).

Erklärung über die grundlegende Richtung der Zeitschrift: Wahrnehmung und Vertretung der fachlichen Belange aller Bereiche der Vermessung und Geoinformation, der Photogrammetrie und Fernerkundung, sowie Information und Weiterbildung der Mitglieder der Gesellschaft hinsichtlich dieser Fachgebiete.



<http://www.ovg.at>



<http://www.oegk-geodesy.at>

Preface/Vorwort

Preface

The “Österreichische Geodätische Kommission” (ÖGK, Austrian Geodetic Commission), is a group of experts, covering the entire field of geodesy. Accordingly, the research within the ÖGK comprises all scales, from global to local. This is also reflected in the contributions of this special issue of the vgi, which is published on the occasion of the 28th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), held in Berlin, Germany. The articles in this issue of the journal “Vermessung und Geoinformation” focus on a global scale on Very Long Baseline Interferometry (VLBI), the International Terrestrial Reference Frame (ITRF), the Global Geodetic Observing System (GGOS), the modelling of the ionosphere and the rotation of the Earth. On a local scale the importance of rockfall detection is discussed. Furthermore, these current research results are complemented by a historical review of International Degree and Earth Measurement.

ÖGK would like to thank the Austrian Society of Surveying and Geoinformation for the publication of this volume of VGI and wishes all readers a large gain in information.

Vorwort

Die Österreichische Geodätische Kommission (ÖGK) ist eine Gruppe von Expert:innen auf allen Gebieten der Geodäsie. Demnach deckt die Forschung innerhalb der ÖGK sämtliche Größenskalen ab. Dies spiegelt sich auch in den Beiträgen in dieser speziellen Ausgabe der vgi wieder, welche anlässlich der 28. Generalversammlung der IUGG (Internationale Union für Geodäsie und Geophysik) in Berlin, erscheint. In dieser Ausgabe der „Vermessung und Geoinformation“ finden sich Beiträge im globalen Maßstab, unter anderem zur Very Long Baseline Interferometry (VLBI), dem International Terrestrial Reference Frame (ITRF), dem Global Geodetic Observing System (GGOS), zur Modellierung der Ionosphäre und der Erdrotation, aber auch Beiträge im lokalen Maßstab zur Detektion von Felsstürzen. Diese aktuellen Forschungsergebnisse werden durch einen historischen Rückblick auf die Internationale Grad- und Erdmessung ergänzt. Dem wissenschaftlichen Standard folgend, mit dem Ziel der internationalen Sichtbarkeit und Einbindung, sind die meisten Artikel in Englisch abgefasst. Alle Artikel haben eine deutschsprachige Zusammenfassung.

Die Österreichische Geodätische Kommission bedankt sich bei der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation für die Herausgabe dieses vgi-Bandes und wünscht allen Lesern viel Informationsgewinn bei der Lektüre der Beiträge.

Werner Lienhart

*President of the Austrian Geodetic Commission,
Graz University of Technology, Institute of Engineering Geodesy and Measurement Systems*



Earth rotation is gradually slowing down – is it?

Die Erdrotationsgeschwindigkeit nimmt stetig ab – oder doch nicht?

Sigrid Böhm, Wien

Abstract

It is an accepted fact that the speed of Earth rotation is decreasing. However, if we look at length of day time series based on the observations of modern space geodetic techniques, which cover only the last 50 years, we see an average decrease in length of day, equivalent to an acceleration of Earth rotation. This article emphasizes the importance of the time span when investigating trends. It explains why it is still valid that Earth rotation is gradually slowing down, although it has been speeding up in recent decades. Furthermore, we discuss the relations between length of day and universal time and the occurrence of leap seconds. We finally provide current results of very long baseline interferometry analyses. These show that the time determined by Earth rotation has gained 90 ms on atomic time from January 2022 to January 2023.

Keywords: Earth rotation, length of day, universal time

Kurzfassung

Es ist eine anerkannte Tatsache, dass die Geschwindigkeit der Erdrotation abnimmt. Betrachtet man jedoch Zeitreihen der Tageslänge, die auf den Beobachtungen moderner geodätischer Weltraumverfahren beruhen und nur die letzten 50 Jahre abdecken, so stellt man eine durchschnittliche Abnahme der Tageslänge fest, die einer Beschleunigung der Erdrotation entspricht. Dieser Artikel unterstreicht die Bedeutung der Zeitspanne bei der Untersuchung von Trends. Er erklärt, warum die Annahme, dass sich die Erdrotation allmählich verlangsamt, nach wie vor gültig ist, obwohl wir in den letzten Jahrzehnten eine Beschleunigung sehen. Außerdem werden die Beziehungen zwischen Tageslänge und Weltzeit sowie das Auftreten von Schaltsekunden erörtert. Abschließend stellen wir neueste Ergebnisse von Analysen der Very Long Baseline Interferometry vor. Diese zeigen, dass die durch die Erdrotation bestimmte Zeit von Januar 2022 bis 2023 90 ms gegenüber der Atomzeit aufgeholt hat.

Keywords: Erdrotation, Tageslängenschwankungen, Weltzeit

1. Introduction

There is scientific consensus that the Earth's rotation rate is decreasing, implying an increase in the length of the solar day. A recent estimate of that deceleration, in terms of length of day (LOD), is a trend of +1.8 ms per century [1]. The estimate is based on records of ancient and medieval eclipses and of lunar occultations of stars, covering the period from 720 BCE to 2015 CE. The main driver of decelerating Earth rotation is tidal friction. However, the LOD rate predicted due to tidal friction amounts to +2.3 ms per century, leaving a difference of –0.5 ms per century, which claims a counteracting mechanism to tidal friction. The discrepancy can be explained by a secular trend in the polar moment of inertia caused by glacial isostatic adjustment and melting or relocation of polar ice sheets (see [2] and the references therein). So, if we consider time scales of two millennia and more, the answer to the question formulated in the title is yes, Earth rotation is gradually slowing down. If we look at shorter segments of one or two centuries or several decades only, the slope of a linear regres-

sion would be steeper, less steep, or even have a negative sign, depending on the selected period. The reason for the dependence is the presence of irregular fluctuations in LOD (as a measure of Earth rotation speed) in the range of two years to a few decades with peak-to-peak amplitudes of up to 7 ms. In the study of [1] there is also an indication of a 1500-year oscillation in the LOD, which is comparable in size to the decadal variations mentioned before. These decadal (and the assumed millennial) variations are commonly attributed to coupling mechanisms between the Earth's core and mantle. Since our knowledge about core-mantle interactions and processes in the Earth's interior is still limited, the time of occurrence and magnitudes of related fluctuations in Earth rotation remain elusive. Short-term periodic and seasonal LOD variations, caused by solid Earth and ocean tides and changes in the wind and pressure fields of the atmosphere, can be captured quite well. The large decadal fluctuations, however, represent a sizable uncertainty factor in predicting the Earth's rotation rate and phase (expressed as Universal Time, UT1).

The following section gives an impression of the variability of Earth's rotation rate, quantified as excess length of day ΔLOD (observed minus the nominal length of day), over the last two centuries. In section 3, the relation of LOD, UT1, and the introduction of leap seconds is discussed. Section 4 describes the monitoring of Earth rotation at the Vienna Center for VLBI (very long baseline interferometry) and presents some results on the recent catching up of universal time with atomic time.

2. Trends and long-term variations in the length of day from the 19th century to present

As pointed out in the introduction, the sign and magnitude of trends are matters of the observation period. This becomes apparent when we look at the available data. Figure 1 shows ΔLOD time series from two different data sets: the LUNAR97 series [3] spans from 1832.5-1997.5, it is sampled yearly, and it does not contain tidal and seasonal variations; the finals series [4], provided by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), covers the period from 1973 to May 2023, it is displayed as provided (at daily intervals) in green and cleaned from tidal and seasonal effects in dark green.

The LUNAR97 is a smoothed LOD series obtained from UT1 measurements taken by lunar occultation, optical astrometry, lunar laser ranging, and very long baseline interferometry (VLBI), which were combined in a Kalman filter [3]. The IERS finals are combined Earth orientation parameter series, including observations from lunar and satellite laser ranging, VLBI, and global navigation satellite systems.

When considering the whole, almost 200 years period, we receive a positive trend of 1.1 ms per century in length of day, which means we see a deceleration of Earth rotation, though less pronounced than over the last two millennia, as examined in [1]. If we cut out arbitrary slices of 30 to 50 years, we would observe a substantial variation in the slopes of the respective trendlines. For example, if we restrict the investigation to the 50 years covered by the IERS final series, the result is a trend of -5.1 ms per century. Earth rotation has been speeding up during the last decades. Starting in late 2020, several headlines claimed that the Earth would be suddenly spinning faster. Figure 1 shows, that is not true because it is not a recent phenomenon but a persistent trend that started 50 years ago. The public became aware of the days getting shorter because the ΔLOD values started to cross the zero line more often in

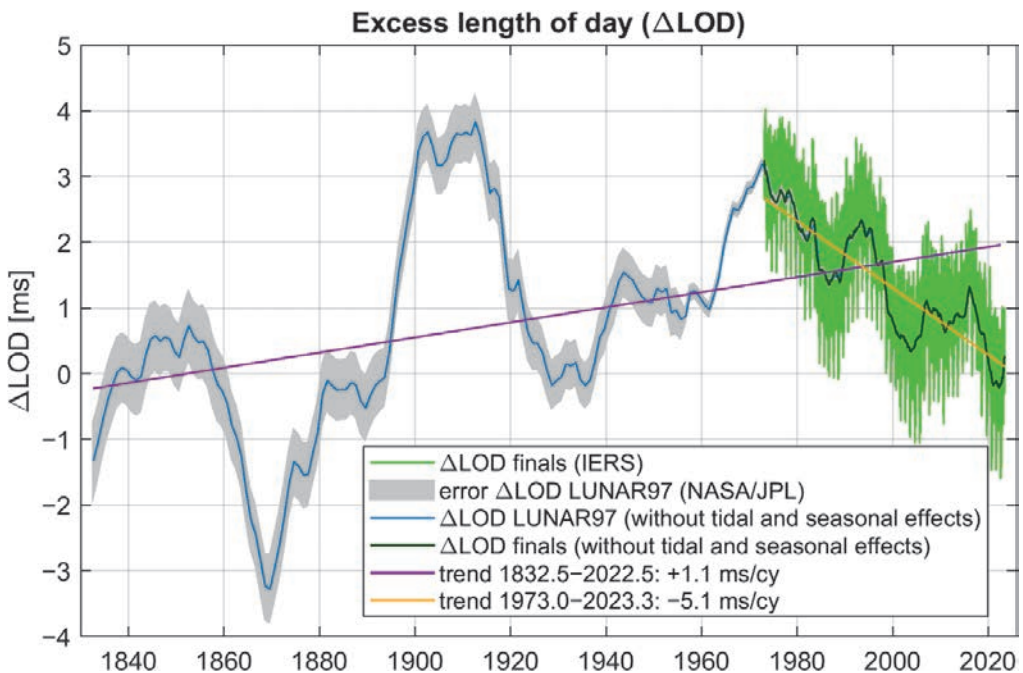


Fig. 1: Length of day time series and trends from 1832.5 to 2023.

2020, and the length of day determined by Earth rotation is now very close to the nominal length of day of 86400 s. The average length of day in the year 2020 was 86399.9999965 s. This development also explains why it was not necessary to introduce a leap second in the last few years. The next section further elaborates the connection of LOD with UT1 and the leap second events.

3. LOD, UT1, and the frequency of leap second introduction

Universal time (UT1) is a measure of the phase angle of the terrestrial prime meridian. The quantity excess LOD (often termed LOD only) results from the negative time derivative of the difference UT1 minus atomic time (universal time coordinated, UTC). For centuries, the Earth's rotation about its axis was considered a reliable clock-pulse generator. Time was derived from astronomical observations, and pendulum clocks, and later quartz clocks were adjusted to that time. With the advent of atomic clocks, this practice was continued by setting TAI (the continuous international atomic time) and UTC in agreement with UT1 in 1958 [5]. Fractional adjustments of UTC to UT1 were used until 1972, when the system of leap seconds was established. Coincidentally, it was the year of a trend reversal in the Earth rotation rate. From about 1930, there had been a gradual increase in ΔLOD , culminating in a value of over

4 ms in April 1972. Figure 2 shows time series of ΔLOD and UT1-UTC for the last 50 years. Each discontinuity in the UT1-UTC time series marks a leap second event. A leap second is introduced whenever the IERS envisions that the absolute difference between UT1 and UTC would soon exceed 0.9 s.

Figure 2 shows that the size of the ΔLOD values correlates with the frequency of the leap second introduction. Ten out of the to-date 27 leap seconds had to be applied in the first ten years. From 1999 to 2006, we faced no leap second implementation at all because ΔLOD oscillated around an average close to zero. During the last three years, the average LOD was shorter than 86400 s, creating the unique pattern of UT1-UTC heading upwards. If this trend was to continue, we might see, for the first time, the introduction of a negative leap second. However, it is equiprobable that we have reached a turning point, and ΔLOD begins to increase again.

Every leap second event imposes major challenges to different areas of computing, such as high-frequency trading. We will not cover these in this article. However, it is important to note that the various issues arising from every leap second introduction triggered the discussion about the future of the leap seconds already two decades ago. In 2022, the General Conference on Weights and Measures finally adopted a resolution with

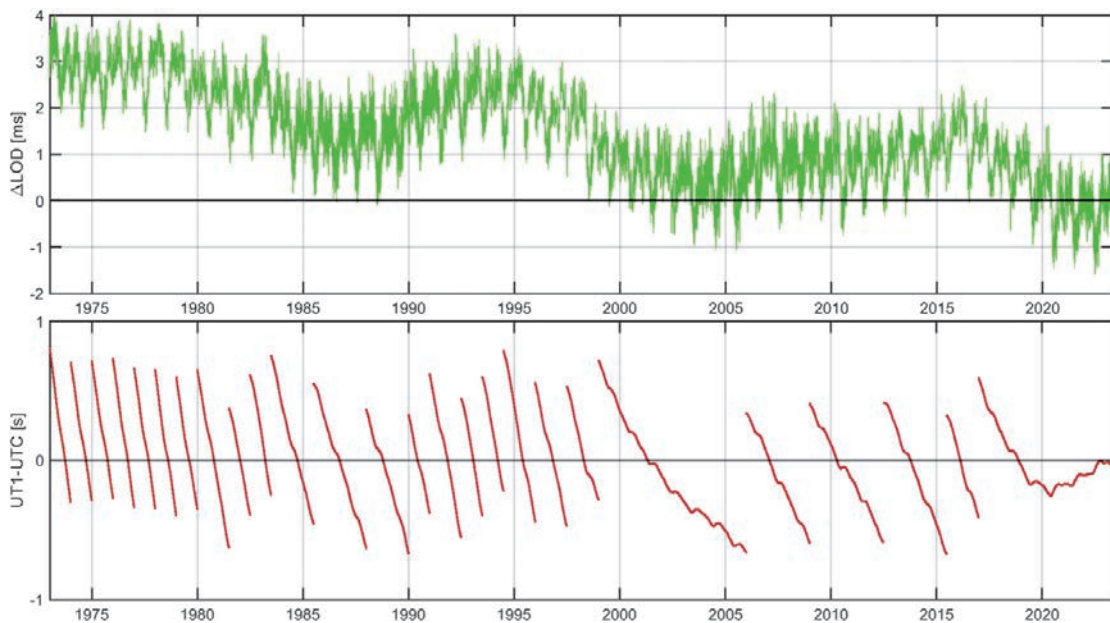


Fig. 2: Time series of ΔLOD (top) and UT1-UTC (bottom) for the period 1973 to May 2023 (IERS finals [4])

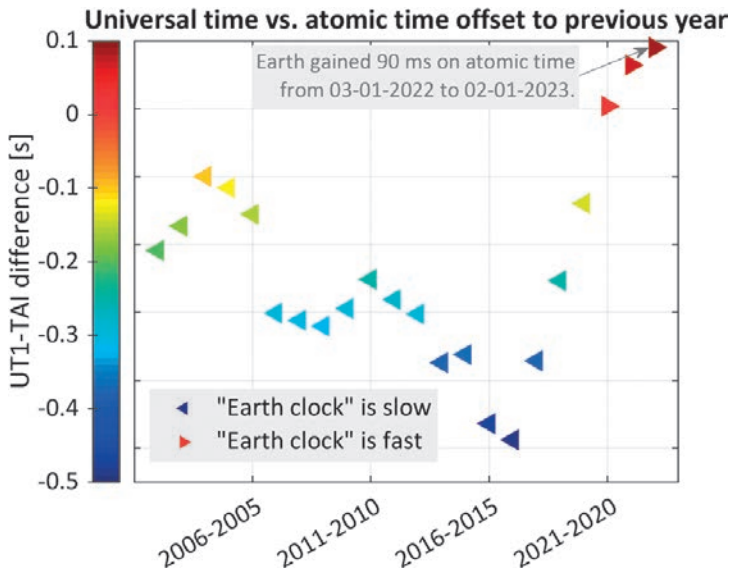


Fig. 3: Excess length of year derived from VLBI Intensive sessions

the decision: “that the maximum value for the difference (UT1-UTC) will be increased in, or before, 2035” [6]. The new maximum value has yet to be defined, but it should be, on all accounts, large enough to ensure the continuity of UTC for at least a century.

4. Earth rotation monitoring at the Vienna Center for VLBI

At the Vienna Center for VLBI, which is a joint effort by TU Wien and the Federal Office of Metrology and Surveying, we routinely analyze, among other things, all available 24-hour sessions and the so-called Intensive sessions (see the article by Lisa Kern, this issue). We monitor the Earth orientation parameters (celestial pole offsets, polar motion parameters, and UT1-UTC) and provide updates on our website (<https://www.vlbi.at/products/>) as soon as they are available.

In Figure 3, we display the results of a quick-look study, where we picked the UT1-TAI values resulting from the first INT1 session (one type of Intensive) of each year since 2001 and built the difference to the previous year. The plotted values, therefore, represent a kind of excess length of the year. The image shows that the time determined by Earth rotation has always lagged the atomic time, while 2020 was the first year for the „Earth clock“ to gain a few ms on atomic clocks. By January 2023, this had already risen to 90 ms.

At present, the upward trend of UT1-UTC is stagnating (see Figure 2), but at TU Wien, we keep a close watch on its latest evolution to catch the moment when UT1-UTC will pass the zero line from negative to positive without the aid of a leap second. Currently, the IERS finals [4] predict that incident for the end of July 2023, but it might not happen this year at all.

References

- [1] Stephenson F. R., Morrison L. V., Hohenkerk C. Y. (2016): Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proc. R. Soc. A* 472: 20160404. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2016.0404>
- [2] Gross R. S. (2007): Earth rotation variations - long period. In T.A. Herring, ed., *Geodesy*, Vol. 3 of *Treatise on Geophysics*, 239–294, Elsevier, Amsterdam.
- [3] Gross R. S. (2001): A combined length-of-day series spanning 1832–1997: LUNAR97, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 123, 65–76.
- [4] *IERS final series, extended (2023-05-08)*, IERS Rapid Service / Prediction Center, U.S. Naval Observatory, <https://maia.usno.navy.mil/ser7/finals2000A.daily.extended>.
- [5] Levine J., Tavella P., Milton M. (2022): Towards a consensus on a continuous coordinated universal time. *Metrologia*, 60: 014001. <https://dx.doi.org/10.1088/1681-7575/ac9da5>
- [6] *Resolution 4 of the 27th CGPM (2023-05-10)*: <https://www.bipm.org/en/cgpm-2022/resolution-4>.

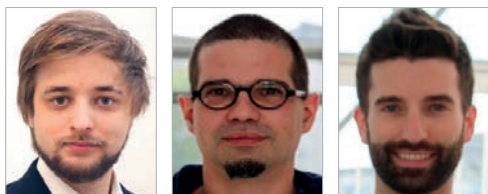
Contact

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr. Sigrid Böhm, TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation, Research Unit Higher Geodesy, Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1040 Wien, Austria.

E-Mail: sigrid.boehm@tuwien.ac.at

The TU Graz contribution to the International Terrestrial Reference Frame (ITRF 2020): Processing of 27 years of GNSS data

Der Beitrag der TU Graz zum Internationalen Terrestrischen Referenzrahmen (ITRF 2020): Prozessierung von 27 Jahren GNSS-Daten



Patrick Dumitraschkewitz, Torsten Mayer-Gürr and Sebastian Strasser, Graz

Abstract

A global geodetic reference frame (GGRF), such as the International Terrestrial Reference Frame (ITRF), is fundamental for quantifying geophysical changes in the Earth system. Global navigation satellite systems (GNSS) are one of the four space-geodetic techniques contributing to the construction of the ITRF. In support of the ITRF2020 release, the International GNSS Service (IGS) conducted its third reprocessing campaign (repro3), covering the years 1994 to 2020. Graz University of Technology (TUG) participated for the first time as an analysis centre in such a reprocessing campaign and TUG has been acknowledged globally for its high quality GNSS products. In this article we want to present the approach of TUG for the repro3 campaign as well as present research and analysis showing the high quality of the TUG products.

Keywords: global navigation satellite systems (GNSS), International Terrestrial Reference Frame 2020 (ITRF2020), raw observation approach

Kurzfassung

Ein globaler geodätischer Bezugsrahmen (GGRF), wie der Internationale Referenzrahmen (ITRF), ist von grundlegender Bedeutung für die Quantifizierung geophysikalischer Veränderungen im Erdsystem. Globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) sind eine der vier weltraumgeodätischen Techniken, die zum Aufbau des ITRF beitragen. Zur Unterstützung des ITRF2020 führte der Internationale GNSS-Dienst (IGS) seine dritte Reprocessing-Kampagne (repro3) durch, die die Jahre 1994 bis 2020 abdeckt. Die Technische Universität Graz (TUG) nahm zum ersten Mal als Analysezentrum an einer solchen Reprocessing-Kampagne teil und die TUG ist weltweit für ihre qualitativ hochwertigen GNSS-Produkte anerkannt worden. In diesem Artikel möchten wir den Ansatz der TUG für die repro3-Kampagne vorstellen sowie Untersuchungen und Analysen präsentieren, die die hohe Qualität der TUG-Produkte belegen.

Schlüsselwörter: globale Satellitennavigationssysteme (GNSS), Internationaler Terrestrischer Referenzrahmen 2020 (ITRF2020), Ansatz der rohen Beobachtung

1. Introduction

An accurate and stable global geodetic reference frame (GGRF), such as the International Reference Frame (ITRF), is fundamental for quantifying geophysical changes in the earth system. Such GGRF has been deemed important enough to be recognized by the United Nations General Assembly in 2015 passing the Resolution “A Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development”. Global navigation satellite systems (GNSS) are one of the four space-geodetic techniques contributing

to the construction of the ITRF. For the newly released ITRF2020, the international GNSS service (IGS) conducted its third reprocessing campaign (repro3), ranging from the years 1994 till 2020. Graz University of Technology (TUG) participated for the first time as a GNSS analysis centre (AC) in such a reprocessing campaign. The goal of repro3 is to create high quality GNSS products with the newest models and up to date processing strategies. The individual AC solutions are combined to one IGS solution which in term

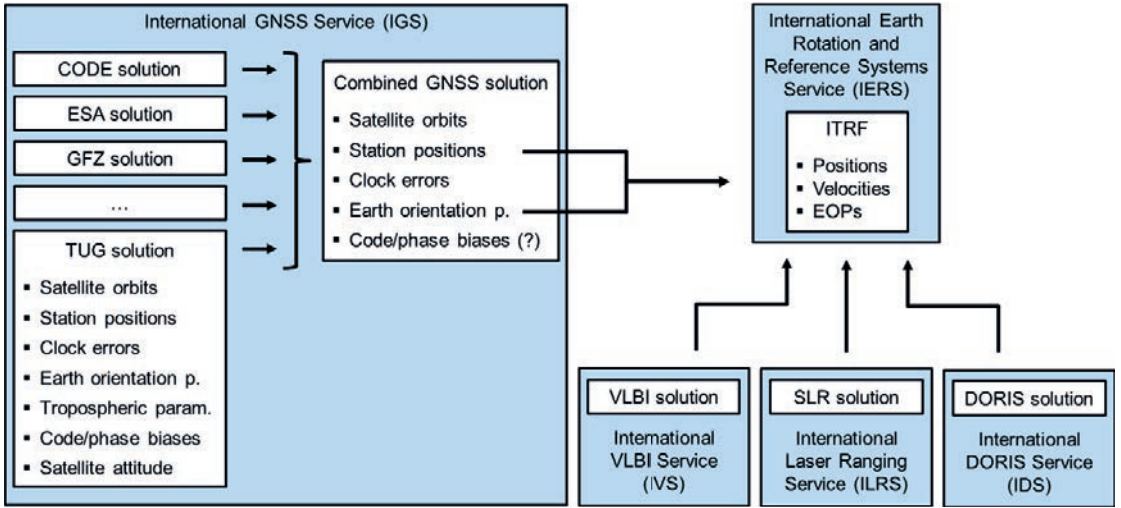


Fig. 1: Combination of the space geodetic techniques and their respective services which are used in creating the ITRF

is combined in the ITRF with the other space-geodetic techniques as shown in Figure 1. In the following sections we want to elaborate the processing strategy and the impact of the TUG contribution to the repro3 and ITRF2020.

2. Processing Strategy

TUG adapted the raw observation approach for GNSS and developed it further to be feasible for global GNSS station network processing (Strasser et al. 2019 [1]). The raw observation approach uses

all measurements as observed by the receivers without explicitly creating any linear combinations or differences. This approach allows for the full exploitation of the information contained within each individual observation type while also preserving the original measurement accuracy. This requires the observation equation to take every effect into account by a priori models or by adding more unknown parameters. The raw observation approach only gained popularity with increasing computational powers.

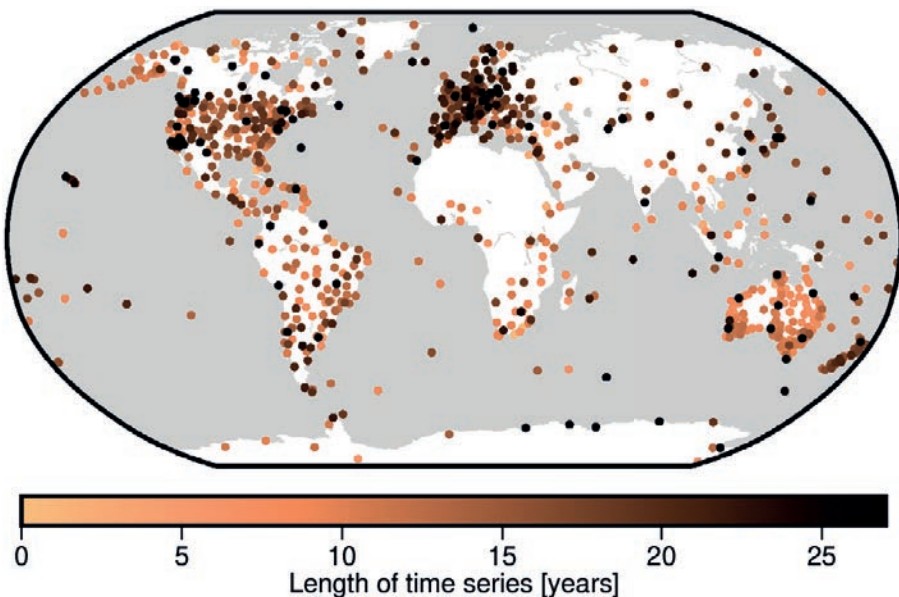


Fig. 2: Stations used in the reprocessing and their time series lengths (adapted from Rebischung, 2021)

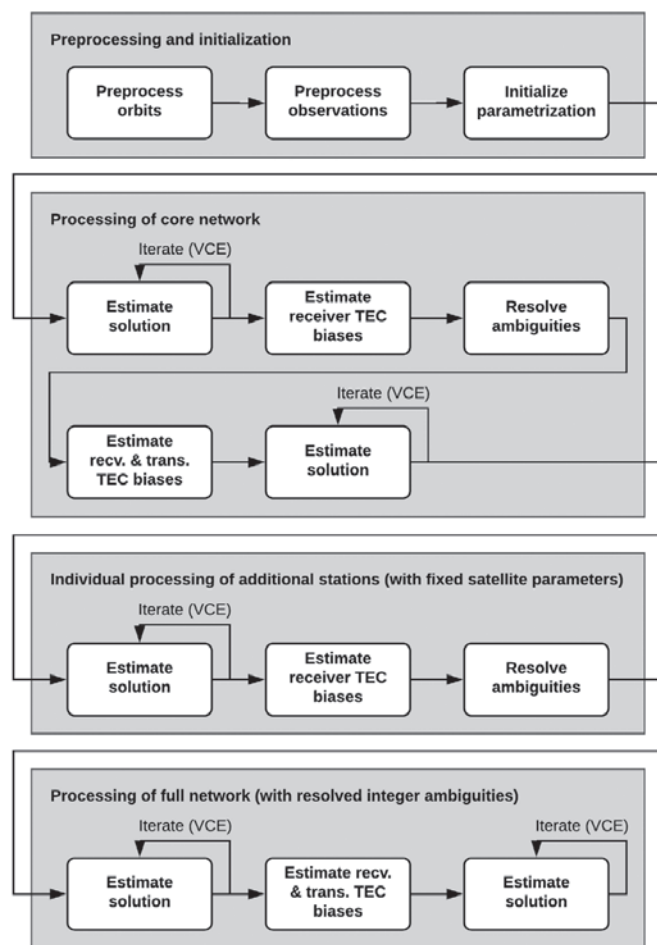


Fig. 3: Processing strategy at Graz University of Technology

The reprocessing campaign consisted of the GPS, GLONASS and Galileo GNSS as well as a total of 1182 ground stations as seen in Figure 2. In the latter timeframe of the campaign over 800 stations have been processed together with a sampling rate of 30 seconds leading to equation systems consisting of hundreds of millions of observations and millions of parameters each individually evaluated daily. Since the full computation of the stations and satellites is not feasible to be computed at once, the estimation is split into several processing steps to accommodate the huge set of observations and parameters. TUG approaches this problem for the raw observation approach in four overarching processing levels as shown in the flowchart Figure 3.

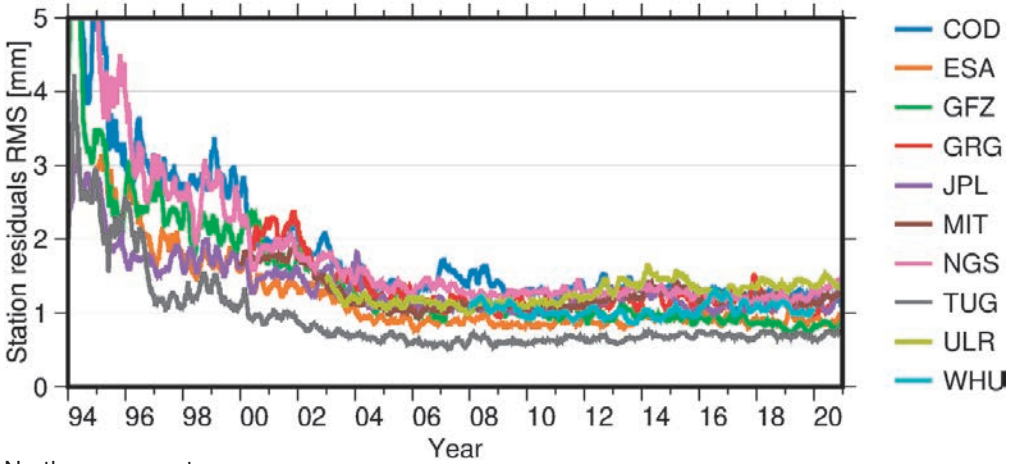
The first level consists of the pre-processing of the available data, quality checks and validations to eliminate rough outliers and errors in the data. In the second processing level a smaller station network consisting of 40-50 stations from the 1182 available stations are selected to fix the satellite

parameters as well as resolving the integer ambiguities of the reduced station network receivers. The third processing level consists of the integer ambiguity resolving of the individual stations not yet processed. For this the transmitter dependent parameters estimated in the second level are held fixed throughout the third level to solve the individual station receiver parameters as well as ambiguities. With all integer ambiguities resolved the last step consists of a full network processing with all receiver and transmitter parameters. The last processing level requires the most computational time and memory and overshadows the previous levels in terms of required processing power. The result of all four levels are high quality products such as station position time series, satellite orbits, receiver/transmitter clocks, code/phase biases, earth orientation parameters and many more. A more thorough detailed explanation of the processing strategy and raw observation approach can be found in Strasser (2022) [2].

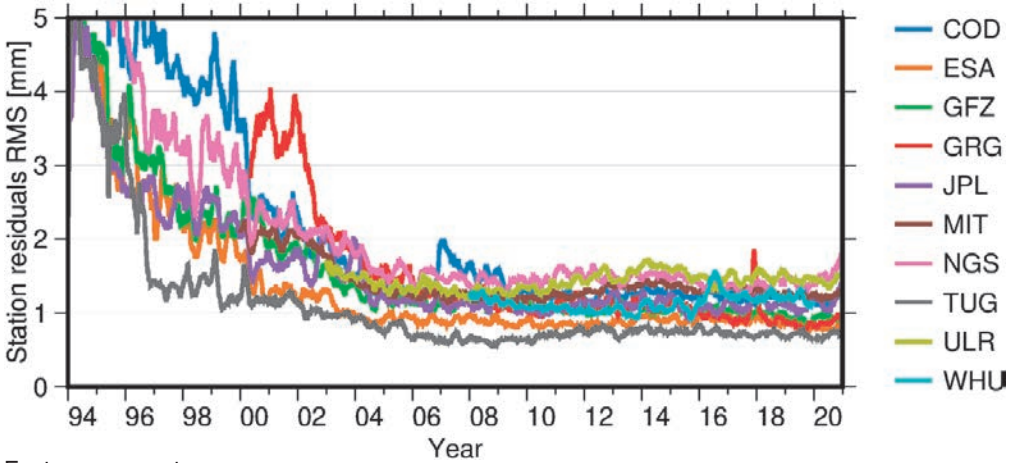
3. TUG product validation

The most important product of the reprocessing campaign is the station position time series. The evaluation between the AC is based on the residuals and formal errors from the IGS combined process and an in-depth analysis can be found in Rebeschung (2021) [3]. The conclusion from the analysis is that TUG products (Strasser et al 2021 [4]) are of high quality and is a front runner among all AC contributions. An example of this validation is seen in Figure 4 which shows the time series of 91-day median filtered station position residuals.

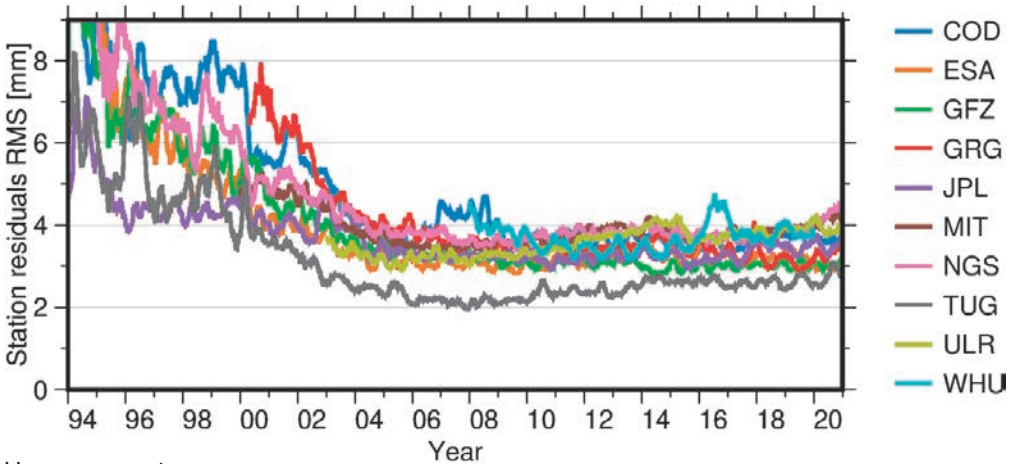
TUG provided the only solution in the sub millimetre RMS value in the horizontal and an up-component RMS below 3 mm. Table 1 shows the formal errors of the analysis centres contribution and TUGs solution are significantly smaller than those of other analysis centres which implies that it got the highest weight on average in the combined IGS solution.



North component



East component



Up component

Fig. 4: Smoothed (i.e., 91-day median filtered) station position residuals RMS of individual analysis center solutions with respect to the IGS combination. Note the different y-axis scale for the up component.

Analysis centre	Median residuals RMS [mm]			Median formal errors [mm]		
	North	East	Up	North	East	Up
COD	1.5	1.5	4.1	1.3	1.2	4.2
ESA	1.0	1.0	3.3	1.0	0.9	3.3
GFZ	1.1	1.2	3.4	1.0	1.0	3.6
GRG	1.2	1.2	3.6	1.1	0.9	3.3
JPL	1.2	1.3	3.5	1.2	1.1	3.6
MIT	1.2	1.3	3.8	1.2	1.2	3.7
NGS	1.4	1.6	4.1	1.3	1.1	3.9
TUG	0.7	0.8	2.7	0.7	0.7	2.5
ULR	1.3	1.4	3.6	1.2	1.2	3.6
WHU	1.0	1.1	3.6	1.0	1.0	3.3

Tab. 1: Median values of daily station position residuals RMS for individual analysis centre solutions with respect to the IGS combination and their median formal errors after optimal weighting

Also, Sakic et al (2022) [5] investigated the combination of the IGS repro3 orbit products by variance component estimation (VCE) and within his analysis it is shown that TUG accomplished the most stable and best RMS GPS orbit solutions with RMS around 6 mm. The TUG GLONASS solutions were on par with the other AC solutions and on the European Galileo constellation the TUG solution showed the same level of agreement to other prominent ACs with a similar RMS around 5 mm.

4. Summary and outlook

TUG contributed to the ITRF2020 as GNSS AC with high quality products on par with other more established AC. TUG even managed to surpass expectations and has been internationally recognized for the impact it had on the ITRF2020 contribution with its high-quality GNSS results. TUG is further developing its approach for global network processing with the raw observation approach. Current research focuses on a more sophisticated stochastic modelling (Dumitraschkewitz et al 2022 [6]) of the observations and receiver/transmitter clocks. Furthermore, another aspect that is currently in investigation is the improvement of the quality checks in the form of a more robust cycle slip detection (Dumitraschkewitz et al 2023 [7]) especially in low elevation based observations and much more. The software used in the repro3 campaign also known as “Gravity Recovery Object Oriented programming System” (GROOPS) has been made publicly available as open source on <https://github.com/groops-devs/groops> (Mayer-Gürr et al. 2021 [8]). Other key features of the software besides GNSS processing include gravity field recovery from satellite and terrestrial data.

References

- [1] Strasser, S., Mayer-Gürr, T., and Zehentner, N. (2019) Processing of GNSS constellations and ground station networks using the raw observation approach. *J Geod* 93, 1045–1057.
- [2] Strasser, S. (2022). Reprocessing Multiple GNSS Constellations and a Global Station Network from 1994 to 2020 with the Raw Observation Approach. [Dissertation, Technische Universität Graz (90000)]. Verlag der Technischen Universität Graz. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-885-1>
- [3] *Rebischung, P.*: Terrestrial frame solutions from the IGS third reprocessing, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-2144, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2144>, 2021.
- [4] Strasser, S. and Mayer-Gürr, T. (2021) IGS repro3 products by Graz University of Technology (TUG). Data set. Graz University of Technology. <https://doi.org/10.3217/dataset-4528-0723-0867>
- [5] Sakic, P., Mansur, G., Männel, B., Brack, A., Schuh, H. (2022). An Experimental Combination of IGS repro3 Campaign’s Orbit Products Using a Variance Component Estimation Strategy. In: International Association of Geodesy Symposia. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2022_158
- [6] Dumitraschkewitz, P., Mayer-Gürr, T., and Strasser, S.: Empirical stochastic modeling of observation noise in global GNSS network processing, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-2566, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-2566>, 2022.
- [7] Dumitraschkewitz, P., Mayer-Gürr, T., Suesser-Rechberger, B., and Öhlinger, F.: Exploitation of post-fit residuals in global GNSS network processing, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-5582, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-5582>, 2023.
- [8] Mayer-Gürr, T., Behzadpour, S., Eicker, A., Ellmer, M., Koch, B., Krauss, S., Pock, C., Rieser, D., Strasser, S., Suesser-Rechberger, B., Zehentner, N., Kvas, A. (2021). GROOPS: A software toolkit for gravity field recovery and GNSS processing. *Computers & Geosciences*, 104864. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104864>

Contacts

Dipl. Ing. Patrick Dumitraschkewitz, Graz University of Technology, Institute of Geodesy, Working Group Theoretical Geodesy and Satellite Geodesy, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz, Austria.

E-Mail: patrick.dumitraschkewitz@tugraz.at

Univ.-Prof. Dr.-Ing Torsten Mayer-Gürr, Graz University of Technology, Institute of Geodesy, Working Group Theoretical Geodesy and Satellite Geodesy, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz, Austria.

E-Mail: mayer-guerr@tugraz.at

Dipl. Ing. Dr.techn. Sebastian Strasser, Graz University of Technology, Institute of Geodesy, Working Group Theoretical Geodesy and Satellite Geodesy, Steyrergasse 30/III, 8010 Graz, Austria.

E-Mail: sebastian.strasser@tugraz.at

NeQuick G model performance for single-frequency users



Leistung des NeQuick G-Modells für Single-Frequency-Benutzer

Natalia Hanna, Dzana Halilovic and Robert Weber, Wien

Abstract

The 3.5 years (2019/01-2022/06) evaluation of the NeQuick G model performance provided valuable insight into its accuracy and capability to model the ionosphere for single-frequency (SF) users during different ionospheric activity levels. In this study, the Vertical Total Electron Content (VTEC) accuracy, along with the horizontal and vertical position errors introduced by model deficiencies are investigated. In terms of Total Electron Content (TEC) accuracy and SF position accuracy, the NeQuick G model outperforms the Klobuchar model; therefore, the NeQuick G model might be more effective for mitigating the effects of ionospheric disturbances on SF Global Navigation Satellite Systems (GNSS) signals. In consequence, the TEC accuracy offered by the NeQuick G model can result in a more accurate positioning.

Keywords: Ionosphere, NeQuick G, Klobuchar

Kurzfassung

Die 3,5-jährige Evaluierung (2019/01-2022/06) der Qualität des NeQuick G-Modells lieferte wertvolle Einblicke in seine Genauigkeit und Fähigkeit, die Ionosphäre für Single-Frequency-Benutzer (SF) während verschiedener ionosphärischer Aktivitätsniveaus zu modellieren. In dieser Studie wird die Genauigkeit des modellierten vertikalen Total Electron Content (VTEC) sowie die durch Modellfehler verursachten horizontalen und vertikalen Positionsfehler untersucht. In Bezug auf die Genauigkeit des Total Electron Contents (TEC) und die SF-Positionsgenauigkeit übertrifft das NeQuick G-Modell das Klobuchar-Modell; daher könnte das NeQuick G-Modell wirksamer sein, um die Auswirkungen ionosphärischer Störungen auf die Signale des SF Global Navigation Satellite Systems (GNSS) abzuschwächen. Infolgedessen kann die TEC-Genauigkeit des NeQuick G-Modells zu einer genaueren Positionierung führen.

Schlüsselwörter: Ionosphäre, NeQuick G, Klobuchar

1. Introduction

The ionosphere is a part of the Earth's atmosphere, located between 50 km and 1000 km above the Earth's surface. The maximum electron density prevails in the layer between 250 km and 400 km. Due to its dispersive nature for microwaves, the ionosphere alters the propagation of radio signals, leading to measurement errors. This effect can be successfully mitigated by utilizing multi-frequency receivers, while single-frequency receivers must rely on a correction model. Hence, the performance of ionospheric models employed by existing Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is a crucial factor in positioning. Neglecting changes in the ionosphere Total Electron Content (TEC) can introduce tens of meters of error in the position calculations.

The extensive recording of solar sunspot activity began in 1755. Currently, Solar Cycle 25 is active, which started in December 2019 with a

minimum sunspot number of 1.8. It is expected to continue until about 2030. The NOAA/NASA co-chaired, international panel to forecast Solar Cycle 25, predicted in December 2019 that Cycle 25 will be average in intensity and similar to Cycle 24, with a peak in July 2025 (+/- 8 months), with a smoothed sunspot number (SSN) of 115 (NOAA, 2019). Additionally, the panel concurred that a solar minimum would occur in April 2020 (+/- 6 months). However, the observations from 2020 to 2022 (the first three years of the cycle) proved that Solar Cycle 25 intensified more rapidly than initially forecasted, significantly exceeding predicted values and having the potential for an exceptionally strong solar maximum. As a result, we can expect more frequent disturbances for GNSS positioning on particular days and locations.

This work investigates the patterns of TEC fluctuations over distinct zones, with a main focus on the European region, from 2019/01 to 2022/06.

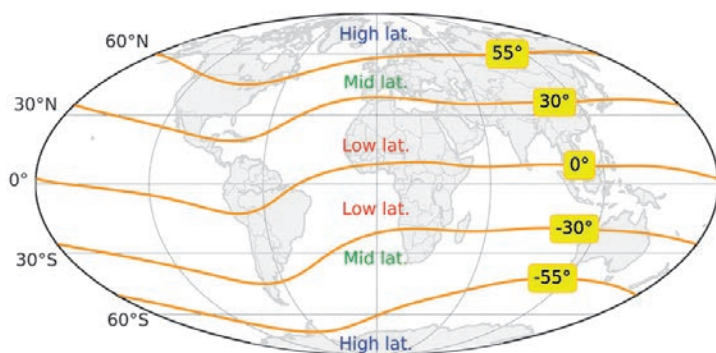


Fig. 1: Magnetic latitudes. Ionospheric activity is most intense at low latitudes (up to 100 days per year). At poleward latitudes, it is less frequent and it is least frequent at mid-latitudes, a few to ten days per year

Moreover, the Position, Velocity, and Time (PVT) accuracy is estimated. The study was performed as a response to an European Union Agency for the Space Programme / European GNSS Agency (EUSPA/GSA) call in the frame of the Galileo Reference Centre – Member States (GRC-MS) consortium, work package 3.4: NeQuick G model performance, as a collaborative work between TU Wien, Austria (TUW; mid-latitudes), and the Norwegian Mapping Authority, Norway (NMA; high- and low-latitudes).

1.1 Ionospheric activity

The ionosphere is constantly changing. The main components related to the variable ionospheric activity levels are the periodical solar activity cycles, Earth's orbit inclination (annual impact; increased ionospheric activity is observed at the spring and autumn equinoxes), Earth's rotation (daily impact; maximum ionospheric effects after local sunset until midnight), and interaction with the Earth's magnetic field. Additionally, the ionospheric activity is correlated with

- 1) Increased sunspot activity, which is linked to the 11-year solar cycle;
- 2) Solar storms, flares, and coronal mass ejections (CME); and
- 3) Location - the highest ionospheric activity is seen +/- 20 degrees around the geomagnetic equator and, less severely, in auroral (polar) regions (Figure 1).

To measure solar particle radiation by its magnetic effects, Julius Bartels introduced in 1949 the geomagnetic three-hourly Kp index (see Bartels, 1957). Today Kp is an

important measure for the energy input from the solar wind to Earth, and it is used by weather services in near-real time. Kp goes back to 1932 and is an important parameter to investigate long-term climate change in the upper atmosphere, in the geospace, and in the solar wind. The Kp parameter is based on the data from 13 geomagnetic observatories around the globe. As observed by GFZ German Research Centre for Geosciences, in the 3.5 years study period, there were six geomagnetic storms (Kp-index > 6, Figure 2):

- May 14, 2019 (Kp-index 6.3)
- May 12, 2021 (Kp-index 7.0)
- October 12, 2021 (Kp-index 6.3)
- November 3-4, 2021 (Kp-index 7.7)
- March 13, 2022 (Kp-index 6.3)
- April 10, 2022 (Kp-index 6.7)

Interestingly, years with the most intense geomagnetic storms are not necessarily observed in a solar maximum.

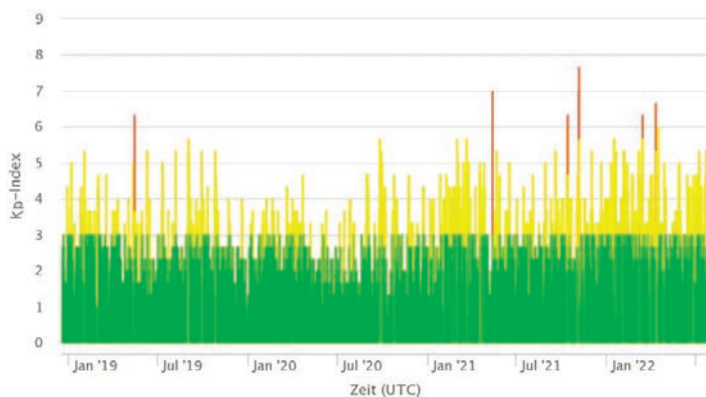


Fig. 2: Kp-index values in years between 1 January 2019 and 30 June 2022, as provided by GFZ German Research Centre for Geosciences (CC BY 4.0)

1.2 Ionospheric models

The propagation of radio waves is affected by the ionosphere, changing the signal path and velocity. Therefore, satellite navigation systems use ionospheric models to calculate and remove part of the ranging error caused by the ionosphere when single-frequency receivers are used. The Klobuchar model is an empirical model developed for single-frequency users. Approximately 50 % of the range error caused by ionospheric refraction can be corrected by applying the Klobuchar model. Its algorithm uses eight ionospheric coefficients, which can be found within the GPS navigation message (Klobuchar, 1987). The NeQuick G model is a three-dimensional and time-dependent ionospheric electron density model adapted to provide real-time Galileo single-frequency ionospheric corrections. These real-time predictions are based on solar-activity-related input values: sunspot number or solar flux, month, geographic latitude and longitude, height, and Universal Time (UT). NeQuick G is designed to achieve a correction capacity of at least 70 % of the ionospheric code delay across all locations, times of day, seasons, and levels of solar activity. However, it may be inefficient during significant ionospheric disruption (e.g., geomagnetic storms) (European Commission, 2016).

2. Methodology

The NeQuick G and Klobuchar models are evaluated in post-processing mode, using the validation station networks located in three geomagnetic-latitude regions (Figure 3). The total number of electrons present along a path between a radio transmitter and receiver is expressed as the Total Electron Content (TEC). To investigate the accuracy of the modeling, we present results of the Vertical Total Electron Content (VTEC), which is the vertically integrated electron density at a given location at a particular time. For ground-to-satellite communication and satellite navigation, TEC is a good parameter to monitor possible space weather impacts.

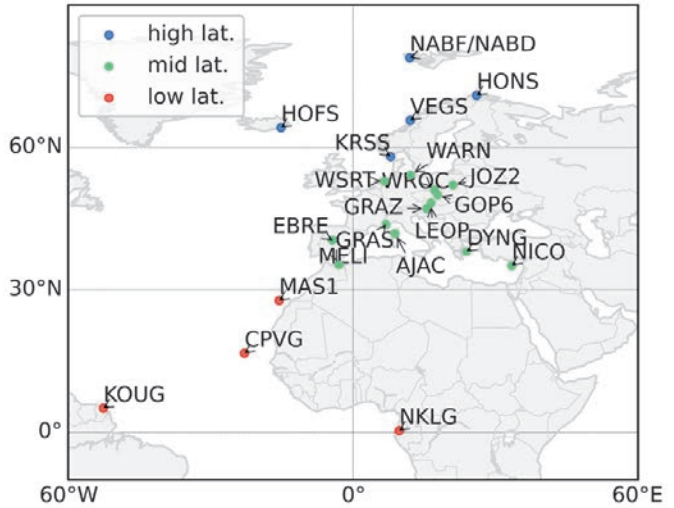


Fig. 3: Station validation map

2.1 VTEC accuracy

The VTEC accuracy, performed for the Galileo and the GPS constellations, is obtained following the three steps:

- 1) Computation of VTEC (every 5 min) using the navigation models (NeQuick G for Galileo and Klobuchar for GPS), for the set of satellites observed by the GNSS reference stations (Figure 3), using the actual observation geometry (receiver and satellite positions);
- 2) For the same set of points, the reference VTEC is computed. For NMA, the observed VTEC values are calculated every 5 min based on dual-frequency measurements from the GNSS reference stations (Figure 3). For the high-latitude stations, differential code biases (DCBs) are retrieved from the NMA's ionosphere monitoring system as the receivers used here are part of the much larger network processed by that system. For the low-latitude stations, DCBs are retrieved from the International GNSS Service (IGS) archives. For the mid-latitude stations, DCBs are obtained by a least squares adjustment based on P1 and P2 code observations, as well as satellite DCBs downloaded from the Astronomical Institute of the University of Bern (AIUB) CODE database. The standard Single Layer Model (SLM) is used to convert slant TEC to vertical TEC (ionosphere altitude 350 km);
- 3) The VTEC error is calculated as a difference between the model-derived VTEC values and the reference VTEC values obtained through the observations.

	High- and low latitudes (NMA)	Mid latitudes (TUV)
Software	Where (Kirkwik et al., 2017)	raPPPid ¹ (Glaner, 2022)
Sampling rate	30 s	30 s
Elevation cutoff mask	5 deg	5 deg
Troposphere delay	GPT2w (Böhm et al., 2015)	VMF3 (Landskron and Böhm, 2018)
Solid Earth tides	applied	applied
Elev.-dep. weighting	1/sin(elev.)	1/sin ² (elev.)
Estimation	epoch-wise least square	Kalman filter
Estimated parameter	coordinates, receiver clock	coordinates, receiver clock, zenith wet delay
PDOP threshold	6	N/A

1) TUV open-source software: <https://github.com/TUV-VieVS/raPPPid>, <https://viewswiki.geo.tuwien.ac.at/raPPPid>

Tab. 1: Settings applied in each latitude region to calculate SF position accuracy

2.2 SF position accuracy

The position accuracy achieved by processing single-frequency (SF) observations along with respective ionospheric delay models was evaluated according to the following three steps:

- 1) The Galileo E1 SF solutions are calculated in post-processing mode based on 30s RINEX files, whereby the applied settings are shown in Table 1;
- 2) The reference site positions are based either on the official International Terrestrial Reference Frame 2014 (ITRF2014) SINEX file station position and velocity solution (epoch 1st January 2010), extrapolated to the selected epoch from the analyzed quarter of observation (TUV) or yearly calculated ITRF2014 coordinates, referred to an epoch on 1st January of each year (NMA);
- 3) Coordinates obtained from the two SF solutions (either for Klobuchar or NeQuick G) are directly compared epoch-wise in a local topocentric coordinate system (East, North, Up) to the reference values in ITRF2014. Then, the daily single-frequency positioning errors were calculated as a mean of the 95th percentile (HPE95 and VPE95) for the reference stations. Hereby, epochs exceeding the Position Dilution of Precision (PDOP) threshold are excluded.

3. Results

3.1 VTEC maps

As follows from the Kp index values (Figure 2), in the 3.5 years of the study period the latest geomagnetic storm was observed on April 10, 2022. Therefore, to evaluate the NeQuick G and Klobuchar model performance in disruptive conditions, the VTEC maps for April 2022 are presented in Figure 4. The VTEC maps of the mid-latitude region (Europe) are based on a comparison of the NeQuick G and Klobuchar model w.r.t. the CODG global ionospheric maps. The reference global VTEC model CODG (Schaer et al., 1996) is generated daily by the Centre for Orbit Determination in Europe (CODE), University of Bern, Switzerland.

The plots display the 95th percentile of the absolute VTEC differences (mean value of all days in April 2022), distributed over 12 2-hourly subplots. The absolute VTEC differences are expressed in Total Electron Content Units (TECU; 1 TECU = 10¹⁶ electrons/m²). In Earth's ionosphere, TEC values can range from a few to several hundred TECUs.

In the time of increased ionospheric activity, the performance of both NeQuick G and Klobuchar models is poor (VTEC differences over 10 TECU), depending on the time and location. For NeQuick G, the largest discrepancies start at 00 UTC in the South (below 45 deg latitude) and evolve to the entire region over time. The underperformance of

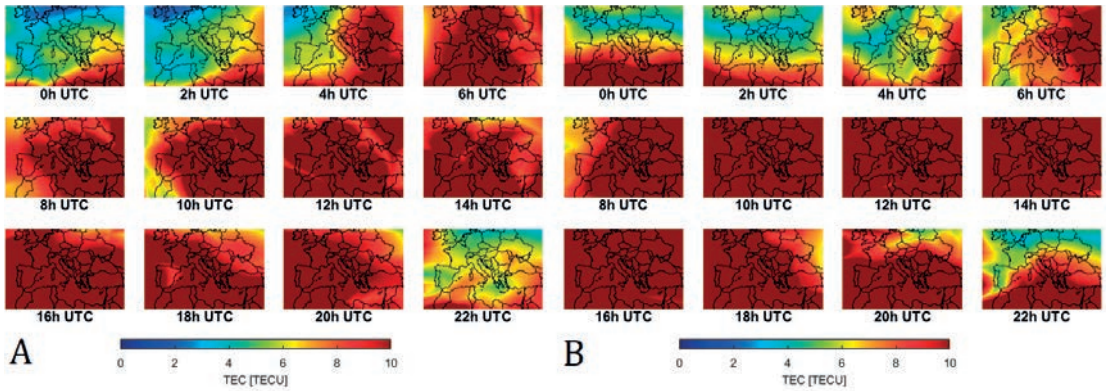


Fig. 4: 95th percentile of absolute VTEC differences for the NeQuick G (panel A) and Klobuchar (panel B) w.r.t. CODG model in April 2022

the Klobuchar model is more pronounced, with large VTEC differences (over 10 TECU) between 10-16 UTC in the whole region. However, in times of moderate ionospheric activity (not shown), VTEC differences for the NeQuick G are most visible in the far South, reaching around 8 TECU at particular hours of the day only, whereas for the Klobuchar high VTEC differences cover the whole region for most of the day. The long-term evaluation of the VTEC trends in various ionospheric conditions is presented in Figure 5.

3.2 VTEC error

Through the 3.5 years of investigations, the latitude zone-dependant monthly mean VTEC error for the NeQuick G and Klobuchar models was calculated (Figure 5). Besides, the average VTEC error values together with the standard deviations for both tested models are presented.

Overall, the NeQuick G model outperforms the Klobuchar model (smaller average VTEC error values and their standard deviations). Due to increasing ionization levels and space weather activity as

the Solar Cycle 25 approaches its maximum, starting from 2022/04 (high/mid lat) and 2022/01 (low lat) larger VTEC discrepancies are observed.

3.3 Position error

As noted the ionosphere affects the propagation of electromagnetic waves, which can cause GNSS positioning problems or disturbances in connection with the GNSS satellites. To evaluate, if the applied ionospheric model has an impact on the estimated position for single-frequency users, the horizontal and vertical position errors were calculated (Figure 6).

The value of the horizontal position error depends mainly on the latitude region. For the high- and mid-latitudes, the horizontal position error (HPE95) is below 2 m, whereas for low latitudes the error

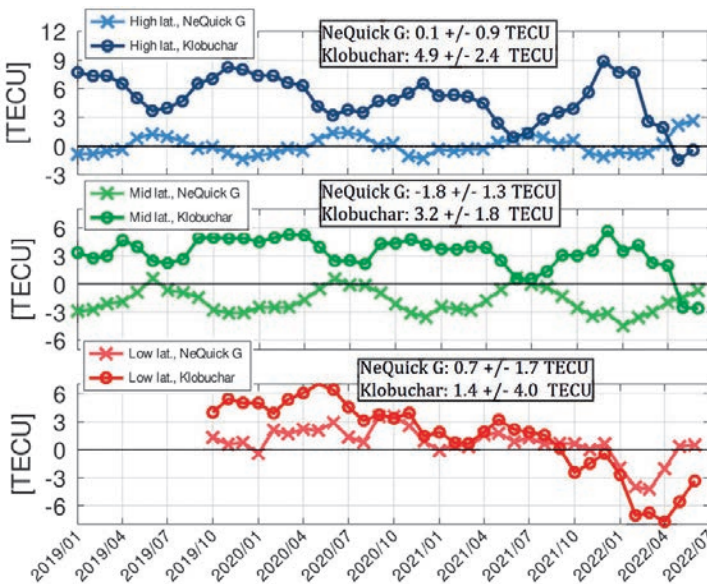


Fig. 5: Monthly means of the VTEC error for the NeQuick G and Klobuchar model (NMA/TUW results). The top panel shows results for high latitudes, the middle panel for middle latitudes, and the bottom panel for low latitudes.

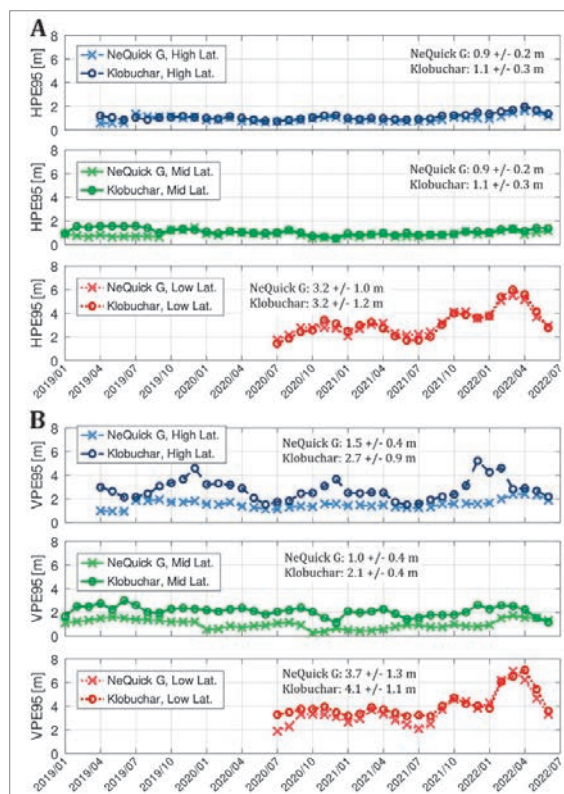


Fig. 6: Monthly mean horizontal position error (HPE95; panel A) and vertical position error (VPE95; panel B)

is up to 6 m, regardless of the applied ionospheric model. In terms of the vertical component, the NeQuick G model outperforms the Klobuchar. The largest VPE95 values (up to 8 m) are obtained for the low latitude region, reaching the maximum at the beginning of 2022.

4. Conclusions

Over a period of 3.5 years (2019/01-2020/06), the performance of the NeQuick G and Klobuchar model has been investigated. Although unstable ionospheric conditions are challenging for both, the NeQuick G and Klobuchar model, the NeQuick G provides a better performance in terms of VTEC representation (smaller average mean VTEC errors) as well as ionospheric delay correction of GNSS observations subsequently used in positioning with SF user sensors (smaller average mean HPE95/VPE95 errors) compared to Klobuchar. The lower latitudes are under the highest influence of ionospheric activity, which is reflected in both VTEC and position error results.

Acknowledgments

We acknowledge the European Union Agency for the Space Programme and the European GNSS Agency (EU-SPA/GSA) for supporting the cooperation of the Galileo Reference Center (GRC) with Member States within the GRC-MS project, and co-financed (Grant agreement nr. GSA/GRANT/04/2016), in support of independent monitoring of the Galileo system performance.

References

- [1] Bartels, J. (1957): The geomagnetic measures for the time-variations of solar corpuscular radiation, described for use in correlation studies in other geophysical fields. *Ann. Intern. Geophys.*, 4, 227-236.
- [2] Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., Pain, G., & Weber, R. (2015): Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS solutions*, 19, 433-441.
- [3] European Commission (2016): European GNSS (Galileo) Open Service – Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users.
- [4] Glaner, M. F. (2022): Towards instantaneous PPP convergence using multiple GNSS signals (Doctoral dissertation, Wien).
- [5] Kirkvik, A. S., Hjelle, G. A., Dahnn, M., Fausk, I., & Myssen, E. (2017, November): Where - a new software for geodetic analysis. In 23rd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting (Vol. 23, pp. 248-252).
- [6] Klobuchar, J. A. (1987): Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, (3), 325-331.
- [7] Landskron, D., & Böhm, J. (2018). *VMF3/GPT3*: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92, 349-360.
- [8] NOAA. (2019): Solar cycle 25 forecast update. *Solar Cycle 25 Forecast Update | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center*. <https://www.swpc.noaa.gov/news/solar-cycle-25-forecast-update>.
- [9] Schaer, S., Beutler, G., Mervart, L., Rothacher, M., & Wild, U. (1996): Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable. In *Proceedings of the IGS Workshop*.

Contacts

Mgr inz. Natalia Hanna, TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation, Research Unit Higher Geodesy, Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1040 Wien, Austria.
E-Mail: natalia.hanna@geo.tuwien.ac.at

Univ.-Ass.ⁱⁿ Dipl.inz Dzana Halilovic, TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation, Research Unit Higher Geodesy, Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1040 Wien, Austria.
E-Mail: dzana.halilovic@geo.tuwien.ac.at

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber, TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation, Research Unit Higher Geodesy, Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1040 Wien, Austria.
E-Mail: Robert.Weber@geo.tuwien.ac.at



Internationale Grad- und Erdmessung im 19. Jahrhundert

International degree and earth measurements in the 19th century

Michael Hiermaseder, Wien

Kurzfassung

Der Beitrag zeigt, in Fortsetzung des Artikels über die Gradmessungen aus dem 18. Jahrhundert (vgl. 4/2022, S 213 ff), Bedeutung und Ergebnisse von Meridiangradmessungen im 19. Jahrhundert. Eine Gradmessung entlang von Meridianen ist einfacher durchführbar, weil die astronomischen Arbeiten nur Breitenmessungen erfordern. Für genaue kontinentale Projekte sind allerdings auch Ost-West-Profile und Messungen der geografischen Längen notwendig – die global wegen der Notwendigkeit genauer Zeitbestimmungen erst durch funktechnische Zeitsignale und Präzisions-Chronometer möglich wurden. Zur internationalen Koordinierung der Projekte wurde 1862 auf deutsch-österreichische Initiative die Mitteleuropäische Gradmessungs-Kommission gegründet, die 1867 zur Europäischen Gradmessung erweitert wurde und der Vorläufer der internationalen geodätischen Union IAG (1919) sowie der heutigen geowissenschaftlichen Union IUGG ist.

Schlüsselwörter: Gradmessung, Erdellipsoid, Geschichte, Geodäsie, Astronomie

Abstract

The article shows, in continuation of the treatise on measurements of latitude from the 18th century (vgl. 4/2022, p 213 ff), the importance and results of meridian measurements in the 19th century. A degree measurement along meridians is easier to carry out because the astronomical work only requires latitude measurements. For precise continental projects, however, east-west profiles and measurements of geographical longitudes are also necessary – which only became possible globally, due to the necessity of precise determination of time, by radio time signals and precision chronometers. The Central European Degree Measurement Commission was founded in 1862 on a German-Austrian initiative for the international coordination of the projects. It was extended in 1867 to the European degree measurement which was the forerunner of the international geodetic union IAG (1919), as well as today's geoscientific union IUGG.

Keywords: Measurement of latitude, earth ellipsoid, history, geodesy, astronomy

1. Internationale Grad- und Erdmessung

Gradmessungen dienen seit dem 16. Jahrhundert zur Vermessung der Größe und Gestalt der Erde, des Erdellipsoids. Der Name leitet sich von der genauen Bestimmung der Distanz (110,6–111,7 km), die zwischen zwei um 1° verschiedenen Breitengraden liegt, ab. Zur Messung der Erdkrümmung zwischen weit entfernten Punkten wird deren Distanz mit dem Winkel zwischen ihren astronomisch bestimmten Lotrichtungen verglichen. Der Quotient ergibt den mittleren Krümmungsradius der Erde zwischen diesen Punkten. Bei zwei Standorten der Lotrichtungsmessung in Nord-Süd-Richtung entspricht der Winkel der Differenz ihrer geographischen Breite.

Als Meridianbogen wird eine nord-südlich verlaufende Messstrecke auf der Erdoberfläche oder ihr mathematisches Äquivalent auf dem Erdellipsoid bezeichnet. Die Messstrecke kann bei der „Methode der Gradmessung“ zur Bestimmung der mittleren Erdkrümmung und damit des Erdradius dienen. Dazu müssen auch die geografischen

Breiten der beiden Streckenendpunkte (ϕ_1 , ϕ_2) gemessen werden. Diese Breitenbestimmungen erfolgen astronomisch, indem die Höhenwinkel von Sternen beobachtet werden. Die Strecke wird nun auf Meeresniveau reduziert und ihre Länge mit dem Unterschied der geografischen Breiten verglichen. Hat der Meridianbogen die Länge B und die Breitendifferenz den Betrag $\beta = |\phi_1 - \phi_2|$, so ergibt sich der lokale Krümmungsradius mit $R = B/\beta$. Zusammen mit einem zweiten Meridianbogen kann daraus die Form des Erdellipsoids abgeleitet werden. Seit etwa 1900 werden in der Geodäsie statt der Meridianmethode ausgedehnte Vermessungsnetze verwendet.

Die ersten Meridianbögen der Wissenschaftsgeschichte dienten dem Nachweis der kugelförmigen Erdfigur und ihrer Größe. Als eine merkliche Abweichung von der Kugelform – also die ellipsoidische Erdfigur – zu vermuten war, folgten im 19. Jahrhundert mehrere bedeutende Gradmessungen, die wie in Tabelle 1 angeführt in diesem Beitrag besprochen werden.

Delambre, Méchain; Arago, Biot	1792-1798 1806-1808	9°	Dünkirchen – Paris – Barcelona – Mallorca
Gauß für Hannover	1821-1823	2°	Göttingen – Altona
Indien, Lambton, Everest	1802-1841	23°	Himalaya – Kap Komorin
Struve, Tenner	1816-1852	25°	Struve-Bogen: Hammerfest – Donaumündung
Europäische Gradmessung	1867		internationale Koordination
Großenhain – Kremsmünster – Pola	1880-1910		Sachsen-Adria

Tab. 1: Gradmessungen im 19. Jahrhundert



Abb. 1: Gedenktafel zur Europäischen Gradmessung 1867 auf dem Großen Feldberg im Taunus



Abb. 2: Gradmessungspfeiler Dreifaltigkeitsberg, einer der 35 Hauptpunkte des Rheinischen Dreiecksnetzes, Europäische Gradmessung 1875, Foto: Dietrich Krieger

Zur internationalen Koordinierung der genannten Großprojekte wird 1862 auf deutsch-österreichische Initiative die *Mitteeuropäische Gradmessungs-Kommission* gegründet. Langjähriger Leiter ist der preußische General Johann Jacob Baeyer. Sie wird 1867 zur Europäischen Gradmessung erweitert und ist Vorläufer der internationalen geodätischen Union IAG (1919) sowie der geowissenschaftlichen Union IUGG.

2. Referenz- und Erdellipsoide

In der Landesvermessung haben die einzelnen Staaten bis etwa 1850 ihr jeweils eigenes „geodätisches Datum“ (Bezugssystem) definiert. Mit der internationalen Verlängerung und Vernetzung der erwähnten Gradmessungs-Profile entwickelt sich die Möglichkeit den einzelnen Gebieten großräumiger gültige Daten zugrunde zu legen. So entsteht eine Reihe sogenannter Referenzellipsoide, die sich mit zunehmender Ausdehnung dem „mittleren Erdellipsoid“ annähern. Von den weltweit etwa 200 staatlichen Vermessungsnetzen basieren heute über 90% auf den Daten von einem Dutzend weiträumiger Ellipsoide, was die internationale Kooperation erleichtert. Die älteren dieser Ellipsoide beruhen auf den großen Meridianbögen des 19. Jahrhunderts, die neueren sind aus interkontinentalen und Satelliten-Netzen entstanden. Die wichtigsten dieser Ellipsoide sind in Tabelle 2 angeführt.

Für viele Staaten Mitteleuropas ist das Bessel-Ellipsoid maßgebend, ferner gibt es die Ellipsoide von John Fillmore Hayford und Krassowski und für GPS-Vermessungen das WGS 84. Die Pionierarbeit von Jean-Baptiste Joseph Delambre beruht nur auf lokalen Messungen. Der große Unterschied zwischen den Ellipsoiden von Everest (Asien) und Hayford (Amerika) entsteht hingegen durch die geologisch bedingte Geoid-Krümmung der beiden Kontinente.

Erdellipsoid	große Achse a (m)	kleine Achse b (m)	1/Abplattung f
G.B. Airy 1830	6.377.563,4	6.356.256,91	299,3249646
Everest 1830	6.377.276,345		300,8017
Bessel 1841	6.377.397,155	6.356.078,965	299,1528128
Clarke 1866	6.378.206,400		294,9786982
Clarke 1880/IGN	6.378.249,15		293,465 (466)

Tab. 2: Internationale Erdellipsoide

Mathematische Beschreibung

Ein Meridianbogen auf einem Rotationsellipsoid hat die genaue Form einer Ellipse. Daher lässt sich seine Länge *B* – gezählt vom Äquator – als elliptisches Integral berechnen und in Form einer Reihe nach Funktionen der geografischen Breite φ darstellen:

$$B = C_\varphi + D \sin 2\varphi + E \sin 4\varphi + F \sin 6\varphi + \dots \text{ usw.}$$

Der erste Koeffizient *C* hängt mit dem mittleren Erdradius zusammen und beträgt für das Bessel-Ellipsoid 111,120 km/Grad. Der zweite Koeffizient *D* hängt mit der Erdabplattung zusammen und beträgt 15,988 km. Die Werte für andere Ellipsoide unterscheiden sich ab der vierten Stelle.

Die Entwicklung mittels Exzentrizität e^2 gibt bereits Jean-Baptiste Joseph Delambre 1799:

$$\begin{aligned}
 B \approx a(1 - e^2) \left\{ \left(1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11025}{16384}e^8 \right) \varphi \right. \\
 - \frac{1}{2} \left(\frac{3}{4}e^2 + \frac{15}{16}e^4 + \frac{525}{512}e^6 + \frac{2205}{2048}e^8 \right) \sin 2\varphi \\
 + \frac{1}{4} \left(\frac{15}{64}e^4 + \frac{105}{256}e^6 + \frac{2205}{4096}e^8 \right) \sin 4\varphi \\
 - \frac{1}{6} \left(\frac{35}{512}e^6 + \frac{315}{2048}e^8 \right) \sin 6\varphi \\
 \left. + \frac{1}{8} \left(\frac{315}{16384}e^8 \right) \sin 8\varphi \right\}
 \end{aligned}$$

Friedrich Robert Helmert benutzte 1880:

$$n = \frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{1 + \sqrt{1 - e^2}} = \frac{e^2}{4}$$

$$\begin{aligned}
 B \approx \frac{a}{1+n} \left\{ \left(1 + \frac{n^2}{4} + \frac{n^4}{64} \right) \varphi \right. \\
 - \frac{3}{2} \left(n - \frac{n^3}{8} \right) \sin 2\varphi + \frac{15}{16} \left(n^2 - \frac{n^4}{4} \right) \sin 4\varphi \\
 \left. - \frac{35}{48} n^3 \sin 6\varphi + \frac{315}{512} n^4 \sin 8\varphi \right\}
 \end{aligned}$$

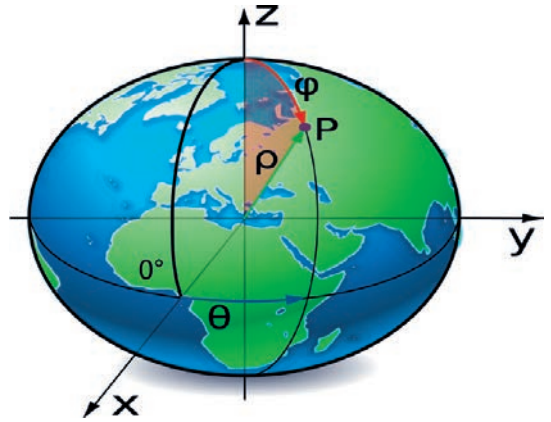


Abb. 3: Geodätisches Datum: Ellipsoid mit eindeutiger Orientierung zur Erde (https://de.wikipedia.org/wiki/Geodätisches_Datum)

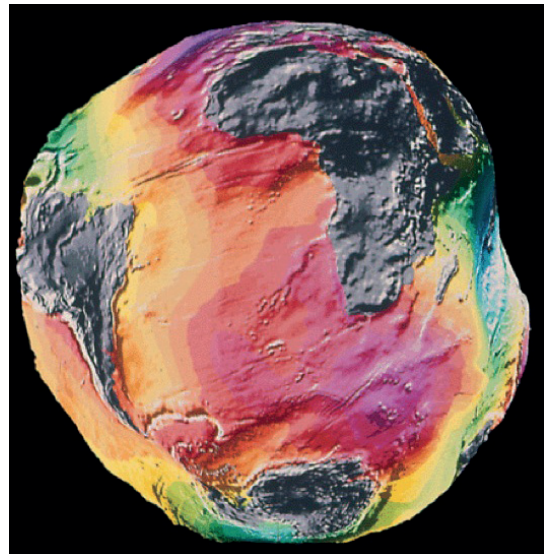


Abb. 4: Geoid, Äquipotenzialfläche im Schwerfeld der Erde (<https://www.spektrum.de/vexikon/geowissen/schatten/geoid/5630>)

3. 1806-1808 Erweiterung der Gradmessung Dünkirchen – Paris – Barcelona (1792-1799)

1791 beschließt die französische Nationalversammlung, den zehnmillionsten Teil des durch Paris führenden Erdmeridianquadranten als erdkörperbezogene Längeneinheit mit der Bezeichnung „Meter“ zu wählen. Um die Länge des Meters zu bestimmen, wird unter der Aufsicht der Pariser Akademie der Wissenschaften 1792-1799 eine Gradmessung vorgenommen, die von Dünkirchen bis Mantjouy bei Barcelona reicht und gleichzeitig auch Ausgangspunkt für ein Europa überspannendes Triangulationsnetz ist. Diese Gradmessung findet unter der Leitung der Astronomen Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822) (nördlicher Sektor) und Pierre-François-André Méchain (1744-1804) (südlicher Sektor) statt. Die Nachwirkungen der französischen Revolution erschweren die Expedition erheblich. Es werden jedoch sehr gute Ergebnisse erzielt, sodass die Gradmessung heute noch als bedeutende geodätisch-astronomische Leistung gilt.

An den Arbeiten im Zusammenhang mit der Gradmessung und der Einführung des Meters ist auch Jean-Charles Borda (1733-1799)¹ beteiligt, französischer Experimentalphysiker, Astronom und Geodät. Er entwickelt mehrere Präzisionsinstrumente, die bei der Gradmessung eingesetzt werden, wie den bekannten Repetitionskreis, den sogenannten Borda-Kreis, zur Winkelmessung in der Ebene von Stand- und Zielpunkten. Borda, ein großer Befürworter des Meridianprojektes und des metrischen Systems, und erster Vorsitzender

1) Jean-Charles de Borda (*1733 in Dax, Gascogne; †1799 in Paris), französischer Mathematiker und Seemann. 1756 wird er durch Untersuchungen über ballistische Probleme Mitglied der Académie des Sciences. Bei der Kriegsmarine beschäftigt er sich mit nautischen, astronomischen und hydraulischen Problemen. 1771 reist er mit Jean-René de Verdun de la Crenne (1741-1805) und Alexandre Guy Pingré nach Nordamerika, um die Chronometer zu prüfen, wobei er gleichzeitig die geographischen Längen und Breiten vieler Küstenpunkte, Inseln und Klippen berichtet. Die Resultate dieser Reise sind in „Voyage fait par ordre du roi en 1771 et 1772 en diverses parties de l'Europe et de l'Amerique“, 2 Bde, Paris (1778), veröffentlicht. 1774 reist Borda nach Kap Verde, den „Inseln des grünen Vorgebirges“, und nach Westafrika. Er ist Teilnehmer der französischen Gradmessung, wobei er die Maßstäbe durch ein besonderes Verfahren ermittelt und die Länge des Sekundenpendels durch eine neue Methode genau bestimmt. Wir verdanken ihm eine Methode zur Messung der Refraktion und die Erfindung der nach ihm benannten Reflexions- und Repetitionskreise (Bordakreis). Er ist Mitglied der Kommission für die neuen Maße und Gewichte. Auf ihn geht die Bezeichnung Meter bei der gesetzlichen Festlegung der Definition des Urmeters im Nationalkonvent zurück.



Abb. 5: Delambre, Méchain, Gradmessung Dünkirchen-Paris-Barcelona, 1792



Abb. 6: Urmeter, 1795

der 1790 gegründeten Kommission für Gewichte und Maße, kreiert für die neu geschaffene Längeneinheit den Namen „mètre“.

Der einzige Knotenpunkt der Kette von Triangulationsdreiecken in Paris ist das Pantheon. Die Laterne auf der Spitze der Dachkuppel ist von den benachbarten Triangulationsstationen im Umkreis der Stadt gut sichtbar und die Messungen werden von Delambre 1792-1793 durchgeführt. Zur Winkelbeobachtung vom Pantheon aus zu den Nachbarstationen im Februar und März 1793 wird für Delambre von den Architekten hoch oben in der Kuppel ein temporäres Observatorium mit vier Fenstern eingerichtet.

Der Meridian von Paris ist ein bis zur Internationalen Meridian-Konferenz verwendeter Nullmeridian. Er liegt $2^{\circ} 20' 14,025''$ östlich des seither allgemein verwendeten Meridians von Greenwich. Der Meridian von Paris führt mitten durch das Pariser Observatorium.



Abb. 7: Bordakreis (um 1800)

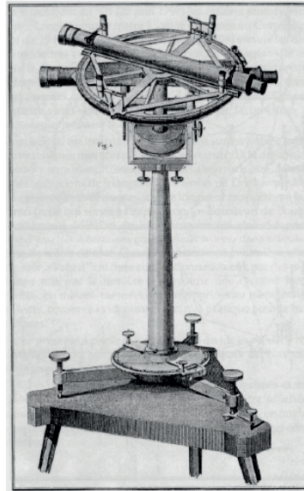


Abb. 8 (li) u. 9 (re): J. Loridan, *Voyages des Astronomes français à la recherche de la figure de la terre et de ses dimensions*, Lille 1890



Abb. 10: Salle Cassini im Pariser Observatorium mit Nullmeridian



Abb. 11: J. Dibbets, Arago-Medaillon

François Arago² wird mit siebzehn Jahren an der École Polytechnique in Paris aufgenommen. Nach dem Studium holt ihn Pierre Simon de Laplace³ an die Pariser Sternwarte. 1805 wird er Sekretär am Bureau des Longitudes. In dessen Auftrag führt er ab 1806 unter großen Schwierigkeiten und Gefahren während des spanischen Aufstands gegen Napoleon gemeinsam mit Jean-Baptiste Biot die Meridianmessungen von Pierre Méchain auf dem Meridian von Paris in Spanien und auf den Balearen zu Ende. Er berichtet darüber in seinen autobiographischen Aufzeichnungen „Geschichte meiner Jugend“.

- 2) François Jean Dominique Arago (*1786 in Estagel bei Perpignan; †1853 in Paris), französischer Astronom, Physiker und Politiker, entdeckt die magnetische Eigenschaften von Eisen durch Einwirkung von elektr. Strom.
- 3) Pierre-Simon (Marquis de) Laplace (*1749 in Beaumont-en-Auge, Normandie; †1827 in Paris), französischer Mathematiker, Physiker und Astronom. Er beschäftigt sich unter anderem mit der Wahrscheinlichkeitstheorie und mit Differentialgleichungen.

1808 wird Arago auf Mallorca wegen des in der damaligen politischen Lage extrem verdächtigen Entzündens eines Leuchtfeuers auf einer Bergspitze festgenommen, kann jedoch entkommen. Biot ist schon vorher nach Frankreich zurückgekehrt. Die Gradmessung führt nicht nur zu mehrmonatiger Festungshaft für Arago, sondern findet durch den Reisebericht von George Sand auch Eingang in die Weltliteratur⁴: *Von Napoleon mit der Messung des Meridians beauftragt, befand sich M. Arago 1803 auf Mallorca auf dem Berg Clot de Galatzo, als er die Nachricht von den Ereignissen in Madrid und der Entführung Ferdinands erhielt. ... Dieser Berg befindet sich oberhalb der Küste, wo Jaime I. landete, als er Mallorca von den Mauren eroberte; und da M. Arago dort oft Feuer für seinen eigenen Gebrauch anzünden ließ, stellten sich die Mallorquiner vor, er gebe einem französischen Geschwader mit einer Landungsarmee Signale. ... M. Arago sprach die Sprache des Landes sehr gut, beantwortete in Palma alle Fragen und wurde nicht erkannt. ... Am nächsten Tag, als sich am Ufer ein bedrohlicher Mob gebildet*

4) Chargé par Napoléon de la mesure du méridien, M. Arago était, en 1803, à Majorque, sur la montagne appelée le Clot de Galatzo, lorsqu'il reçut la nouvelle des événements de Madrid et de l'enlèvement de Ferdinand. L'exaspération des habitants de Majorque fut telle alors qu'ils s'en prirent au savant français, et se dirigèrent en foule vers le Clot de Galatzo pour le tuer. Cette montagne est située au-dessus de la côte où descendit Jaime Ier lorsqu'il conquiert Majorque sur les Maures; et comme M. Arago y faisait souvent allumer des feux pour son usage, les Majorquins s'imaginèrent qu'il faisait des signaux à une escadre française portant une armée de débarquement. Un de ces insulaires nommé Damian, maître de timonerie sur le brick affecté par le gouvernement espagnol aux opérations de la mesure du méridien, résolut d'avertir M.Arago du danger qu'il courait. Il devança ses compatriotes, et lui porta en toute hâte des habits de marin pour le déguiser.

M.Arago quitta aussitôt sa montagne et se rendit à Palma. Il rencontra en chemin ceux-là mêmes qui allaient pour le mettre en pièces, et qui lui demandèrent des renseignements sur le maudit gabacho dont ils voulaient se défaire. Parlant très bien la langue du pays, M.Arago répondit à toutes leurs questions, et ne fut pas reconnu. ... Le lendemain, un attroupement menaçant s'étant formé sur le rivage, le capitaine Vacaro avertit M.Arago qu'il ne pouvait plus désormais répondre de sa vie; ajoutant, sur l'avis du capitaine général, qu'il n'y avait pour lui d'autre moyen de salut que d'aller se constituer prisonnier dans le fort de Belver. On lui fournit à cet effet une chaloupe sur laquelle il traversa la rade. Le peuple s'en aperçut, et, s'élançant à sa poursuite, allait l'atteindre au moment où les portes de la forteresse se fermèrent sur lui. M.Arago resta deux mois dans cette prison, et le capitaine général lui fit dire enfin qu'il fermerait les yeux sur son évasion. Il s'échappa donc par les soins de M. Rodriguez, son associé espagnol dans la mesure du méridien.

George Sand, Un hiver à Majorque, Nohant 1855

hatte, warnte Kapitän Vacaro M. Arago, dass er nicht länger seines Lebens sicher sein könne. Auf Anraten des Generalkapitäns fügte er hinzu, dass es keine andere sichere Möglichkeit für ihn gab, als sich im Fort von Belver gefangen zu geben. Zu diesem Zweck wurde ihm ein Boot zur Verfügung gestellt, mit dem er die Reede überquerte. Die Leute merkten es und stürzten ihm nach, wollten ihn in dem Augenblick erreichen, als sich die Tore der Festung hinter ihm schlossen. M. Arago blieb 2 Monate in diesem Gefängnis, und der Generalkapitän ließ ihm schließlich mitteilen, dass er die Augen bei seiner Flucht zudrücken würde. Er entkam mithilfe von Herrn Rodriguez, seinem spanischen Mitarbeiter bei der Meridianmessung.

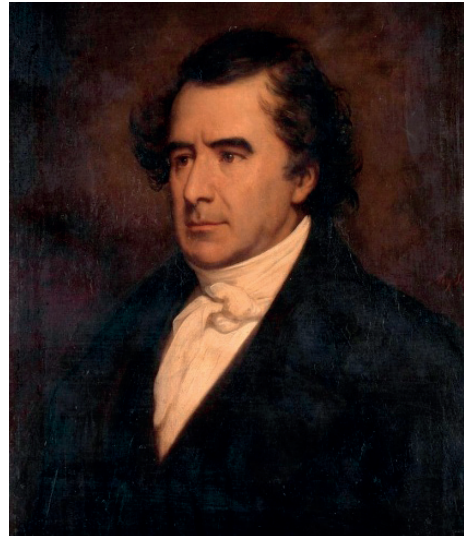


Abb. 12: François Arago



Abb. 13: Jean Baptiste Biot



Abb. 14: Castell de Bellver



Abb. 15: Puig de Galatzó

Erst 1809 kehrt Arago nach einer weiteren Gefangenschaft nach Frankreich zurück, wird mit 23 Jahren zum Mitglied der Pariser Akademie der Wissenschaften gewählt und zum Professor für Geodäsie und analytische Geometrie an der École polytechnique berufen.

4. 1821-1823 – Gradmessung Göttingen – Altona

Der deutsche Astronom und Geodät Heinrich Christian Schumacher (1780-1850)⁵ führt im Auftrag des dänischen Königs Friedrich IV. 1817-1820 Triangulationsmessungen für eine dänische Gradmessung durch. Zusammen mit seinem Freund, Carl Friedrich Gauß (1777-1855)⁶, entwickelt er gleichzeitig den Plan, das dänische Dreiecksnetz der Gradmessung, das sich von Jütland im nördlichen Dänemark bis zur dänischen Sternwarte in Altona erstreckt, weiter nach Süden zu erweitern und dabei auch das Königreich Hannover neu zu vermessen. Gauß und Schumacher überzeugen den britischen König Georg IV. von ihrem Vorhaben.

1820 wird Carl Friedrich Gauß von König Georg IV., der zugleich König von Hannover ist, zum Leiter der hannover'schen Gradmessung ernannt,

und erhält von ihm den Befehl, das Königreich Hannover zu vermessen und die neue Triangulation mit der dänischen im Norden, der hessischen im Süd-Westen und der preußischen im Süd-Osten zu verbinden.



Abb. 16: Heinrich Christian Schumacher

5) Heinrich Christian Schumacher (*1780 in Bramstedt; †1850 in Altona/Elbe), deutscher Astronom und Geodät.

6) Johann Carl Friedrich Gauß (*1777 in Braunschweig; †1855 in Göttingen, Königreich Hannover), deutscher Mathematiker, Statistiker, Astronom, Geodät, Elektrotechniker und Physiker. Wegen seiner überragenden wissenschaftlichen Leistungen gilt er bereits zu seinen Lebzeiten als Princeps mathematicorum. Seine Tätigkeit erstreckt sich neben der reinen Mathematik auch auf angewandte Gebiete, zum Beispiel ist er mit der Landesvermessung des Königreichs Hannover beauftragt, er erfindet zusammen mit Wilhelm Eduard elektromagnetische Telegrafie über längere Strecken, entwickelt Magnetometer und initiiert ein weltweites Netz von Stationen zur Erforschung des Erdmagnetismus.



Abb. 17: Kiekeberg bei Hamburg, TP Vahrendorf 4/2525, Trig.Punkt 1.Ordn. d.Europ.Gradmessung 1868 (Foto: Reinhard Kraasch, Lizenz: CC-BY-SA 4.0 DE)

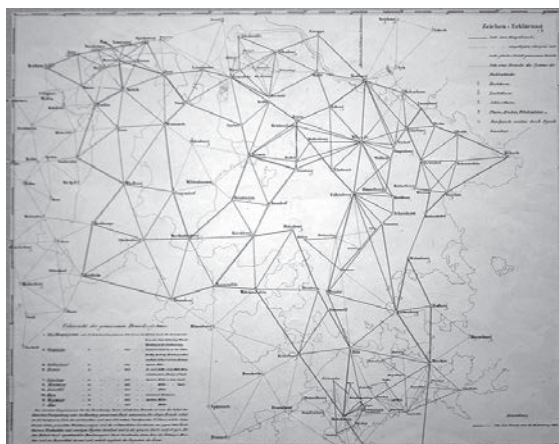
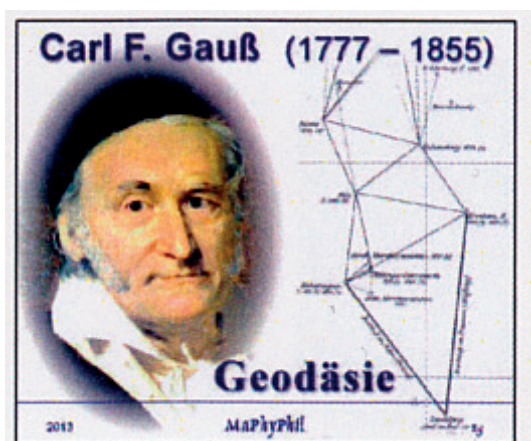


Abb. 18: Carl Friedrich Gauß und die gemessenen Dreieckssysteme 1821-1844

Ende 1820 beginnt Gauß mit der Vorbereitung der Gradmessung, die eigentlichen Winkelmessungen starten 1821. Als Nullpunkt seines Triangulationsnetzes wählt Gauß die Göttinger Sternwarte. Von dort aus erstellt er ein Dreiecksnetz bis zur dänischen Sternwarte in Altona. Mit der Dreiecksseite Hoher Hagen-Inselsberg ist die Verbindung mit der hessischen Triangulation gegeben. Die Strecke Brocken-Inselsberg bildet den Anschluss an die preußische Triangulation. Bis 1823 erweitert Gauß das Dreiecksnetz bis zum dänischen Netz in Hamburg-Hohenhorn.

1824-1825 wird von Gauß eine Verbindungsmessung zwischen dem dänisch-hannoverschen Dreiecksnetz und der niederländischen Triangulation durchgeführt. Darüber hinaus beginnen Landesvermessungen in Hessen, Bayern, Österreich und Norditalien, sodass ein durchgängiges Dreiecksnetz von Jütland bis Norditalien entsteht. 1828 beginnt die hannoverschen Landesvermessung, die ebenfalls von Gauß geleitet wird. Hierbei wird das Dreiecksnetz der Gauß'schen Gradmessung verdichtet und ergänzt, um das Königreich Hannover vollständig zu triangulieren. Aufgrund seines Gesundheitszustandes und Alters werden die Vermessungsarbeiten nicht mehr von Gauß selbst geleitet, er führt aber alle Berechnungsarbeiten durch. Die hannoversche Landesvermessung mit 2578 trigonometrischen Punkten dauert bis 1844.

Im Rahmen der von Carl Friedrich Gauß zwischen 1818 und 1826 per Triangulation durchgeführten Landes-

vermessung des Königreichs Hannover vermisst Gauß auch sein „großes Dreieck“ Hoher Hagen – Brocken – Großer Inselsberg. Dieses Dreieck mit den Seitenlängen 69 km (Hoher Hagen – Brocken), 84 km (Hoher Hagen – Inselsberg) und 106 km (Brocken – Inselsberg) ist Basis für die Verknüpfung zahlreicher regionaler Vermessungsdaten.

Da Gauß schon damals eine Nichteuklidische Geometrie für möglich hält und weiß, dass das Parallelenaxiom entbehrlich ist, entsteht durch die Vermessung des großen Dreiecks die Legende, Gauß habe bei der Gelegenheit der hannoverschen Landesvermessung empirisch nach einer Abweichung der Winkelsumme besonders großer Dreiecke vom euklidischen Wert von 180° gesucht, wie etwa bei diesem Dreieck, das vom Hohen Hagen, dem Brocken und dem Inselsberg gebildet wird. Die Vermessung durch Gauß ist belegt, die Vermutung zur Motivation ist unsicher.



Abb. 19: Gedenktafel auf dem Brocken

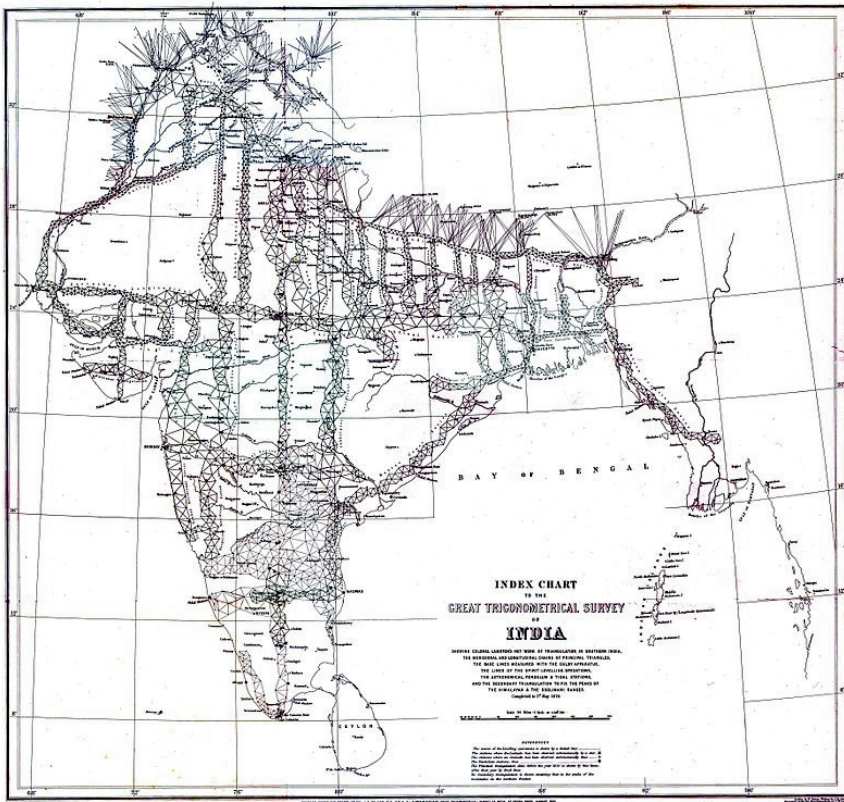


Abb. 20: Indekskarte des Great Trigonometric Survey of India, 1870

5. 1800-1852 – Gradmessung in Indien (Great Trigonometric Survey)

Im 18. Jahrhundert hat die British East India Company zwar eine Reihe mehr oder weniger zusammenhängender Besitzungen in Indien, der Subkontinent ist für Europäer aber immer noch unbekanntes Land. Zunächst werden vor allem die Küsten von den Schiffen der East India Company aus mit Hilfe von Kompass-Peilungen und astronomischen Ortsbestimmungen vermessen, ein notwendigerweise ungenaues Verfahren. James Rennell, von 1767 bis 1777 Surveyor-General of Bengal, hat große Teile von Bengalen vermessen sowie die Provinzen entlang des Ganges bis kurz vor Delhi kartographiert und 1779 im Bengal Atlas veröffentlicht, dem 1783 die erste geographisch exakt erscheinende Karte Indiens folgt. Eine Reihe weiterer Vermessungen sind von anderen Beauftragten der East India Company durchgeführt worden, die Karten beruhen aber weitgehend auf Längenmessungen und astronomischen Ortsbestimmungen und sind deshalb ungenau und nicht frei von Widersprüchen. Um die Wende zum 19.

Jahrhundert ist Fachleuten klar, dass die erforderliche Genauigkeit nur mit einer dreidimensionalen, trigonometrischen Vermessung erzielt werden könne.

Im Dezember 1799 schlägt der britische Oberst William Lambton (1756-1823)⁷ vor, eine große Vermessung quer durch den indischen Subkontinent entlang des 78. östlichen Längengrades durchzuführen, um die Lage wichtiger Punkte festzulegen, die den Landvermessern bei ihrer Arbeit helfen und als Basisnetz von Referenzpunkten

7) Lt.Col. William Lambton, FRS (ca.1753-1820 oder 1823), britischer Offizier, Vermesser und Geograph, beginnt 1800/1802 eine Triangulationsvermessung, die als Great Trigonometrical Survey of India bezeichnet wird. Seine erste Vermessung besteht darin, die Länge eines Bogengrades des Meridians zu messen, um die Form der Erde zu bestimmen und eine trigonometrische Vermessung in größerem Maßstab über die Breite des indischen Subkontinents zwischen Madras und Mangalore zu unterstützen. Nachdem er über Indien trianguliert hat, setzt er seine Untersuchungen mehr als 20 Jahre lang nach Norden fort. Er stirbt während der Vermessung in Zentralindien und ist in Hinganghat im Bezirk Wardha in Maharashtra begraben.



Abb. 21: William Lambton

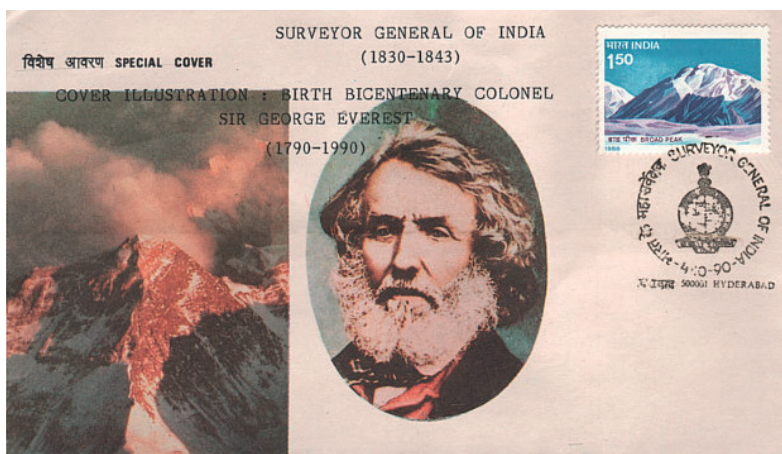


Abb. 22: Sir George Everest

zur genaueren Vermessung und Kartierung von Indien dienen sollen. Gleichzeitig soll das entlang des Meridianbogens angelegte Triangulationsnetz eine exakte Berechnung der Erdkrümmung ermöglichen. Das Vermessungsprojekt wird später als Great Trigonometric Survey – GTS (Große Trigonometrische Vermessung) bezeichnet.

Am 6. Februar 1800 wird die Vermessung formal angeordnet. Die Vermessungsarbeiten beginnen am 10. April 1802 mit der Festlegung einer 12 km langen Basislinie von St. Thomas Mount in der Nähe von Madras bis zu einem Hügel bei Pallavaram. Von dieser Basislinie ausgehend wird eine Reihe von Dreiecken bis in das Mysore-Plateau übertragen, und 1804 wird eine zweite Basis in der Nähe von Bangalore vermessen. Von hier werden dann ab 1806 Triangulationsdreiecke entlang der Halbinsel von der nördlichen Grenze des britischen Territoriums (100 Meilen nördlich von Bangalore) bis nach Cape Comorin (Kanyakumari) im Süden gelegt.

1818 wird der britische Vermessungsingenieur George Everest (1790-1866)⁸ Assistent der trigonometrischen Vermessung Indiens unter Oberst Lambton. Nach dessen Tod (zu diesem Zeitpunkt erstreckte sich der vermessene Teil des Meridianbogens über 10 Grad) leitet Everest die Vermessungsarbeiten von 1823 bis 1843. 1841 vollendet er die indische Meridiangradmessung. Noch nie ist ein Land so exakt vermessen worden und die Genauigkeit ist in Anbetracht der Mittel des 19. Jahrhunderts erstaunlich. In den folgenden 40

Jahren wird ein geometrisches Netz von Triangulationsdreiecken angelegt, das sich über 2400 km entlang des indischen Subkontinentes erstreckt und schließlich zur Bestimmung der Meridianbogenlänge diente. Dieses Triangulationsnetz ist als „Great Arc Series“ oder „Great Indian Arc of the Meridian“ bekannt. Er ist einer der längsten Meridianbögen der damaligen Erdmessung und eines der größten wissenschaftlichen Projekte jener Zeit. Neben der Messung des Meridianbogens verfolgt Everest auch die Vermessung weiterer Linien seines eisernen Rasters, wie die schon von ihm unter Lambton begonnene rund 500 km lange Serie auf dem Breitenkreis von Bombay bis zu dem Meridianbogen sowie eine Reihe von Serien zwischen der Triangulationsserie Sironj – Kalkutta und der Grenze von Nepal.

Die längste der zahlreichen Triangulationsserien ist die von Dehradun nach Osten entlang des Himalaya bis in die Region südlich von Darjeeling, wo in Sonakhoda in der Nähe von Jalpaiguri eine weitere Basislinie erstellt wurde. Da die nepalesische Regierung keinen Zugang zu ihrem Territorium gewährt, müssen die Arbeiten zwischen 1845 und 1850 mit großen Verlusten durch die malarieverseuchten Dschungel- und Sumpfgelände des Terai am Fuße des Himalaya geführt werden. Die verschiedenen Vermessungstrupps nehmen auch Peilungen zu 79 weit entfernten hohen Gipfeln des Himalaya vor, die den Briten zum Teil noch unbekannt und nirgends präzise verzeichnet sind. Während bei den Triangulationsserien meist Dreiecke mit Kantenlängen von etwa 30 bis 50 und nicht mehr als 100 km vermessen werden, ergeben sich nun Dreiecke mit Kantenlängen zwischen 130 km und mehr als 200 km. Die Berechnungen

8) Sir George Everest (*1790 in Crickhowell, Powys, Wales; †1866 in London), britischer Geodät und Offizier, Leiter der Großen Trigonometrischen Vermessung Indiens und Surveyor General of India.

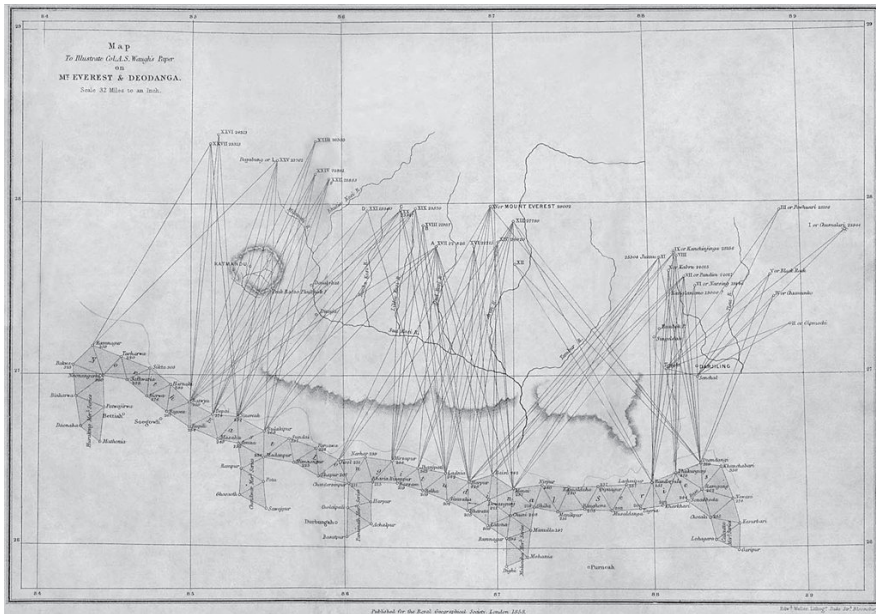


Abb. 23: Triangulation entlang des Himalaya und Peilungen auf seine Gipfel, 1858

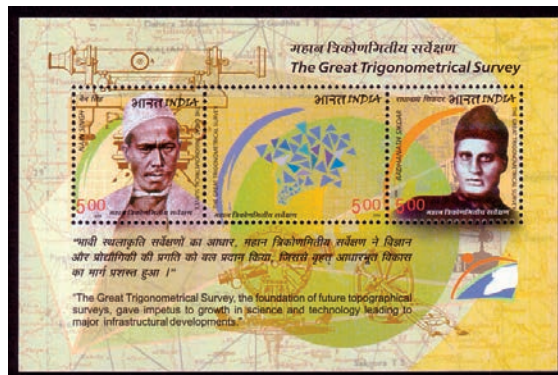


Abb. 24: Nain Singh und Radhanath Sikdar

des von Everest 1831 als mathematischer Gehilfe eingestellten und mittlerweile zum Chief Computer des Survey of India aufgestiegenen Radhanath Sikdar⁹ kommen 1852 zu dem Ergebnis, dass Peak XV mit 29.002 Fuß (8.840 m) der höchste der angepeilten Gipfel und damit wahrscheinlich der höchste Berg der Welt sei. Nach zahlreichen Überprüfungen und Kontrollrechnungen teilt Andrew Waugh dieses Ergebnis der Royal Geographical Society in einem Schreiben vom 1. März 1856 mit, das in deren Versammlung vom 11. Mai 1857 verlesen wird. Da aus der großen Entfernung

9) Radhanath Sikdar (1813-1870), seit 1840 bei der Gradmessung (GTS), berechnet die Höhe des Mount Everest und stellt fest, dass er der höchste Berg der Welt ist.

nicht festzustellen gewesen sei, wie die örtliche Bevölkerung den Berg nenne, habe er ihn zu Ehren seines Vorgängers Mount Everest genannt.

Zur Erinnerung an die trigonometrische Vermessung Indiens und die dabei durchgeführte Gradmessung hat die Indische Post im Jahr 2004 auf einem Briefmarkenblock neben einer Karte mit den Triangulationsdreiecken, historischen Vermessungsgeräten und symbolischen Darstellungen der Gradmessung und Triangulation auch zwei indische Vermesser dieser Zeit abgebildet, Nain Singh¹⁰ und Radhanath Sikdar.

10) Nain Singh (1826-1882) kartiert die Handelsroute nach Tibet, ermittelt Koordinaten und Höhe von Lhasa.



Abb. 25: Friedrich Georg Wilhelm Struve



Abb. 26: Christopher Hansteen

6. 1816-1852 – Gradmessung Hammerfest – Donaumündung (Struve-Bogen)

Die größte Gradmessung der Epoche wird von Friedrich Georg Wilhelm Struve (1793-1864)¹¹, dem Direktor der Sternwarte Dorpat, später der Sternwarte in Pulkowo bei St. Petersburg, und vom russischen General Carl F. Tenner (1783-1859)¹² zwischen der Donaumündung und dem nördlichen Eismeer ausgeführt. Das Netz der geodätischen Vermessungspunkte, der sogenannte Struve-Bogen, reicht von Fuglenaes bei Hammerfest am Nordkap ($70^{\circ}40'$) bis Staro-Nekrassowka bei Izmajil am Schwarzen Meer ($45^{\circ}20'$) und durchläuft dabei von Norden nach Süden das Gebiet der heutigen Staaten Norwegen, Schweden, Finnland, Russland, Estland, Lettland, Litauen, Weißrussland, Moldawien und Ukraine. Der Struve-Bogen erstreckt sich damit in Nord-Süd-Richtung über insgesamt 2821,833 km (= ca. 25 Grad) und besteht aus insgesamt 265 Hauptvermessungspunkten in 259 Triangulationsdreiecken (225 im damaligen Russland und 34 in skandinavischen Ländern). Die Messungen werden 1816-1852 in drei Peri-

11) Friedrich Georg Wilhelm Struve, (seit 1831) von Struve, (Василий Яковлевич Струве); (*1793 in Altona; †1864 in Pulkowo bei Sankt Petersburg), deutscher Astronom und Geodät, der im Baltikum und in Russland arbeitete. Er veröffentlichte bedeutende Arbeiten über Doppelsterne und führte umfangreiche geodätische Vermessungen durch.

12) Carl Friedrich Tenner (Карл Иванович Теннер) (*1783 in Auvere, Gouvernement Estland; †1860 in Warschau, Königreich Polen), deutschbaltischer Geodät und Astronom. Er zählt zu den Begründern der modernen Geodäsie im Russischen Kaiserreich.

oden ausgeführt. Zunächst werden Bögen zwischen Belin und der Insel Hochland im Finnischen Meerbusen gemessen, ab 1832 werden sie dann bis Tornea, dem Südpunkt der Messung von Maupertuis 1736-1737 erweitert. Ab 1845 wird der Bogen sowohl im Norden als auch im Süden bis zu seinen Endpunkten weiter fortgesetzt. Insgesamt werden 10 Grundlinien gemessen und in 13 Punkten die Polhöhe bestimmt. Diese

Vermessung stellt die erste genaue Bestimmung eines so langen Meridianabschnitts dar, und hat dazu beigetragen, die genaue Größe und Form des Planeten zu bestimmen, und einen wichtigen Schritt in der Entwicklung der Geowissenschaften und der topografischen Kartierung markiert. Es ist ein Beispiel für die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern aus verschiedenen Ländern. Mit Hilfe der Triangulation und der Breitenmessungen kann die Ellipsenform der Erde mit bemerkenswerter Präzision bestimmt werden. Die Messgenauigkeit beträgt im Mittel 4 mm pro km (in Norwegen 15 mm pro km). Frühere Messungen von Charles Marie de La Condamine und Pierre-Louis Moreau de Maupertuis in Peru und Lappland (1736-1745) haben eine Abflachung der Pole von $1/178$ und einen Äquatorradius von 6396,800 km ergeben. Die Messungen des Struve-Bogens korrigieren das zu $1/294,26$ und einen Äquatorradius von 6378,3607 km. Aktuelle Messungen mittels Satellitentechnik (2005) ergeben ein Verhältnis von $1/298,257222101$ und einen Äquatorradius von 6378,1368 km.

Der nördlichste Teil des Bogens von Fuglenaes bei Hammerfest (bei $70^{\circ}40'$) bis Atjik (bei $68^{\circ}54'$) wird 1845-1850 unter der Leitung des norwegischen Astronomen und Mathematikers Christopher Hansteen (1784-1873)¹³ gemessen.

2005 wird der Struve-Bogen von der UNESCO als frühes Beispiel für die internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit in die Liste des

13) Christopher Hansteen (*1784-†1873 in Christiania (heute Oslo)), norwegischer Astronom.

Weltkulturerbes der Menschheit aufgenommen. Repräsentiert wird er durch 34 noch erhaltene, ausgewählte Messpunkte, die gleichmäßig über den kompletten Bogen verteilt sind, 4 Punkte in Norwegen, 4 in Schweden, 6 in Finnland, 2 in Russland, 3 in Estland, 2 in Lettland, 3 in Litauen, 5 in Weißrussland, 1 in Moldawien und 4 in der Ukraine. Weitere erhaltene Stätten des Bogens stehen unter nationalem Schutz. Die Markierungen haben unterschiedliche Formen: kleine Löcher, die in Felsoberflächen gebohrt und manchmal mit Blei gefüllt sind, kreuzförmige Gravuren auf Felsoberflächen, Stein oder Ziegel mit Markierungseinsatz, Felsstrukturen mit einem zentralen Stein oder Ziegel, der durch ein Bohrloch markiert ist, einzelne Steine, sowie speziell konstruierte Denkmäler zur Erinnerung an den Punkt und den Bogen.

Weißrussland hat 2007 einen Briefmarkenblock herausgegeben, der neben den Verlauf des Struve-Bogens auch verschiedene Messgeräte und Messanordnungen zeigt (Abbildung 27). Die Abbildungen stammen aus dem 2. Band der im Jahre 1728 in London veröffentlichten Cyclopaedia. Dieses vom Ephraim Chambers (ca. 1680-1740) herausgegebene zweibändige Werk gilt als die erste englischsprachige Enzyklopädie, die im 18. Jh. sehr bekannt war:

Eine Ausgabe von 2017 zeigt neben den Porträts der Verantwortlichen für die Messungen am Struve-Bogen, Struve, Tenner und Hodzko, ein Denkmal, das auf dem Punkt Nr. 26 in Lopaty (Lapaty) in der Grodno-Region errichtet wurde (Abbildung 28). Außerdem ist ein Teil der Dreieckskette auf dem Gebiet von Weißrussland abgebildet. Mit blauen Dreiecken sind darin die 5 Messpunkte dargestellt, die in die UNESCO-Welterbeliste aufgenommen wurden (Tupiski, Lapaty, Asaunica, Cakuck und Lieskavicy). Am Rand ist ein Dreibein mit dem Signalaufbau zu sehen, der neben dem Stein auf den 5 Punkten errichtet worden ist.

2008 hat Moldawien anlässlich des 160. Jahrestages der Messung des Struve-Bogens auf dem Territorium der Republik Moldawien eine Briefmarke herausgegeben, die ein Denkmal im Ort Rudy am rechten Ufer des Dnisters im äußersten Norden Moldawiens zeigt, das an den geodätischen Struve-Bogen erinnert und an der Stelle eines der festen Messpunkte der Dreieckskette steht (Abbildung 29). Die Abbildungen auf dem Umschlag zeigen neben zwei Vermessungsinstrumenten aus damaliger Zeit auch ein Porträt von F.G.W. Struve sowie den Verlauf des Dreiecksnetzes auf dem Territorium Moldawiens mit



Abb. 27: Der Struve-Bogen – UNESCO-Weltkulturerbe (Weißrussland 2007)



Abb. 28: Struve-Bogen, rechts unten das Denkmal am Punkt Lopaty (Weißrussland 2017)



Abb. 29: Struve-Bogen – 160. Jahrestag der Messung in Moldawien 2008



Abb. 30: Struve-Bogen – 200. Jahrestag des Beginns der Messungsarbeiten

der gekennzeichneten Lage des „Rudy“-Punktes. Insgesamt besteht das Dreiecksnetz aus 27 festen Messpunkten in Moldawien.

Briefmarken in Blockform von 2016, anlässlich der 200 Jahre seit dem Anfang der Vermessungsarbeiten am Struve-Bogen, stellen neben dem Messpunkt in Rudy die gesamte Triangulationskette sowie das Netz in Moldawien dar (Abbildung 30).

Litauen hat das Jubiläum 2009 gewürdigt. Von insgesamt 18 Messpunkten des Struve-Bogens, die sich auf dem Gebiet Litauens befinden, sind drei Punkte besonders gekennzeichnet: ein Punkt im Bezirk Rokiskis (Dorf Gireisiai) und zwei im Bezirk Vilnius (in den Dörfern Paliepiukai und Meskonys). Diese drei Messpunkte sind in der UNESCO-Weltkulturerbeliste eingetragen.

Die erste Briefmarke zeigt neben dem Porträt von Struve den Gesamtverlauf des Struve-Bogens. Auf der zweiten Briefmarke ist das Denkmal auf dem geodätischen Punkt im Dorf Meskonys (Meschkanzi) dargestellt, das am 16. Juni 2006 der Öffentlichkeit vorgestellt worden ist. Außerdem zeigt sie den Verlauf des Triangulationsnetzes auf litauischem Territorium. Auf dem Rand der Kleinbögen sind Messinstrumente aus der Epoche sowie Signalaufbauten dargestellt (Abbildung 31).

Lettland zeigt neben dem Porträt von Struve an einem Theodoliten die Bodenplatten/-steine der beiden trigonometrischen Punkte der Dreiecks-kette, die in Lettland zum UNESCO-Weltkulturerbe gehören, die Punkte Nr. 20 in Sestukalns und Nr. 21 in Jekabpils (Abbildung 32). Der Punkt Sestukalns, auf dem damals geodätische Vermessungen ausgeführt worden sind, befindet sich in der Gemeinde Sausneja des Bezirks Madona auf dem Gipfel eines Möränenhügels, 216,5 m über dem Meeresspiegel. Auf dem Punkt Jekabpils (im 19. Jh. – Jakobstadt) sind im Rahmen des Struve-Bogens sowohl geodätische Vermessungen als auch astronomische Beobachtungen durchgeführt worden. Heute befindet sich dieser Punkt im historischen Zentrum von Jekabpils – im Struve-Park am südlichen Ufer des Düna-Flusses (Daugava). Die Straße, die entlang des Parks führt, heißt „Struve-Straße“. Gegenwärtig sind beide Messpunkte ein Teil des geodätischen Basis-Triangulationsnetzes 1. Ordnung Lettlands. Ferner sind Luftbilder der Gebiete und der lettische Ausschnitt der Dreieckskette mit rot mar-

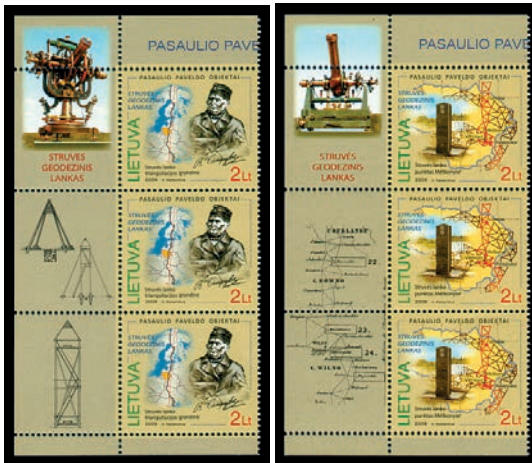


Abb. 31: Struve-Bogen – UNESCO-Weltkulturerbe (Litauen 2009)



Abb. 32: Struve-Bogen – UNESCO-Weltkulturerbe (Lettland 2011)

kierten Punkten und ein für die Messungen von Dreiecksnetzen typischer Triangulationsturm über einem der Punkte dargestellt.

Estland stellt neben dem Struve-Porträt auch das Gebäude der Sternwarte von Tartu (damals: Dorpat) dar, deren Direktor F.G. Struve 15 Jahre lang war (Abbildung 33). Die Sternwarte Tartu ist einer von 3 Messpunkten in Estland, die in die UNESCO-Weltkulturerbeliste eingetragen sind, und sie spielt eine wichtige Rolle bei der Meridianbogenvermessung (Abbildung 34). Hier befindet sich der Zentralpunkt und der Ursprung des Bogens. Neben der Alatornio Kirche in Finnland ist diese Sternwarte eines von zwei Gebäuden, die für die Beobachtungen benutzt werden, und seit der Zeit der geodätischen Vermessungen von Struve erhalten geblieben sind. Die anderen beiden estnischen Messpunkte liegen beim Dorf Simuna im Kreis Lääne-Viru. In einem dieser beiden Punkte – Katko – befindet sich heute eine 1,2 m hohe Steinsäule. Der rote Punkt zeigt die Lage dieses Punktes in der Dreiecks-kette.

Interessant gestaltete kreisrunde Briefmarken in Form des Landesumfangs zeigen den finnischen Ausschnitt des Struve-Bogens mit 6 gekennzeichneten Messpunkten, die sich auf der UNESCO-Liste befinden. Die geographischen Koordinaten und Namen dieser Messpunkte werden im oberen Teil angegeben. Im unteren Teil befindet sich eine Abbildung (nach einer alten Fotografie aus der Sammlung des Museums in Pulkovo), die die Messung einer Basislinie für eine Dreiecks-kette mittels spezieller Messlatten zeigt

(Abbildung 34). Schweden erinnert 2011 an die Messung des Struve-Bogens und zeigt den Verlauf der Dreiecks-kette vom Nordkap zum Schwarzen Meer und das Porträt von Struve (nach einem Gemälde des dänischen Künstlers aus dem 18. Jh., Christian Albrecht Jensen). Außerdem ist ein Theodolit des schwedischen Astronomen Haquin Selander zu sehen, mit dem die Winkelmessungen in Tornedalen durchgeführt worden sind, sowie das Denkmal am nördlichsten Punkt des Struve-Bogens in der norwegischen Stadt Hammerfest. Eine Landschaft der Jupukka-Berge in der Pajala Municipality, Lappland, wo sich einer der vier schwedischen Messpunkte von der UNESCO-Liste befindet, ist auch abgebildet, eine Zeichnung der Dreiecks-kette und eine Liste der Messpunkte, beide aus

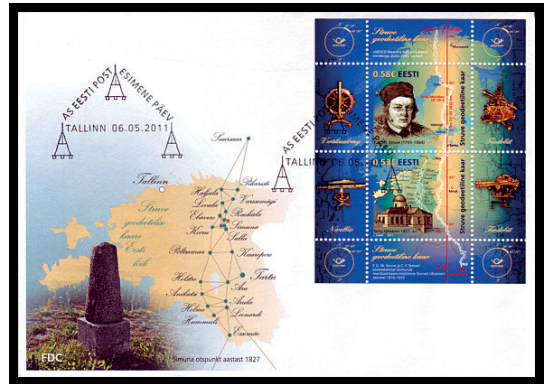


Abb. 33: Struve-Bogen – UNESCO-Weltkulturerbe (Estland 2011)



Abb. 34: 200 Jahre Sternwarte in Tartu (Estland 2010)



Abb. 35: Struve-Bogen – UNESCO-Weltkulturerbe (Finnland 2011)

dem Bericht Struves über die Vermessung „Arc du meridien...“, veröffentlicht 1857-1860, sowie die Anfangsworte der Rede des Astronomen Daniel Georg Lindhagen über die Figur der Erde, die er 1862 an der Königlichen Schwedischen Wissenschaftsakademie gehalten hat (Abbildung 36).



Abb. 36: Struve-Bogen – UNESCO-Weltkulturerbe (Schweden 2011)

7. Mitteleuropäische Gradmessung

Im April 1861 legt Generalleutnant Baeyer¹⁴ dem Kriegsministerium eine Denkschrift „Entwicklung einer Mitteleuropäischen Gradmessung“ vor und bereits im Juni des gleichen Jahres befahl König Wilhelm I. von Preußen (ab 1871 Deutscher Kaiser Wilhelm I.) durch Kabinettsorder Baeyers Vorschlag zu realisieren. Dadurch sollte sein Plan „durch Verbindung der geodätischen Messungen in denjenigen Ländern, welche mit Deutschland zwischen gleichen Meridianen liegen, eine Mitteleuropäische Gradmessung herzustellen“ verwirklicht werden.

¹⁴ Johann Jacob Baeyer (*1794 in Müggelheim; †1885 in Berlin), preußischer Offizier, zuletzt Generalleutnant, Geodät, Begründer der europäischen Gradmessung.



Abb. 37: Johann Jacob Baeyer

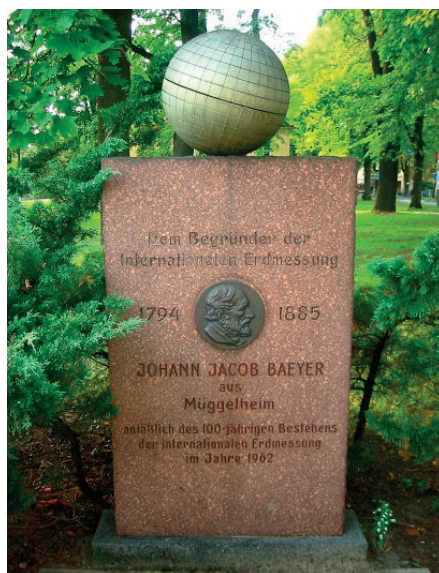


Abb. 38: Gedenkstein in Berlin-Müggelheim, Foto: Andreas Steinhoff



Abb. 39: Vermessungspunkt der Mitteleuropäischen Gradmessung 1864

Deutsche Landestriangulationen im 19. Jahrhundert			
Zeitraum	Land	Geodäten	Basislänge
1801-1852	Bayern	Johann Georg Soldner (1776-1833)	
1803	Thüringen	Franz Xaver von Zach (1754-1832)	5,88 km
1811-1813		Bernhard August von Lindenau (1779-1854)	
1809-1834	Hessen-Darmstadt	Christian Leonhard Philipp Eckhardt (1784-1866), Ludwig Johannes Schleiermacher (1785-1844)	
1810-1852	Baden	Johann Gottfried Tulla (1770-1828) u. W. F. Klose	
1818-1831	Württemberg	Johann Gottlieb F. Bohnenberger (1765-1831)	13,03 km
1821-1831	Kurhessen	Christian Ludwig Gerling (1788-1864)	
1828-1844	Hannover	Carl Friedrich Gauß (1777-1855)	ohne Basismessung
1835-1850	Oldenburg	A. Ph. Freiherr von Schrenck (1800-1877)	
1853-1860	Nassau	Friedrich Wagner	
1853-1860	Mecklenburg	Friedrich Paschen (1804-1873)	
1862-1890	Sachsen	August Nagel (1821-1903), Karl Christian Bruhns (1830-1881), Julius Weisbach (1806-1871)	8,91 km
1816-1818	Livland	Wilhelm Friedrich Georg Struve (1793-1864)	
1821-1831	Ostseeprovinzen Russlands		
1816-1820	Dänemark	Heinrich Christian Schumacher (1780-1850)	5,88 km
1820	Holland	Cornelis Rudolphus Theodorus Krayenhoff (1758-1840)	

Tab. 3: Deutsche Landestriangulationen im 19. Jahrhundert

Nach Ausscheiden aus dem preußischen Generalstab 1857 veröffentlicht Baeyer mehrere wissenschaftliche Arbeiten zur „Begründung der mitteleuropäischen Gradmessung“, die die Vermessung Mitteleuropas nach Längen- und Breitengraden und die Untersuchung lokaler Verhältnisse unter anderem des Schwerefeldes und der Erdkrümmung sowie die internationale Zusammenarbeit zum Ziel haben. Ende 1862 sind bereits Bayern, Baden, Hannover, Königreich Sachsen, Sachsen-Gotha, Mecklenburg, Belgien, Italien, Schweiz, Österreich, Schweden, Dänemark, Niederlande, Polen und Norwegen dem Unternehmen beigetreten. Damit ist der Grundstein für eine internationale Erdmessung gelegt, welche heute unter der

Schirmherrschaft der IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) steht und fast alle Staaten der Erde einschließt.

1829 gibt es auf Veranlassung des Generals Carl Friedrich von Tenner die Anordnung durch die preußische Regierung eine Gradmessung in Ostpreußen zur Verbindung von preußischen und russischen Dreiecksketten durchzuführen. Die preußische Regierung beauftragt den Direktor der Königsberger Sternwarte Friedrich Wilhelm Bessel unter Mitwirkung von Baeyer, diese Aufgabe auszuführen. 1831 bis 1834 erfolgen die Feldarbeiten. Die Erkundungen (Recognoscirungen) betreffen eine Dreieckskette mit 17 Stationen und Anschlüssen.

sen im Westen an die Linie Trunz – Wildenhof (Tennerische Vermessung) und im Osten an Memel – Lepaizi und Lepaizi – Algeberg (Struvesche Vermessung) und Anschluss an die Sternwarte Königsberg. Ferner wird eine Basislinie erkundet, die zwischen den Dörfern Mednicken und Trenk liegt. Ihre Messung erfolgt mit dem Bessel'schen Basisapparat (4 Messstangen mit 4 Toisen Länge, 1 Toise = 1,949 Meter) in 2 Absätzen je zweifach. Länge: 935 Toisen = 1.822,35 m, mittlerer Fehler einer Messung von 1 km Länge: $\pm 2,2$ mm. Die Basis dient über das gemessene Basisvergrößerungsnetz zur Ableitung der Hauptdreiecksseite Galtgarben – Condehnen. Die astronomischen Beobachtungen sind Polhöhenbestimmungen auf den Hauptpunkten Memel und Trunz sowie Bestimmung von Meridianrichtungen. Und die geodätischen Beobachtungen sind Winkelmessungen mit dem 15-zölligem Ertel'schem Theodolit (mit 8-zölligem Höhenkreis) nach Heliotropenlichtzeichen auf den 17 Stationen (1820 hat Carl Friedrich Gauß den Heliotropen erfunden). Die Auswertung nach der Methode der kleinsten Quadrate (von Gauß 1809 veröffentlicht) erfolgt mit 31 Unbekannten. Die Berechnung der Entfernungen der Dreieckspunkte wird mittels Logarithmen bewerkstelligt. Aus Zenitdistanzmessungen werden die Höhen über der Meeresoberfläche und die mittlere Größe der Strahlenbrechung (Refraktionskoeffizient $k=0,1370$) bestimmt. Die Resultate der geodätischen und astronomischen Arbeiten zur Gradmessung in Ostpreußen sind: Geodätische Bestimmungen zwischen Königsberg – Trunz, Königsberg – Memel und Trunz – Memel mit Entfernungen, Richtungen und Dreiecksseiten; astronomische Bestimmungen von Königsberg, Trunz und Memel mit Polhöhen und Azimuten. 1832-1836 erfolgt die Gradmessung in Ostpreußen durch F. W. Bessel und J. J. Baeyer und 1835 ein Nivellement zwischen Swinemünde und Berlin durch J. J. Baeyer.

Als Gradmessungskommission werden die geodätischen Spezialstudiengruppen bezeichnet, die ab 1863 auf Initiative Österreichs in mehreren Staaten Mitteleuropas gegründet werden, um der steigenden Bedeutung der wissenschaftlichen Erdmessung gerecht zu werden. Der Name leitet sich von den Methoden der Gradmessung ab, mit denen ab etwa 1800 die genaue Erdfigur und bestanschließende Ellipsoide für die im Aufschwung befindlichen Landesvermessungen bestimmt werden. Als erste derartige Kommission wird 1863 in Wien die Österreichische Grad-

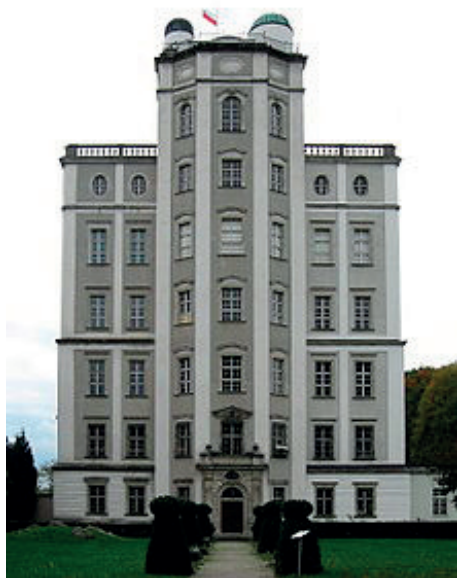


Abb. 40: Mathematischer Turm Stift Kremsmünster

messungskommission gegründet. Federführend sind das k.k. Militärgeographische Institut und Professoren der 1815 gegründeten Technischen Hochschule Wien. Um 1865 folgen die Mitteleuropäische Gradmessungskommission, in der vor allem Österreich und Deutschland unter Fligely und Baeyer ihre Forschungsprojekte für Höhere Geodäsie koordinieren, sowie um 1870 die Bayerische Gradmessungskommission. 1864 findet die 1. Konferenz der Mitteleuropäischen Gradmessung in Berlin statt. Aus der Mitteleuropäischen wird 1867 eine Europäische und später eine Internationale Gradmessung. Als Organ dieser Konferenz von 1864 wirkte ein Zentralbüro, das seinen Sitz bis 1916 im 1870 gegründeten Geodätischen Institut hatte. Ab 1870 entstehen auf Initiative von Friedrich Robert Helmert¹⁵ weitere Kommissionen in Preußen, in Württemberg und teilweise in den Rheinlanden.

Die Österreichische Gradmessungskommission erhält in der Zwischenkriegszeit den Namen Österreichische Kommission für die internationale Erdmessung (ÖKIE) und wird 1995 in Österreichische Geodätische Kommission (ÖGK) umbenannt, während die deutschen Kommissionen in der Deutschen Geodätischen Kommission (DGK) bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zusammengefasst werden.

15) Friedrich Robert Helmert (*1843 in Freiberg, Sachsen; †1917 in Potsdam), deutscher Geodät und Mathematiker.



Abb. 41: Friedrich Wilhelm Bessel

8. 1880-1910 Meridianbogen Kremsmünster (Großenhain – Kremsmünster – Pola)

Der Meridianbogen ist von der preußischen Landesvermessung im Norden noch etwa 70 km fortgesetzt und teilweise als Berliner Meridian bezeichnet worden. Er verläuft von der böhmischen Grenze über Dresden bis nach Großenhain (Sachsen), wo der astronomische Endpunkt errichtet worden ist. Den südlichen Endpunkt bildet die österreichische Marine-Sternwarte Pola (Istrien), die später durch die Asteroidenentdeckungen von Johann Palisa international bekannt wurde. Kremsmünster bildet den Zentralpunkt des Meridianbogens. Der Meridianbogen Kremsmünster wird im späten 19. Jahrhundert als Zentralteil eines mitteleuropäischen Meridianbogens von Preußen bis zur Adria beobachtet bzw. aus älteren Messungen zusammengestellt. Eine Doppelkette von Triangulationspunkten (TP) der oberösterreichischen Landesvermessung und der benachbarten Kronländer führt über den Fundamentpunkt auf dem Gusterberg unweit des Benediktinerstiftes Kremsmünster. Die TP-Punkte werden so ausgewählt und rekognosziert, dass die aus ihnen gebildete Triangulationskette genau im Meridian von Kremsmünster verläuft ($31^{\circ} 48'$ östlich von Ferro oder $14^{\circ} 08'$ von Greenwich). Die Kette erstreckt sich über Oberösterreich hinaus noch jeweils 250 km nach Norden (Böhmen) sowie nach Süden (Steiermark und Krain) und bildet somit einen rund 660 km langen Bogen auf dem Staatsgebiet Österreich-Ungarns mit dem die mitteleuropäische Gradmessungskommission den genauen Verlauf der Erdkrümmung und ein astro-

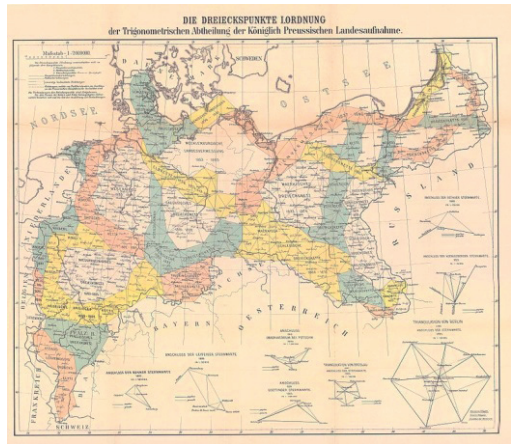


Abb. 42: Dreieckspunkte I. Ordnung der Trigonometrischen Abtheilung der Königlich Preussischen Landesaufnahme, 1895

geodätisches Geoidprofil berechnet. Dazu wird an einigen TP die genaue astronomische Breite aus Sterndurchgängen (Sterneck-Methode) und die Azimute einiger Netzseiten gemessen. Den astronomischen Zentralpunkt bildet die Sternwarte Kremsmünster („Mathematischer Turm“ des Stiftes), wo besonders genaue astronomische Koordinaten ermittelt und auch eine Längenbestimmung durchgeführt wird. An die Sternwarte ist ein geophysikalisches Observatorium und eine Wetterstation angeschlossen, die heute die längste klimatische Messreihe der Welt besitzt.

9. Zusammenfassung

Seit Anfang des 19. Jh. häufen sich mit der Zahl der Gradmessungen auch die darauf basierenden Ellipsoidberechnungen, auf die die einzelnen Länder ihre staatlichen Vermessungsnetze bezogen haben. Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846)¹⁶, deutscher Astronom, Mathematiker und Geodät, fasst 1840 alle wichtigen und ihm bekannten Ergebnisse der großräumigen Gradmessungen in Europa sowie in Indien zusammen und errechnet durch Ausgleichung die Dimensionen eines mittleren Erdellipsoides, das sich durch seine Lagerung dem Geoid und der mittleren Erdkrümmung in Europa und Asien besonders gut anpasst. Seine

¹⁶ Friedrich Wilhelm Bessel (*1784 in Minde; † 17. März 1846 in Königsberg i. Pr., deutscher Astronom, Mathematiker, Geodät und Physiker. Die von Bessel geplante und geleitete Ostpreussische Gradmessung wurde vorbildlich für nachfolgende Triangulationen in Deutschland. Es gelang ihm Werte für die Dimensionen des Erdellipsoides herzuleiten, die bis zum Ende des 20. Jahrhunderts den mitteleuropäischen Landesvermessungen zugrunde lagen (Bessel-Ellipsoid).

Gradmessung	Jahr	Beobachter bzw. Organisator	Δ	Stat.	Endpunkte	Mittlere	
						Breite	Länge
Frankreich—Spanien	1792–1798	Delambre–Méchain	9° 40'	6	Montjoux–Dünkirchen	46° 12' N	2° 20'
Frankreich—Spanien	1803–1804 1806–1808	Méchain Biot–Arago	12° 22'	7	Formentera–Dünkirchen	44° 51' N	2° 20'
1. indische	1802	Lambton	1° 35'	2	Tiruvendipuram–Paudree	12° 32' N	79° 47'
2. indische	1805–1811	Lambton	6° 56'	4	Punnae–Namthabad	11° 38' N	77° 40'
2. indische	1805–1818	Lambton	9° 54'	6	Punnae–Damargida	13° 06' N	77° 40'
2. indische	1805–1830	Lambton–Everest	15° 58'	7	Punnae–Kalianpur	16° 08' N	77° 40'
2. indische („Great Arc“)	1805–1842	Lambton–Everest	21° 21'	8	Punnae–Kaliana	18° 50' N	77° 40'
revidierte 1. indische	1843–1873	Waugh–Walker	16° 15'	30	Tiruvendipuram–Jarura	19° 52' N	80° 10'
revidierte 2. indische („Great Arc“)	1843–1873	Waugh–Walker	21° 21'	54	Punnae–Kaliana	18° 51' N	77° 40'
3. indische	1843–1873	Waugh–Walker	19° 09'	31	Mangalore–Shapur	22° 27' N	75°
1. indischer Parallel	1875	Walker	10° 29'	3	Bombay–Vizagapatam	18° N	78° 06'
2. indischer Parallel	1875	Walker	5° 24'	3	Mangalore–Madras	12° 58' N	77° 35'
3. indischer Parallel	1875–1892	Walker	24° 29'	6	? –Chittagong	23° 36' N	79° 28'
Livland	1821–1827	F. G. W. Struve	3° 35'	3	Jacobstadt–Hochland	58° 18' N	26° 40'
Baltikum	1816–1831	W. Struve–Tenner	8° 02'	6	Belin–Hochland	56° 04' N	26° 40'
Russisch-skandinavische	1816–1855	W. Struve–Tenner– Seelander–Hansteen	25° 20'	13	Staro Nekrassowka–Fuglense	58° 00' N	26° 40'
Dänemark	1817–1821	Schumacher	1° 32'	2	Lauenberg–Lyssabel	54° 08' N	10° 33'
Hannover	1821–1824	C. F. Gauß	2° 01'	2	Göttingen–Altona	52° 32' N	9° 56'
Ostpreußen	1831–1836	Bessel–Baeyer	1° 30'	3	Trunz–Memel	54° 58' N	20° 30'
Russischer Parallel in 52° Breite	1827–1872	Forsch–Oberg–Zylinski	39° 24'	10	Czenstochau–Orsk	52° N	38° 52'
Europäischer Parallel in 52° Breite			68° 55'	28	Feaghmain–Orsk	52° N	24° 06'
Russischer Parallel in 47,5° Breite	1848–1856	Wroschenko	19° 12'	6	Kiszeniew–Astrachan	47° 30' N	38° 24'
Europäischer Parallel in 48° Breite	1848–1906		52° 45'		Brest–Astrachan	48° N	21° 38'

Tab. 4: Statistische Angaben über die Gradmessung bis 1900 (Auszug) aus Georg Straßer, *Ellipsoidische Parameter der Erdfigur*, München 1957

Ergebnisse veröffentlicht Bessel 1841. Das Bessel-Ellipsoid beruht auf 10 langen Meridianbögen und 38 präzisen Messungen geographischer Breite und Länge. Die Dimensionen des Ellipsoids werden von Bessel durch die beiden Halbachsen a und b sowie die Abplattungsformel $f = (a-b)/a = 1/299,15$ definiert. Das Bessel-Ellipsoid wird die Grundlage der Landesvermessungen vieler Länder in Europa und Übersee. Um 1950 basieren auf ihm die Hälfte der Triangulationen in Europa und etwa 20% auf anderen Kontinenten. Bis heute dient das Ellipsoid als Basis der Landesvermessung in Deutschland und Österreich, aber auch z.B. in Indonesien, Japan oder Namibia. Mit dem Einsatz der satellitengeodätischen Messverfahren (GPS, GLONASS, Galileo) verliert das Bessel-Ellipsoid an Bedeutung zugunsten des globalen Referenzellipsoides WGS84 ($f = 1/298,26$), das die Grundlage des GNSS-Referenzsystems bildet.

1967 wird das 100-Jahr-Jubiläum der „Europäischen Gradmessung“, der Nachfolgeorganisation der 1862 auf deutsch-österreichische Initiative gegründeten „Mitteleuropäischen Gradmessungs-Kommission“ gefeiert. Ihre Aufgabe ist die internationale Koordinierung von verschiedenen Grad- und Erdmessungsprojekten. Die „Europäische Gradmessung“ stellt den Vorläufer der globalen geodätischen Union IAG und der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) dar.

Referenzen

Baeyer, Johann Jacob, Entwurf zu einer Mitteleuropäischen Gradmessung, Berlin 1861

Baeyer, Johann Jacob, Über die Größe und Figur der Erde, Eine Denkschrift zur Begründung einer mittel-europäischen Gradmessung nebst einer Uebersichtskarte, Berlin, 1861

Bouguer Pierre, La Condamine Charles-Marie, La figure de la terre, Paris 1749

Daumas Maurice, Arago, 1786–1853, Paris 1987

Delambre, Jean-Baptiste Joseph, Méthodes Analytiques pour la Détermination d'un Arc du Méridien, précédées d'un mémoire sur le même sujet par A. M. Legendre, Paris 1799, S 72–73

Euler Leonhard, Von der Gestalt der Erden, St. Petersburg 1738

Gauß Johann Carl Friedrich, Untersuchungen über Gegenstände der höhern Geodäsie, Erste Abhandlung, Göttingen 1845, Zweite Abhandlung, Göttingen 1847

Generalbericht über die Mitteleuropäische Gradmessung, München 1867

Geodäsie in der Philatelie, http://www.wydera.de/vermessung/kap_01_04_01_gradmess.html

Helmert, Friedrich Robert, Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie. Einleitung und 1 Teil, Leipzig 1880, S 46–48

Hiermaseder Michael, „Von der Gestalt der Erden“, Gradmessungen im 18. Jahrhundert, VGI 4/2022, S 213–233

Höpfner Joachim, Johann Jacob Baeyer, ein hervorragender Geodät des 19. Jh., Tagung zu Fragen der wissenschaftlichen Geodäsie der „Mitteleuropäischen Gradmessung“ vor 150 Jahren, Berlin, 2012

Maupertuis Pierre-Louis Moreau de, Discours sur les différentes figures des astres, avec une Exposition abrégée des systèmes de M. Descartes et de M. Newton, Paris 1732

Maupertuis, Pierre-Louis Moreau de, La figure de la terre, Paris 1738

Roy Rama Deb, The Great Trigonometrical Survey of India in a Historical Perspective. In: Indian Journal of History of Science. 21(1), 1986

Schumann Richard/Hopfner Friedrich, Der Meridianbogen Großenhain-Kremsmünster-Pola. Astronomische Arbeiten des Österreichischen Gradmessungsbüros, Band I der ÖKIE, Wien 1922

Straßer Georg, Ellipsoidische Parameter der Erdfigur, München 1957

Struve Friedrich Georg Wilhelm, Vorläufiger Bericht von der Russischen Gradmessung, 1821 bis 1827 in den Ostseeprovinzen des Reichs, Dorpat 1827

Struve Friedrich Georg Wilhelm, Beschreibung der Breitengradmessung in den Ostseeprovinzen 1821 bis 1831, Erster Theil, Einleitung und Berechnung, Zweiter Theil, Tagebuch, Dorpat 1831

UNESCO World Heritage Center, Struve Geodetic Arc, CC-BY-SA IGO 3.0, Paris 2005

Anschrift des Autors

Dr. Michael Hiermaseder, Managing Director, Leica Geosystems Austria GmbH (ret.); Partner, Rudolf & August Rost (ret.), Sommerergasse 11/5, A-1130 Wien.

E-Mail: hiermaseder@gmx.net



Current status of VLBI Intensive sessions

Aktueller Status von VLBI Intensive sessions

Lisa Kern, Wien

Abstract

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) is the only space-geodetic technique capable of determining the full set of Earth Orientation Parameters (EOP) and celestial reference frames and it makes important contributions to the realisation of terrestrial reference frames. Standard VLBI sessions with a duration of 24 hours are usually observed on Mondays and Thursdays with a global network of up to 15 stations. Due to the large number of observations acquired during these VLBI sessions, all of the above-mentioned parameters of interest can be determined. However, the turnaround time for product delivery of standard VLBI sessions can take up to several weeks. Intensive VLBI sessions, or short Intensives, are one-hour sessions between 2 to 3 stations used for the rapid determination of UT1-UTC. Due to their much shorter turnaround time for product delivery, they enable us to monitor the Earth's rotation phase regularly.

Keywords: VLBI, Intensives, UT1-UTC

Kurzfassung

Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ist das einzige weltraumgeodätische Verfahren, welches in der Lage ist, alle Erdorientierungsparameter (EOP) sowie himmels- und erdfeste Referenzrahmen zu bestimmen. Standard VLBI Sessions mit einer Dauer von 24 Stunden werden in der Regel montags und donnerstags mit einem globalen Netz von bis zu 15 Stationen durchgeführt. Aufgrund der großen Anzahl an Beobachtungen, können alle oben genannten Parameter bestimmt werden, diese stehen jedoch oft erst mehrere Tage bis Wochen nach der Session zur Verfügung. Intensive Sessions oder kurze Intensives sind einstündige Beobachtungen zwischen 2 bis 3 Stationen, die vor allem für die Bestimmung von UT1-UTC verwendet werden. Diese kurzen Sessions ermöglichen es uns, die Rotationsphase der Erde regelmäßig und kontinuierlich zu überwachen.

Schlüsselwörter: VLBI, Intensives, UT1-UTC

1. Introduction

VLBI Intensive sessions are one-hour observations usually observed between 2 to 3 stations. Thus, the number of observations is very low (20-40 observations per S/X INT, 40-80 per VGOS INT; Bolotin et al (2023)), leading to a reduced number of possible parameters to be estimated. These normally include one UT1-UTC offset as well as clock offsets and zenith wet delays per participating station. The resulting low data volume makes it possible to drastically reduce the turnaround time for product delivery compared to regular 24-hour sessions. This enables us to regularly monitor the difference between the Universal Time (UT1) and the Coordinated Universal Time (UTC), representing variations or irregularities of the Earth's phase of rotation. Due to the correlation of changes in the orbital parameters of satellites, mainly the right ascension of the ascending node, and changes in the Earth's rotation phase, it is not possible to directly estimate UT1-UTC with satellite-based techniques, making VLBI the only space-geodetic technique capable of determining the full set of EOP (Rothacher et al, 1999).

To ensure high sensitivity to the Earth's rotation, Intensive baselines are usually long east-west oriented baselines. However, recent simulation studies have shown that more suitable constellations include small angles with the equatorial plane and a baseline length between 8000 and 11000 km (Schartner et al, 2021).

2. Types of Intensive sessions

At the moment, several types of Intensive sessions are observed regularly, which differ in the observing mode, number and selection of participating stations as well as the observation date and time. The IVS Intensive sessions (S/X legacy-band) include IVS-INT-1 (or XU), observed on weekdays at 18:30 UTC between Germany (WETTZELL, Wz) and Hawaii (KOKEE, Kk), and IVS-INT-2 (XK), usually planned for the weekends at 07:30 UTC, including WETTZELL and ISHIOKA (Is) in Japan or MK-VLBA (USA, Mk). In comparison, IVS-INT-3 (also XK) sessions include three to five stations, namely ISHIOKA, NYALES20 and/ or NYALE13S (Norway, Ny/ Ns), WETTZELL and/ or WETTZ13N (Germany, Wn) and sometimes also SESHAN25

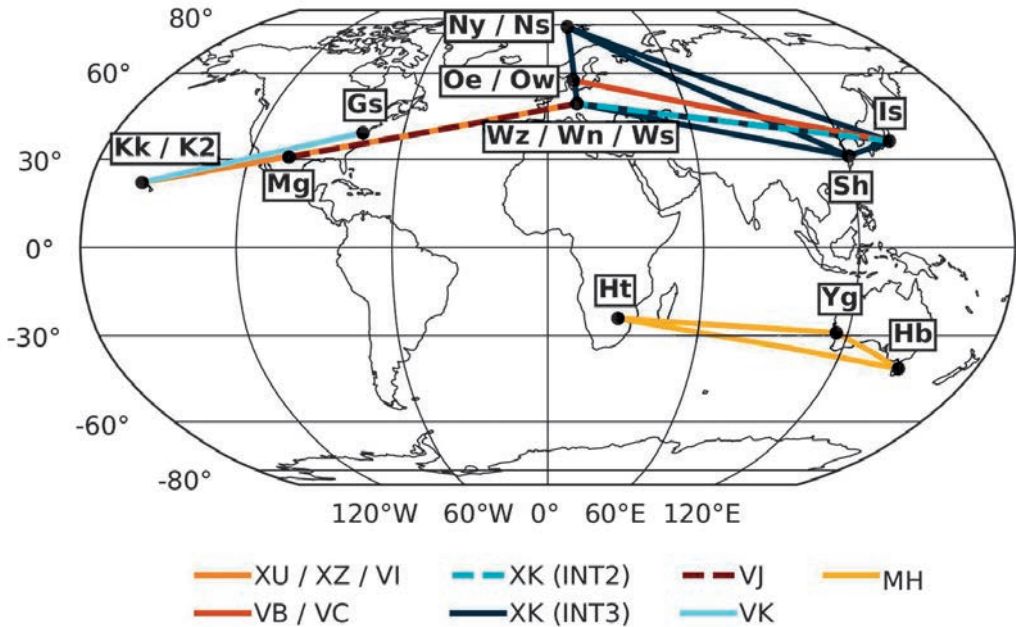


Fig. 1: Intensive session baselines/ networks

(China, Sh). IVS-INT-3 sessions are usually performed on Monday mornings to supplement the IVS Intensive series (Landskron and Böhm, 2019; Böhm et al, 2010). Starting in March 2022, IVS-INT-00 (XZ) sessions between WETTZELE and KOKEE are observed regularly on weekdays, prior to the IVS-INT-1 sessions (IVS, 2022).

Due to new findings regarding the improvement of Intensive sessions and the development of the next-generation VLBI system (VLBI Global Observing System (VGOS), formerly VLBI2010), there has been an upsurge in new Intensive experiments in recent years.

The era of VGOS Intensive sessions started in 2020 with a few VGOS-INT-A (VI) sessions, which are scheduled between KOKEE12M (USA, K2) and WETTZELE13S (Germany, Ws) and are simultaneous to IVS-INT-1 sessions (Baver et al, 2023; Gipson et al, 2023), and VGOS-INT-B (VB) sessions. The VB station network includes ISHIOKA and the twin telescopes ONSA13NE and ONSA13SW (Sweden, Oe/ Ow), and these sessions are usually observed concurrently with the IVS-INT-1 sessions. In 2021, the VB sessions were supplemented by VGOS-INT-C (VC) sessions which observe the same network and are scheduled after the VB/ IVS-INT-1 sessions (Haas et al, 2021). Furthermore, VGOS-INT-S (VJ) sessions between MACGO12M (USA, Mg) and WETTZELE13S are observed as a backup

VGOS baseline whenever the VI baseline might be unavailable (Baver et al, 2023; Schartner et al, 2022). Additional VGOS Intensive sessions, VGOS-INT-G (VK), between GGAO12M (USA, Gs) and KOKEE12M were scheduled in 2022 (Gipson et al, 2023).

In Figure 1, the network constellations of the above-mentioned Intensive session types are shown. As one can see, all stations currently participating in Intensive sessions are located in the northern hemisphere. In late 2019, we initiated the Southern Intensives (MH) program, which resulted in approximately 50 sessions by the end of 2021 (Böhm et al, 2022). Since 2022 the Southern Intensives are regularly observed every Monday at 6:30 on the baseline from HOBART12 (Tasmania, Hb) to HART15M (South Africa, Ht) under the designation IVS-INT-S.

Besides these global Intensive sessions, experiments including more national networks have been tested. For example, since 2011, Intensive sessions within the USA between Very Long Baseline Array, short VLBA, stations MK-VLBA (Mk), PT-VLBA (Pt) and SC-VLBA (Sc) are observed and used for the determination of a fully independent UT1-UTC solution for the corresponding GNSS system, GPS (Geiger et al, 2018). Furthermore, also Russia has its own Intensive sessions between the stations BADARY (Bd), ZELENCHK (Zv)

and SVETLOE (Sv) (Shuygina et al, 2018). Only a few years ago, a European Intensive baseline has been investigated by Böhm et al (2018). The baseline included a station in Santa Maria (Portugal, Sa) and WETTZELL. Unfortunately, simulations did not lead to promising accuracy levels, nor an observation in March 2018. Nevertheless, a European Intensive session would be beneficial for the European GNSS system, GALILEO. Since these national sessions are not routinely analysed at our Vienna VLBI Analysis Center, they will not be further discussed.

3. Data

At the VLBI Analysis Center in Vienna, all sessions which are available at the Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) (Noll, 2010) are downloaded daily (at 5 a.m). An automated analysis processing pipeline makes it possible to immediately process Intensive sessions using the Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS) and publish the results on www.vlbi.at/products in the form of a daily updated, IVS formatted EOP file (current version `vie2023a.eopi`).

In 2022, there were nearly 900 sessions of the featured Intensive types scheduled. Compared to the previous year, this corresponds to an increase in the number of sessions of approximately 70 %. For 2023, over 950 Intensive sessions are planned. The analysis of the latency and performance of Intensive sessions in the next section refers to the sessions of 2022.

4. Latency and Performance

As already mentioned, the sole purpose of VLBI Intensive sessions is the rapid determination of UT1-UTC. Therefore, a short turnaround time for product delivery is of high importance. In the following Table 1, the average turnaround time for the different types of Intensive sessions as well as for the S/X 24 hour VLBI sessions, namely R1 and R4, can be found. To ensure a fair comparison,

latencies over a certain threshold (90 % quantile) per type are defined as outliers and are removed from the estimation of the mean value.

With a mean latency of only 9 hours and a standard deviation of 3 hours, the results of IVS-INT-1 sessions can be retrieved soon after the end of the session, whereas some of the VGOS Intensive sessions require up to a month or more to be processed. However, this comparison should be treated with caution, as most of these session types are experimental sessions that are not intended for operational purposes, yet. But, it can be shown that the results of Intensive sessions can be retrieved significantly earlier than those of standard 24 hour sessions, which makes Intensive sessions, besides their reduced precision, essential for monitoring the highly variable Earth's phase of rotation.

Over the years, many studies on Intensive sessions have shown that the performance strongly depends on the geometry of the observing network (Schartner et al, 2021), the selection and distribution of observed sources (Baver and Gipson, 2014; Baver and Gipson, 2020; Kern et al, 2023a), the scheduling optimization algorithm (Nothnagel and Campbell, 1991; Uunila et al, 2012; Gipson and Baver, 2015; Corbin et al, 2020; Kern et al, 2023a), the duration of the session (Artz et al, 2012) and the accuracy of the a priori values (Kern et al, 2022a; Kern et al, 2022b; Kern et al, 2023b). In the following, the Δ UT1 estimates with respect to the IERS finals series were calculated for all discussed Intensive session types of 2022 as well as for R1 and R4 sessions. It has to be noted that outlier sessions with high weighted root mean squared (WRMS) values have been removed to ensure a fair comparison. In Table 2 the mean Δ UT1 values and the standard deviations of all types are displayed, whereas in Figure 2, the Δ UT1 and corresponding accuracies are displayed for selected Intensive session types.

type	#sess	latency	type	#sess	latency
XU	195	9h \pm 3h	VI	155	2d 7h \pm 1d 7h
XK (INT2)	82	1d 22h \pm 16h	VB	34	35d 23h \pm 20d 16h
XK (INT3)	27	20h \pm 3h	VC	31	34d 6h \pm 21d 10h
XZ	52	1d 3h \pm 1h	VJ	22	3d 18h \pm 3d 8h
MH	38	6d 23h \pm 14d 3h	VK	8	1d 8h \pm 0h
R1	83	29d 18h \pm 24d 9h	R4	45	12d 21h \pm 2d 16h

Tab. 1: Mean latencies

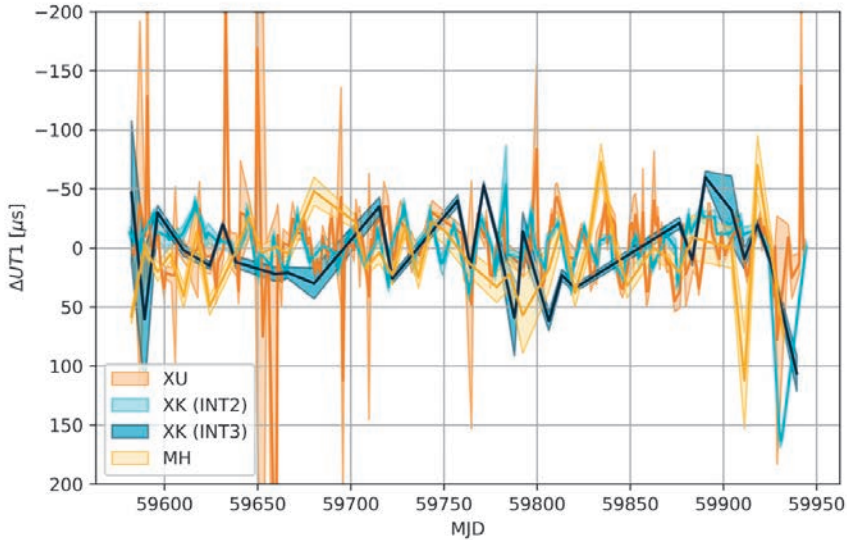


Fig. 2: $\Delta UT1$ estimates w.r.t. IERS finals series of selected Intensive session types in 2022

type	#sess	$\Delta UT1$ [μs]	type	#sess	$\Delta UT1$ [μs]
XU	195	22 ± 33	VI	155	20 ± 18
XK (INT2)	82	19 ± 23	VB	34	30 ± 24
XK (INT3)	27	31 ± 22	VC	31	36 ± 29
XZ	52	22 ± 18	VJ	22	11 ± 9
MH	38	25 ± 25	VK	8	14 ± 11
R1	83	17 ± 16	R4	45	13 ± 12

Tab. 2: $\Delta UT1$ values (absolute bias and standard deviation) w.r.t. IERS finals series

On average, S/X (VGOS) Intensive sessions yield $UT1$ values with respect to the IERS finals series that are 57% (50%) worse than estimates provided by 24 hour sessions. Comparing the performance of IVS-INT-2 sessions and 24 hour sessions, the accuracy is reduced by only 26%, and in the case of VGOS-INT-A sessions, the estimates fit the IERS final series even better. In the worst case (IVS-INT-3 and VGOS-INT-C, respectively), the differences with respect to the IERS final series are 107% and 140% worse. However, the turnaround time for product delivery is reduced by approximately 38% – or when excluding the VB and VC sessions – even 63%.

5. EOP files at the Vienna VLBI Analysis Center

At the Vienna VLBI Analysis Center, we implemented an automated processing pipeline to analyze the Intensive sessions downloaded from CDDIS. In this process, potential problems with outliers and cable calibration are iteratively ad-

dressed to ensure an optimal and automated $UT1$ determination. Due to an in-house study on the effect of the accuracy of the a priori values on the $UT1$ estimation (see Kern et al (2022a; 2022b; 2023b)), Intensive sessions are now reprocessed after 3 to 4 weeks so that updated and estimated EOP are available at that time.

6. Conclusion

Compared to the usual 24 hour sessions, Intensive sessions have 57% lower accuracy for S/X and 50% for VGOS sessions on average. However, the shorter turnaround time for product delivery is critical for monitoring the highly variable Earth rotation and makes Intensive sessions an important tool.

References

- [1] Artz T, Leek J, Nothnagel A, Schumacher M (2012) VLBI Intensive Sessions Revisited. In: Seventh General Meeting (GM2012) of the international VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), pp 276–280

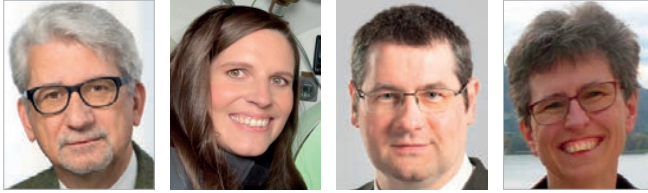
- [2] *Baver K, Gipson J (2014) Balancing Sky Coverage and Source Strength in the Improvement of the IVS-INT01 Sessions. In: Behrend D, Baver KD, Armstrong KL (eds) International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2014 General Meeting Proceedings: "VGOS: The New VLBI Network", Eds. Dirk Behrend, Karen D. Baver, Kyla L. Armstrong, Science Press, Beijing, China, ISBN 978-7-03-042974-2, 2014, p. 267-271*
- [3] *Baver K, Gipson J (2020) Balancing source strength and sky coverage in IVS-INT01 scheduling. Journal of Geodesy 94(2):18, DOI <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01343-1>*
- [4] *Baver K, Gipson J, Lemoine F (2023) The First Year of KOKKE12M-WETTZ13S VGOS Intensive Scheduling: Status and Efforts Towards Improvement. In: poster presented at the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) 2022 General Meeting, Helsinki, Finland, 28-31 March 2022*
- [5] *Böhm J, Hobiger T, Ichikawa R, Kondo T, Koyama Y, Pany A, Schuh H, Teke K (2010) Asymmetric tropospheric delays from numerical weather models for UT1 determination from VLBI Intensive sessions on the baseline Wettzell-Tsukuba. Journal of Geodesy 84:319-325, DOI <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0370-x>*
- [6] *Böhm J, Bolaño R, Garcia-Espada S, González J, Gruber J, Kronschnabl G, Neidhardt A, Phogat A, Plötz C, Schartner M, Schönemann E, Schüler T, de Vicente P (2018) European Intensive Sessions for the Estimation of UT1. In: IVS 2018 General Meeting Proceedings, pp 214-218*
- [7] *Böhm S, Böhm J, Gruber J, Kern L, McCallum J, McCallum L, McCarthy T, Quick J, Schartner M (2022) Probing a southern hemisphere VLBI intensive baseline configuration for dUT1 determination. Earth, Planets and Space, 74(118)*
- [8] *Bolotin S, Baver K, Bérubé M, Gipson J (2023) Automatic Processing of INT Sessions with nuSolve. In: IVS 2022 General Meeting Proceedings, Edited by Kyla L. Armstrong, Dirk Behrend, and Karen D. Baver*
- [9] *Corbin A, Niedermann B, Nothnagel A, Haas R, Haurert JH (2020) Combinatorial optimization applied to VLBI scheduling. Journal of Geodesy 94(2):19, DOI <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01348-w>*
- [10] *Geiger NP, Fey A, Dieck C, Johnson M (2018) Intensifying the Intensives with the VLBA. In: IVS 2018 General Meeting Proceedings, pp 219-222*
- [11] *Gipson J, Baver K (2015) Minimization of the UT1 Formal Error Through a Minimization Algorithm. In: Proceedings of the 22nd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting, URL http://www.oan.es/raege/evga2015/EVGA2015_proceedings.pdf*
- [12] *Gipson J, Baver K, Bolotin S, Lemoine F, Elosegui P, Ruszczyk C, Mondal D, Sargent A, Haftings P, Coughlin C, Plötz C, Schüler T, Neidhardt A (2023) Evaluation of KOKKE12M-WETTZ13S VGOS Intensives. In: IVS 2022 General Meeting Proceedings, Edited by Kyla L. Armstrong, Dirk Behrend, and Karen D. Baver*
- [13] *Haas R, Varenus E, Matsumoto S, Schartner M (2021) Observing UT1-UTC with VGOS. Earth, Planets and Space 73(78), DOI <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01396-2>*
- [14] *IVS (2022) Intensive Master Schedule 2022. <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/sessions/intensive/2022/> (accessed: 2022-05-02)*
- [15] *Kern L, Schartner M, Böhm J, Böhm S, Nothnagel A, Soja B (2022a) Impact of erroneous station coordinates on the estimation of UT1-UTC with VLBI Intensive sessions. Presented at the EGU General Assembly*
- [16] *Kern L, Schartner M, Böhm J, Böhm S, Nothnagel A, Soja B (2022b) The Impact of Erroneous a priori Information on the Estimation of UT1-UTC in VLBI Intensive Sessions. Presented at the 12th IVS General Meeting*
- [17] *Kern L, Schartner M, Böhm J, Böhm S, Nothnagel A, Soja B (2023a) Impact of the Source Selection and Scheduling Optimization on the Estimation of UT1-UTC in VLBI Intensive Sessions. In: IVS 2022 General Meeting Proceedings, Edited by Kyla L. Armstrong, Dirk Behrend, and Karen D. Baver*
- [18] *Kern L, Schartner M, Böhm J, Böhm S, Nothnagel A, Soja B (2023b) On the importance of accurate pole and station coordinates for VLBI Intensive baselines. submitted to JOGE*
- [19] *Landskron D, Böhm J (2019) Improving dUT1 from VLBI intensive sessions with GRAD gradients and ray-traced delays. Advances in Space Research 63:3419-3435, DOI <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.041>*
- [20] *Noll CE (2010) The crustal dynamics data information system: A resource to support scientific analysis using space geodesy. Adv Space Res 45(12):1421-1440, DOI <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>*
- [21] *Nothnagel A, Campbell J (1991) Polar motion observed by daily VLBI measurements. In: Proceedings of the AGU Chapman Conference on Geodetic VLBI: Monitoring Global Change; NOAA Technical Report NOS 137 NGS 49, Washington D.C., USA, pp 345-354*
- [22] *Rothacher M, Herring TA, Weber R (1999) Estimation of nutation using the Global Positioning System. J Geoph Res-Sol EA 104(B3):4835-4859*
- [23] *Schartner M, Kern L, Nothnagel A, Böhm J, Böhm S (2021) Optimal VLBI baseline geometry for UT1-UTC Intensive observations. Journal of Geodesy 95(75), DOI <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01530-8>*
- [24] *Schartner M, Petrov L, Plötz C, Lemoine F, Terrazas E, Herrera Pinzón I, Dorman J, Soja B (2022) VGOS VLBI Intensives between MACGO12M and WETTZ12M for the rapid determination of UT1-UTC. In: IAG International Symposium on Reference Frames for Application in Geosciences (REFAG 2022) Book of Abstracts, p 74*
- [25] *Shuygina N, Ivanov D, Ipatov A, Gayazov I, Marshalov D, Melnikov A, Kurdubov S, Vaselyev M, Ilin G, Skurikhina E, Surkis I, Mardyshkin V, Mikhailov A, Salnikov A, Vytynov A, Rakhimov I, Dyakov A, Olifirov V (2019) Russian VLBI network "Quasar": Current status and outlook. Geodesy and Geodynamics 10(2):150-156, DOI <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.09.008>*
- [26] *Uunila M, Nothnagel A, Leek J (2012) Influence of Source Constellations on UT1 Derived from IVS INT1 Sessions. In: Behrend D, Baver KD (eds) International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2012 General Meeting Proceedings, pp 395-399, URL <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2012/IVS-2012-General-Meeting-Proceedings.pdf>*

Contact

Dipl.-Ing. Lisa Kern, TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation, Research Unit Higher Geodesy, Wiedner Hauptstraße 8, A-1040 Wien, Austria.
E-Mail: lisa.kern@tuwien.ac.at

Ferndetektion von Felsstürzen in den Ostalpen

Remote Detection of Rockfalls in the Eastern Alps



Wolfgang Lenhardt, Maria-Theresia Apoloner, Helmut Hausmann und Alexandra Haberler, Wien

Kurzfassung

Immer öfter werden Felsstürze in den Ostalpen vom Österreichischen Erdbebendienst aufgezeichnet. Größere Felsstürze und Bergstürze können häufig über große Distanzen (> 100 km) registriert werden, da die heutigen Messgeräte wesentlich empfindlicher sind als jene vor 30 Jahren. Auch sind heute bedeutend mehr seismische Beobachtungsstationen im Einsatz. Basierend darauf nimmt die Anzahl der erfassten Felsstürze laufend zu. Inwieweit diese Zunahme auf den Anstieg der Jahresmitteltemperatur und dem Auftauen des Permafrostes in hochalpinen Lagen zurückzuführen ist, oder auf die Verdichtung des Beobachtungsmessnetzes, lässt sich derzeit noch nicht beantworten. Jedenfalls dient die sofortige Detektion von Felsstürzen der Sicherheit des alpinen Tourismus sowie der Unterstützung von Such- und Bergungsmaßnahmen.

Schlüsselwörter: Seismische Aufzeichnungen, Felsstürze, Statistik, Gefährdung

Abstract

Instrumental recordings of landslides or rockfalls became abundant during the recent past. Massive rockfalls or mountain slides are now recorded across vast distances – that is 100's of km away from the source. Hence, the number of recordings has heavily increased – which is mainly related to the improved density of seismic stations in the Eastern Alps and their sensitivity. Whether or not this observed increase can be linked to the retreat of permafrost remains to be investigated. However, rapid detection of such incidents may assist in search- and rescue operations and safeguarding hiking trails.

Keywords: Seismic recordings, rockfalls, statistics, hazard

1. Einleitung

Unter gravitativen Massenbewegungen versteht man hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Locker- und/oder Festgesteinsmassen aufgrund der Wirkung der Schwerkraft. Unter Bezugnahme auf die zugrundeliegenden Prozesse und die auslösenden Vorgänge ergeben sich unterschiedliche Klassifizierungsmöglichkeiten. Die in dieser Arbeit verwendete Einteilung stützt sich im Wesentlichen auf die auf Varnes (1978) und Cruden & Varnes (1996) zurückgehende prozessorientierte Klassifikation, welche nach dem bewegten Material (Locker- oder Festgestein) sowie dem Bewegungsablauf (Fallen, Kippen, Gleiten/Rutschen, Fließen, Driften) differenzieren. Der Einfachheit halber beschränkt sich hier die Differenzierung auf die Prozessgruppen Fließen (z.B. Hangmuren) und Gleiten/Rutschen (z.B. Hangrutschungen, Felsgleitungen) einerseits und die Prozessgruppe Stürzen (z.B. Felsstürze, Bergstürze) andererseits. Zu beachten ist, dass Felsstürze und Bergstürze in erster Linie aufgrund des involvierten Volumens

unterschieden werden. Erst bei Kubaturen von mehr als $1.000.000 \text{ m}^3$ – und einer Flächenausdehnung von mindestens 10 ha – spricht man nach Abele (1974) von Bergstürzen.

Als initialer Auslöser von Hangrutschungen oder Hangmuren spielt vielfach das Wasser (in Form von Regen oder Schnee) eine maßgebliche Rolle, wohingegen bei Sturzprozessen darüber hinaus markante jahres- wie tageszeitliche Temperaturunterschiede des Gesteins und der Frost-Tau-Wechsel eine wesentliche Komponente darstellen. Aber auch Erdbeben können solche „gravitativen Massenbewegungen“ auslösen (Harp & Wilson, 1995).

Plötzliche Hangbewegungen in Form von Felsgleitungen, Felsstürzen und erst recht Bergstürzen, können nicht nur die touristische Nutzung eines Gebietes beeinträchtigen, sondern vermögen auch Gebäude, Verkehrswege, das Leitungsnetz wie auch andere technische Einrichtungen und Bauwerke zu gefährden. Ein beredtes Beispiel hierfür ist die Katastrophe von Longarone im itali-

enischen Piavetal. Im Zuge der Füllung des Stausees Vajont war eine Gleitfläche an der Bergflanke des Monte Toc aktiviert worden, woraufhin in den Nachtstunden des 9. Oktober 1963 hunderte Millionen Kubikmeter Gestein in den Stauraum abglitten und eine Flutwelle auslösten, der ca. 2000 Menschen zum Opfer fielen (Barla & Paronuzzi, 2013).

Oft sind solche Ereignisse selbst aus größerer Entfernung – manchmal bis 200 km – von Erdbebenbeobachtungsstationen registrierbar. Dies ermöglicht binnen kürzester Zeit das Geschehen einzuschätzen und ggf. Rettungs- und Sicherungsmaßnahmen einzuleiten. Weiters lässt sich so die aus einem einzigen Abbruch oder einer Sequenz von unmittelbar aufeinanderfolgenden Abbrüchen bestehende Felssturzaktivität mit dem exakten Zeitpunkt dokumentieren. Dies ist speziell dann von Bedeutung, wenn das Ereignis unbeobachtet, weil beispielsweise in der Nacht und erst recht in siedlungsfernen Regionen, stattgefunden hat oder wenn es durch die Landesgeologie zu einer raschen Befundung der Abbruchstelle kommen soll.

2. Beobachtungen

Bereits in den 1970er Jahren befasste man sich ausführlich mit den Auswirkungen von Massenbewegungen im Sinne von Prozessgeschwindigkeiten (Scheidegger, 1973) als auch von deren Reichweite (Scheidegger, 1973; Tianchi, 1983; Evans & Hungr, 1993). Mit der Verfügbarkeit hochsensibler und digitaler seismischer Messgeräte sowie der zunehmenden digitalen Fotodokumentation hat eine neue Ära für die Erfassung von Massenbewegungen begonnen, insbesondere während der Verfügbarkeit einer Vielzahl an temporär installierten Stationen im Zuge von AlpArray (Fuchs, 2018a, 2018b).

Einer der ersten seismisch sehr gut dokumentierten Felsstürze ereignete sich am 12. Oktober 2007 um 09:39 Uhr Ortszeit am Einserkofel in den Sextener Dolomiten in Südtirol (Abbildung 1). Es bildete sich dabei eine dichte Staubwolke, die das gesamte Fischleintal erfüllte, jedoch Menschen verschonte. Trotzdem das Sturzvolumen nur ca. 60.000 m³ betrug, konnte das Ereignis noch in einer Distanz von 200 km von Messstationen des Österreichischen Erdbebendienstes erfasst



Abb. 1: Felssturz vom Einserkofel bei Sexten in Südtirol am 12. Oktober 2007. Foto: Dr. Jürgen Leikert

werden. Die sogleich erfolgte Lokalisierung wies mit 1 km-Genauigkeit auf den Einserkofel hin. Aus der Registrierung wurde dann eine Pseudo-Magnitude von 2,0 bestimmt. Der Terminus „Pseudo-Magnitude“ wird deshalb verwendet, weil es sich im engeren Sinn nicht um die klassische Magnitude eines tektonischen Erdbebens handelt (Richter, 1935), sondern um eine Maßzahl für die Dimension eines anders gearteten Verformungsprozesses. Zum besseren Verständnis und zur leichteren Vergleichbarkeit ordnet man ihr jedoch eine „Magnitude“ zu, so, als hätte es sich um ein tektonisches Erdbeben gehandelt.

Am 20. Juli 2011 kam es an derselben Stelle übrigens zu einem weiteren Felssturz. Die Kubatur betrug dabei laut Wikipedia aber lediglich 500 m³ (Einserkofel, 2022).

Als weiteres Beispiel dient der Felssturz bei Mellau (Vorarlberg) am 12. Februar 2018 um 21:02 Uhr Ortszeit. Er wies die Pseudo-Magnitude 0,6 auf. Die Aufzeichnung dieses Ereignisses (Abbildung 2) wurde ausgewählt, weil es das typische Seismogramm eines Felssturzes zeigt. Der Ersteinsatz ist undeutlich, das Signal „baut“ sich dann langsam auf, um danach wieder abzufallen. Das Signal ist also fast symmetrisch – und damit völlig untypisch für ein klassisches Erdbeben. Bei einem Erdbeben würde man den Ersteinsatz deutlich sehen. Diesem würde dann ein dominanter sekundärer Einsatz (Scherwelle) folgen. Aus der Zeitdifferenz könnte man anschließend die Entfernung vom Hypozentrum ableiten. Diese Signalstruktur fehlt hier völlig. Außerdem ist der dominante Anteil der Schwingungsfrequenz viel zu niedrig.

Oft wird eine gravitative Massenbewegung aber auch gar nicht registriert; wie z.B. am 4. Juli 2022. Am Nachmittag jenes Tages ereignete sich in der Iselschlucht bei Virgen, westlich von Matrei in Osttirol ein größerer Felssturz mit einer Kubatur von ca. 20.000 m³ (Iselschlucht, 2022). Obwohl die nächstliegende Erdbebenstation bei Abfallers-

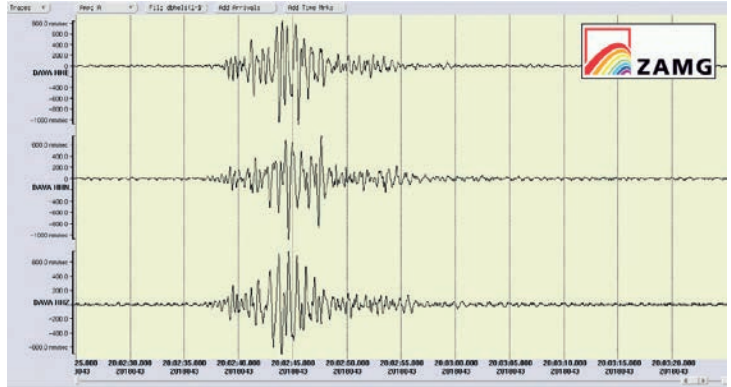


Abb. 2: Registrierung des Felssturzes bei Mellau (Vorarlberg) an der 8 km entfernten Station in Damüls

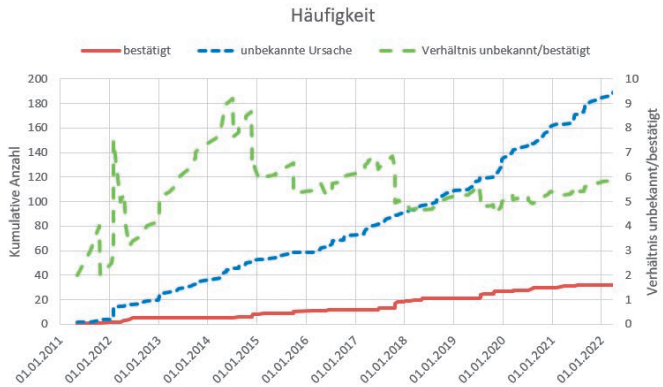


Abb. 3: Kumulative Anzahl von seismisch aufgezeichneten Massenbewegungen im Vergleich zu den Erschütterungsaufzeichnungen unbekannter Quellen. Die sekundäre Y-Achse zeigt das Verhältnis von unbekanntem zu bestätigten Felsstürzen.

bach im Drautal weniger als 30 km entfernt ist, waren dort keine auffälligen Erschütterungssignale erkennbar. Sichtlich war das Sturzvolumen zu gering oder der Sturzstrom zu langsam.

Damit stellt sich die Frage: Kam es zu einer Zunahme in den letzten Jahren? In Abbildung 3 ist die kumulative (!) Anzahl der seismischen Aufzeichnungen von Felsstürzen dargestellt. Da der kumulative Häufigkeitsverlauf nahezu linear verläuft, scheint kein rezenter Anstieg von Felsstürzen der Fall zu sein. Die Sprünge in den gezeigten Kurven sind hauptsächlich auf Verdichtungen des seismischen Erfassungsnetzes zurückzuführen. Das Verhältnis unbekannter Erschütterungsursachen zu bestätigten Felsstürzen ist grün strichliert dargestellt. Es variiert zwischen 2 und 9 mit einem Mittelwert von 5,56. Als Ursache werden hauptsächlich anthropogene Störungen (z.B. entfernte Sprengungen) vermutet.

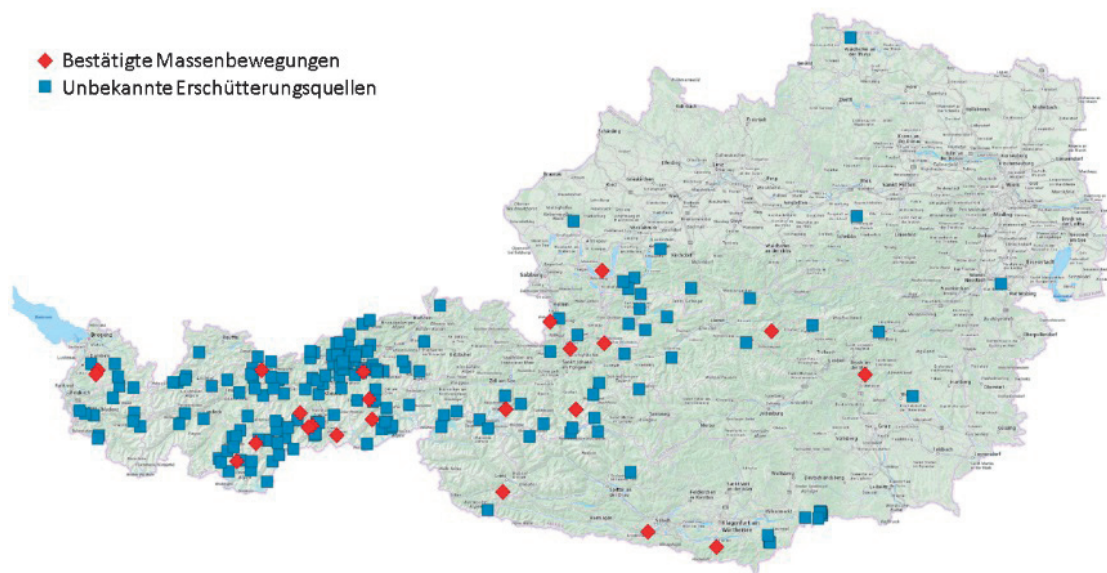


Abb. 4: Anzahl von seismisch aufgezeichneten und bestätigten Massenbewegungen (rot) im Vergleich zu den Erschütterungsaufzeichnungen unbekannter Quellen (blau)

In Abbildung 4 ist die räumliche Verteilung bestätigter Felsstürze (rot) und jene der unbekannteren Erschütterungsquellen (blau) dargestellt. Letztere konzentrieren sich hauptsächlich um Bereiche bestätigter Felsstürze. Es könnte also sein, dass es sich – wenigstens teilweise – um ferndetektierbare Massenbewegungen handelt. Anders besehen ist das Messnetz im Bereich bestätigter Felsstürze – vor allem in Tirol – relativ dicht.

3. Interpretation

Mit der Dynamik von Fels- und Bergstürzen haben sich bereits viele Autoren befasst (z.B. Erismann & Abele, 2001). Dazu zählt auch die Auslösung von Bergstürzen durch Erdbeben (u.a. Voigt & Pariseau, 1978; Keefer, 1984; Harp & Wilson, 1995; Brückl et al., 2015).

Darauf basierend wurden auch das Erdbeben 1348 (Hammerl, 1992), welches sich höchstwahrscheinlich im Friaul (Italien) ereignete, und der Bergsturz vom Dobratsch im Bundesland Kärnten (Till, 1907, Brandt, 1981) in Relation gesetzt. Dabei zeigte sich, dass ein Epizentrum in Friaul gerechtfertigterweise anzunehmen ist, somit der Terminus „Villacher Erdbeben 1348“ seit 1992 überholt erscheint. Jedenfalls hat das Erdbeben nicht nur mehrere Bergstürze im Gailtal hervorgerufen, sondern auch Angst und Schrecken, denn die Gesteinsmassen dürften mit einer Geschwindigkeit von bis zu 200 km/h ins Tal abgefahren

sein. Der ganze Prozess könnte nahezu zwei Minuten gedauert haben (Lenhardt, 2007).

Was das 21. Jahrhundert betrifft, so führt der fortschreitende Klimawandel sichtlich zu einem Rückgang des Permafrosts und somit zu einer erhöhten Steinschlaggefahr, was vorrangig alpinen Vereinen, anderen Wegehaltern (z.B. Gemeinden) sowie Hochalpinisten Sorge bereitet. Noch umfangreichere mediale Aufmerksamkeit erlangen besonders große bzw. mit erheblichem Schadensausmaß einhergehende gravitative Massenbewegungen, wie zum Beispiel der Bergsturz an der Nordflanke des Piz Cengalo (Cengalo, 2011) in den Bergeller Alpen im Kanton Graubünden an der Grenze der Schweiz zu Italien. Nachdem bereits am Abend des 27. Dezember 2011 an die zwei Millionen Kubikmeter Gestein in das hintere Val Bondasca gestürzt und im Jahr darauf Murgänge erst knapp vor dem Ort Bondo zum Stillstand gekommen waren, ereignete sich in den Vormittagsstunden des 23. August 2017 einer der größten Bergstürze der letzten Jahrzehnte in Graubünden. Dabei lösten sich rund drei Millionen m³ Gestein von der Flanke des Piz Cengalo und stürzten 1.500 Höhenmeter ins Bondascatal, was unmittelbar einen gewaltigen Murgang auslöste und Schäden im Ort Bondo verursachte. Dieses Ereignis wurde auch in Österreich mit einer Pseudo-Magnitude von 2,7 an den Bebenstationen registriert.

28	04.08.2012	11:23:00	Puitkogel (Nordflanke)/Hohe Geige (Ötztal Alpen)	http://www.youtube.com/watch?v=7UvQ2brlRr4	nur ungefähre Uhrzeit
29	24.08.2012		Vorderes Alpbjohr oberhalb Drischlsteig (Gde. Imst)	http://www.geoforum-umhausen.at/aktuelles2013/Tagungsband_2013.pdf	zwischen 20:00 und 21:00 Uhr
30	10.09.2012	7:35:00	NO-Grat des Kellersberges in der Glocknergruppe (Abbruchrisse in ca. 2760-2800 m SH)	http://www.youtube.com/watch?v=io2GwoCIWGs	Nachstürze
31	23.10.2012		Schattseite (Gde. Hopfgarten in Deferegggen)	http://www.osttirol-heute.at/videos/video/latest/felssturz-hopfgarten-i-d	gegen 08:30 Uhr
32	07.11.2012		Westflanke der Blässe am Vilsalpssee (Gde. Tannheim)	http://www.meinbezirk.at/reutte/chronik/meisger-felssturz-am-vilsalpssee-0397625	gegen 21:00 Uhr
33	25.11.2012	11:29:04	Nenninger Himmel	1,0	
34	29.04.2013		Ingelsberg, Gde. Bad Hofgastein	http://www.slomove.eu/de/news.asp?aktuelles_action=3000&aktuelles_image_id=7	Sturzereignisse auch ab 21.07.2012, im Juni 2010, f
35	13.05.2013	23:38:00	oberhalb der Schildalmgalerie an der Felbertauernstraße (Gde. Matri in Osttirol)	http://www.geoforum-umhausen.at/aktuelles2013/Tagungsband_2013.pdf	
36	24.07.2013		Hohe Warte - NO-Flanke (Gde. Vals)	http://tirol.orf.at/news/stories/259495/	am Nachmittag
37	10.07.2014		umweit der Tappenkalm (Gde. Kleinarl)	http://salzburg.orf.at/news/stories/2657033/	
38	13.07.2014	9:34:21	Lienzer Dolomiten	0,4	
39	27.08.2014		Großes Fleißtal (Gde. Heiligenblut)	https://www.youtube.com/watch?v=YN1YEDhoo	Datum unsicher
40	24.05.2015	19:45:00	Pletzackkogel (Gde. Kramsach)	http://www.kramsach.at/system/web/GeoDocument.ashx?fileid=954974	Uhrzeit nicht auf die Minute genau
41	16.11.2014		Rabenstein im Passeiertal (Südtirol)	https://www.youtube.com/watch?v=Sj2xqKJdJaw	
42	24.11.2014	16:27:20	Trins	1,5	
43	25.11.2014	2:48:39	Neustift im Stubaital	0,7	
44	16.01.2015	19:22:50	Fürnitz	1,0	
45	16.01.2015	19:23:00	Rote Wand am Dobratsch	http://www.kleinezeitung.at/kr/kaernten/villach/4652325/DOBRTSCH_Eine-Steinernen-Spur-der-Verwüstung	
46	30.09.2015	20:30:18	Schwarz	0,0	
47	30.09.2015		Eiblschrofen (Gde. Schwarz)	https://www.tirol.gv.at/meldungen/meldung/artikel/ersteinschuetzung-der-landesgeologie-keine-gefahr-fuer-siedlungsraum/	
48	02.10.2015	15:58:56	Sölden	1,2	
49	02.10.2015		Schartlaskogel (Ötztal Alpen)	https://www.tt.com/panorama/natur/10657382-91/%C3%96stztaler-felssturz-kam-einem-erdbeben-gleich.cssp	

Abb. 5: Beispiel aus der Datenbank der ehemaligen Geologischen Bundesanstalt (GBA). In „rot“ bestätigte seismische Aufzeichnungen.

Ein Felssturz im Pöllestal bei Sölden (Pöllestal, 2015) am 2. Oktober 2015 mit einem Sturzvolumen von 200.000 m³ führte hingegen lediglich zu einer Pseudo-Magnitude von 1,2. Im Vergleich dazu betrug die Pseudo-Magnitude vom bereits erwähnten Einserkofel 2,0 bei einem Sturzvolumen von ca. 60.000 m³. Man sieht also, dass man aus der Pseudo-Magnitude das Sturzvolumen nicht allein abschätzen kann. Darauf wies u.a. Fuchs et al. (2018a & 2018b) im Detail hin. Das mag enttäuschend sein, deutet aber auf das komplexe Prozessgeschehen bei gravitativen Massenbewegungen hin. Es bedarf folglich zusätzlicher Information und zum anderen exzellenter Simulationsprogramme, die möglichst viele Einflussgrößen – wie lokale Änderungen der geomechanischen Oberflächenrauigkeit (z.B. durch Sturzströme oder Murenablagerungen) – berücksichtigen können. Eine Alternative bietet Manconi et al. (2016) an, nämlich die Verwendung der in Italien gängigen Duration-Magnitude, welche die Länge der seismischen Aufzeichnung oberhalb einer bestimmten Aufzeichnungsgrenze berücksichtigt. Die erwähnten Autoren fanden, dass ein „ML/MD“ (Verhältnis der lokalen Magnitude zur „Duration Magnitude“) von weniger als 0,8 zu einer guten Unterscheidung zwischen tektonischen Erdbeben und gravitativen Massenbewegungen führt. Weil die „MD“ in Österreich keine Anwendung findet – da sie nicht der Definition It. Richter (1935) entspricht – sind solche Vergleiche noch ausständig.

Das Detektionslimit von Fels- und Bergstürzen hängt vom Felssturzvolumen, der Prozess- bzw. Fließgeschwindigkeit, der Topografie und der Stationsdichte ab. Ein genaues Limit ist daher situationsbedingt und lokal sehr unterschiedlich. Wichtig erscheinen Abgleiche mit Beobachtungen vor Ort. Deshalb stand der Erdbendienst auch seit vielen Jahren laufend im Austausch mit der Geologischen Bundesanstalt (Abbildung 5).

Als initiale Auslöser der gravitativen Massenbewegungen bieten sich in erster Linie meteorologische Randbedingungen wie die Niederschlagsintensität (s.a. Krautblatter & Moser, 2009) oder die Saisonalität (s.a. Bajni et al., 2021) an, wenngleich auch bei Heranziehung dieses Kriteriums sehr starke regionale Unterschiede in der Steinschlag-Felssturz-Statistik in Abhängigkeit zur Geologie (z.B. Delonca et al., 2014; Glade, et al., 2001) ausführlich dokumentiert wurden. Es liegt auf der Hand, dass der Beschaffenheit der Oberfläche (z.B. Glade, 2005) eine maßgebliche Rolle zukommt.

Der Permafrostrückgang führt höchstwahrscheinlich zu einer verstärkten Felssturzaktivität, wie dies von Savi et al. (2021) in den italienischen Ostalpen – insbesondere seit 2010 (möglicherweise angedeutet ein Jahr später in den Ostalpen Österreichs in Abbildung 3) – beobachtet wurde. Die Klimaerwärmung reduziert demzufolge die Hangstabilitäten in hochalpinen Lagen, wo die Permafrostgrenze um ca. 300 m angestiegen ist. Sie steht auch durch in ursächlichem Zusammen-

hang mit dem Gletscherrückgang, und der damit einher gehenden Exposition und Destabilisierung der Talflanken. Damit erhöht sich auch das Gefahrenpotential für den immer weiter ins Hochgebirge vordringenden alpinen Tourismus, beispielsweise in Form von vermehrt auftretenden Steinschlägen. Daraus resultieren mehr Einsätze der Bergrettung. Der Anstieg um das Dreifache während der letzten Jahre (s.a. Bergrettung, 2022) war jedoch trotz allem zumeist der Unerfahrenheit der Touristen und der dem Hochgebirge nicht angepassten Ausrüstung geschuldet.

4. Schlussfolgerungen

Gefährdete Bereiche können im Detail durch oberflächenseismische (Glade et al., 2005) und mit Hilfe geomagnetischer und geoelektrischer Untersuchungen hinsichtlich potenzieller Gleithorizonte (z.B. Gallistl et al., 2018) eingegrenzt werden. Das aber ist in der Praxis oft nur sehr schwer möglich. Praktischer erscheinen detailhafte Topografieerfassungen, die Abgrenzungen der alpinen Permafrostverbreitung und Modellberechnungen hinsichtlich der Mobilisierung von Gesteinsmassen durch Niederschlag. Eine genaue Untersuchung ist für den Ostalpenraum noch ausständig.

Das Hauptproblem bei der Gefahreinschätzung liegt in der nahezu metergenauen topografischen Erfassung zusammen mit der – wenigstens stundengenauen – Niederschlagssituation (Intensität und Summen bzw. Verteilung) und den lokalen geologischen Gegebenheiten, denn diese Genauigkeiten sind verständlicherweise kaum zu erreichen. Dies führt in der Praxis zu relativ ungenauen Angaben bezüglich gefährdeter Bereiche.

Praktisch gesehen ist gegenwärtig die schnelle, weil meist anwendbare Ferndetektion von Fels- und Bergstürzen vorrangig, da diese im Bedarfsfall zu einer frühest möglichen Einleitung von Rettungs- und Bergungsmaßnahmen führt. Dafür erscheint es notwendig automatische Detektionsalgorithmen – wie Hidden Markov Models, Autoregressive Prediction (Fuchs, 2018a) und/oder die Duration Magnitude „MD“ (Marconi u.a., 2016) – zu entwickeln, die umso besser funktionieren, je mehr zuverlässige Erdbeben-Messstationen verfügbar sind. Natürlich müssen solche Algorithmen auch verschiedene seismische Frequenzbänder und alle drei Komponenten berücksichtigen.

Einen zusätzlichen Nutzen der Auswertung von Fels- und Bergsturzereignissen stellt die Sammlung von Hinweisen auf prähistorische Erdbeben

dar. Eine prähistorische Rückverfolgung von gravitativen Massenbewegungen, die Rückschlüsse auf mögliche stärkere Erdbeben in der Vergangenheit erlaubt (s.a. Crozier, 1991, Daxer et al., 2022), kann nämlich für langfristige Erdbebengefährdungsbestimmungen verwendet werden. Solche Untersuchungen dienen der Verbesserung der erdbebengerechten Bauweise im Alpenraum.

Die Fusion der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) mit der Geologischen Bundesanstalt (GBA) ab 1.1.2023 zur GeoSphere Austria (GSA) fördert die Zusammenarbeit auf diesem sehr wichtigen Untersuchungsgebiet.

Eine gekürzte Version dieses Beitrags wurde im Tagungsband des Geoforums Tirol 2022 veröffentlicht.

Referenzen

- Abele, G. 1974:* Bergstürze in den Alpen, ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen (= Wissenschaftliche Alpenvereinshefte. Bd. 25, ISSN 0084-0912). Deutscher Alpenverein, München 1974, S. 21, (Zugleich: Karlsruhe, Universität, Habilitationsschrift, 1972).
- Bajni, G., Camera, C.A.S. & Apuani, T. 2021:* Deciphering meteorological influencing factors for Alpine rockfalls: a case study in Aosta Valley. Landslides, DOI: 10.1007/s10346-021-01697-3.
- Barla, G. & Paronuzzi, P. 2013:* The 1963 Vajont Landslide. 50th Anniversary. In: Rock Mechanics and Rock Engineering. Band 46, Nr. 6, 26. September 2013, 1267–1270, doi:10.1007/s00603-013-0483-7.
- Bergrettung 2022:* <https://www.bergrettung-innsbruck.at/category/einsatz-2/>; abgerufen am 26.7.2022.
- Brandt, A. 1981:* Bergstürze an der Villacher Alpe (Dobratsch)/Kärnten/Österreich. Unpubl. Diss., Universität Hamburg, Deutschland.
- Brückl, E., Binder, D. & Merti, St. 2015:* Seismic Sources from Landslides and Glaciers. Encyclopedia of Earthquake Engineering, DOI: 10.1007/978-3-642-36197-5_385-1, 34 Seiten.
- Cengalo 2011:* https://de.wikipedia.org/wiki/Bergsturz_von_Bondo; abgerufen am 19.12.2022.
- Crozier, M.J. 1991:* Determination of palaeoseismicity from landslides. Proc. of 6th International Symposium on „Landslides - Glissements de terrain“, Balkema, D.H. Bell (ed.), Vol.1, 1992, 1173–1180.
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996):* Landslide Types and Processes. – In: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Eds.): Landslides, Investigations and Mitigation. – Transportation Research Board, Special Report, 247, 36–75, Washington (National Academies of Sciences, Engineering, Medicine).
- Daxer, Ch., Ortler, M., Fabbri, S.C., Hilbe, M., Hajdas, I., Dubois, N. Piechl, T., Hammerl, Ch., Strasser, M. & Moernaut, J. 2022:* High-resolution calibration of seismically-induced lacustrine deposits with historical earthquake data in the Eastern Alps (Carinthia, Austria). Quaternary Science Reviews, Volume 284, 2022, 107497, ISSN 0277-3791, DOI: 10.1016/j.quascirev.2022.107497, 23 Seiten.

- Delonca, A., Gunzburger, Y. & Verdell, T. 2014: Statistical correlation between meteorological and rockfall databases. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1953–1964, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/1953/2014/
- Einserkofel 2022: <https://de.wikipedia.org/wiki/Einserkofel>; abgerufen am 26.7.2022.
- Erismann, T.H. & Abele, G. 2001: Dynamics of Rockslides and Rockfalls. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 120 Abb., 10 Tabellen, 316 Seiten.
- Evans, S.G. & Hungr, O. 1993: The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 620–636.
- Fuchs, F., Lenhardt, W., Hibert, C., Bokelmann, G. & AlpArray Working Group 2018a: Searching fore- and afterslides of gravitational mass movements. Tagung der European Seismological Commission in Malta.
- Fuchs, F., Lenhardt, W., Bokelmann, G. & the AlpArray Working Group 2018b: Seismic detection of rockslides at regional scale: examples from the Eastern Alps and feasibility of kurtosis-based event location, *Earth Surf. Dynam.*, 6, 955–970, DOI: 10.5194/esurf-6-955-2018.
- Gallistl, J., Wigand, M., Stumvoll, M., Ottowitz, D., Glade, T. & Flores Orozco, A. 2018: Delineation of subsurface variability in clay-rich landslides through spectral induced polarization imaging and electromagnetic methods. *Engineering Geology* 245 (2018) 292–308.
- Glade, T. 2005: Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. *Geomorphology* 66 (2005) 189–213.
- Glade, T., Kadereit, A., Dikau, R. 2001: Landslides at the Tertiary Escarpments of Rheinhessen, Germany. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl.* Vol. 125. pp. 65–92.
- Glade, T., Stark, P., Dikau, R. 2005: Determination of potential landslide shear plane depth using seismic refraction – a case study in Rheinhessen, Germany. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 64 (2), 151–158, DOI: 10.1007/s10064-004-0258-1.
- Hammerl, Ch. 1992: Das Erdbeben vom 25.Jänner 1348 - Rekonstruktion des Naturereignisses. Unpubl. Diss., Universität Wien.
- Harp, E.L. & Wilson, R.C. 1995: Shaking Intensity Thresholds for Rock Falls and Slides: Evidence from the Whittier Narrows and Superstition Hills Earthquake Strong Motion Records. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85, 1739–1757.
- Iselschlucht 2022: https://www.kleinezeitung.at/kaernten/osttirol/6161340/Felssturz-in-die-Isel_Vermessungsspiegel-sollen-weitere-Abbrueche; abgerufen am 2.12.2022.
- Keefer, D.K. 1984: Landslides caused by earthquakes. *Bull. Geol. Soc. Am.* 95, 406–421.
- Keefer, D.K. & R.C. Wilson, R.C. 1989: Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments. In ‚Landslides in a Semi-Arid Environment‘, Inland Geological Society, P.M. Sadler & D.M. Morton (eds.), Vol.2, 118–149.
- Krautblatter, M. & Moser, M. 2009: A nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1425–1432.
- Lenhardt, W.A. 2007: Earthquake triggered landslides in Austria – Dobratsch revisited. *Jb. Geol. B.-A.*, Band 147, Heft 1+2, S. 193–199, 5 Abb., Wien.
- Manconi, A., Picozzi, M., Coviello, V., De Santis, F. & Elia, L. 2016: Real-time detection, location, and characterization of rockslides using broadband regional seismic networks. *Geophysical Research Letters* 43(13), DOI: 10.1002/grl.54655.
- Pöllestal 2015: <https://www.tt.com/artikel/10657382/oetztaeler-felssturz-kam-einem-erdbeben-gleich>; abgerufen am 22.12.2022.
- Richter, C.F. 1935: An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.25, 1-32.
- Savi, S., Cimiti, F. & Strecker, M.R. 2021: Pronounced increase in slope instability linked to global warming: A case study from the eastern European Alps. *Earth Surf. Process. Landforms*. Vol. 46: 1328–1347, DOI: 10.1002/esp.100.
- Scheidegger, A.E. 1973: On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*, 5, 231–236.
- Tianchi, L. 1983: A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall. *Z. Geomorph.*, N.F., 27, 473–482.
- Till, A. 1907: Das große Naturereignis von 1348 und die Bergstürze des Dobratsch. In den Mitteilungen der K.k. Geographischen Gesellschaft, Bd.50, Wien, 535–645.
- Varnes, D.J. 1978: Slope movement types and processes. – In: Schuster, R.L. & Krizek, R.J. (Eds.): Landslides, analysis and control. – Transportation Research Board Special Report, 176, 11–33, Washington (National Academies of Sciences, Engineering, Medicine).
- Voight, B. & Pariseau, W.G. 1978: Rockslides and avalanches: An introduction. Publ. in „Rockslides and avalanches“, 1–63.

Anschrift der Autor:innen

Univ.-Doz. Dr. Wolfgang Lenhardt, Formanekgasse 1A/3/1, A-1190 Wien.

E-Mail: wolfgang.lenhardt@gmail.com

Dipl.-Ing.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Maria-Theresia Apoloner, GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien.

E-Mail: maria-theresia.apoloner@geosphere.at

Dipl.-Ing. Helmut Hausmann, GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien.

E-Mail: helmut.hausmann@geosphere.at

Mag.^a Alexandra Haberler, GeoSphere Austria, Neulinggasse 38, 1030 Wien.

E-Mail: alexandra.haberler@geosphere.at

GGOS Contribution to Promote Geodesy and Increase its Visibility in Science and Society

Der Beitrag von GGOS zur Erhöhung der Bedeutung der Geodäsie in Wissenschaft und Gesellschaft



Martin Sehnal, Wien, Detlef Angermann, München, Laura Sánchez, München and Basara Miyahara, Tsukuba

Abstract

The Global Geodetic Observing System (GGOS) of the International Association of Geodesy (IAG) is a collaborative contribution of the global geodesy community to the observation and monitoring of the Earth System. Geodetic observation techniques and analysis infrastructures, as well as high-quality geodetic products, provide the basis for advances in Earth and planetary system sciences and for various applications. One main objective of GGOS is to support activities and initiatives to communicate the value of Geodesy to science and society, as well as contribute to understand and solve complex issues facing the global geodetic community. This article describes the efforts GGOS has made in recent years and the plans for the future to raise awareness of the important value of Geodesy.

Keywords: GGOS, Geodesy, portal, outreach, website

Kurzfassung

GGOS ist das weltweite geodätische Beobachtungssystem der internationalen Vereinigung für Geodäsie (IAG). Die darin weltweit tätigen Geodäten stellen einen wesentlichen Beitrag zur Beobachtung und Überwachung des Systems Erde dar. Geodätische Beobachtungstechniken und Analyseinfrastrukturen, sowie daraus generierte hochwertige geodätische Produkte, bilden eine essentielle Grundlage für die Erforschung des Erdsystems und für verschiedenste Anwendungen. Ein wichtiges Ziel von GGOS ist es, die große Bedeutung der Geodäsie für Wissenschaft und Gesellschaft hervorzuheben und zum Verständnis und zur Lösung komplexer Probleme der globalen geodätischen Gemeinschaft beizutragen. In diesem Artikel werden die Errungenschaften von GGOS in den letzten Jahren, welche wesentlich zur Verbesserung der Sichtbarkeit der Geodäsie beigetragen haben, und die zukünftigen Pläne vorgestellt.

Schlüsselwörter: GGOS, Geodäsie, Portal, Öffentlichkeitsarbeit, Webseite

1. Introduction

Geodesy is the science of determining the shape of the Earth, its gravity field, and its rotation as functions of space and time. A prerequisite for achieving this goal are stable and consistent geodetic reference frames. They form the basis for determining the time-dependent coordinates of points or objects and for describing the motion of the Earth in space. With modern instruments and analysis techniques, Geodesy is able to detect temporal variations from large and secular scales to very small and transient deformations - with increasing spatial and temporal resolution, high accuracy, and decreasing latency.

The Global Geodetic Observing System (GGOS) is a joint contribution of the global Geodesy community to the observation and monitoring of the Earth System. GGOS seeks to facilitate and enable the production and exchange of Earth observations needed to monitor, map, and understand changes in the Earth's shape, rotation, and mass distribution. GGOS also advocates the global geodetic frame of reference as the fundamental backbone for measuring and consistently interpreting global change processes as well as the essential geospatial infrastructure to ensure a homogeneous and sustainable development worldwide.

GGOS works closely with its parent organization, the International Association of Geodesy (IAG), to ensure the sustainability of these fundamental geodetic contributions. The IAG Services provide the infrastructure and products on which all GGOS contributions are based, and IAG Commissions and IAG Inter-Commission Committees provide expertise and support in addressing important scientific issues within GGOS (Figure 1).

In addition, GGOS supports the IAG by strengthening external and interdisciplinary relationships and contributions to the broader geospatial information community, including relevant United Nations (UN) groups, in particular the UN Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM), its Subcommittee on Geodesy, and the newly established UN Global Geodetic Center of Excellence (UN-GGCE), which became operational in 2023. The main contribution of GGOS in this regard is to support actions and initiatives to communicate the value of Geodesy to society and to contribute to the understanding and solving of complex issues facing the global geospatial community.

2. GGOS Coordinating Office

GGOS is administratively managed by the Coordinating Office, which is located at the Federal Office of Metrology and Surveying (BEV – Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) in Austria. The Director of the GGOS Coordinating Office supports the Executive Committee, the Coordination Board and the Scientific Panel as well as he ensures the coordination of the activities of the various GGOS components such as the Bureau for Products and Standards (BPS), the Bureau for Networks and Observations (BNO) and the GGOS Focus Areas (Figure 1).

The Coordinating Office ensures the flow of information, maintains documentation of GGOS activities, and manages specific support functions that enhance harmonization across all areas of GGOS, including interaction with other IAG components and organization/support of scientific and business meetings. In its long-term coordination role, the Coordinating Office secures that the GGOS components contribute consistently and continuously to GGOS and its stakeholder community. The Coordinating Office also

maintains, manages, and coordinates the GGOS web and social media presence, as well as public outreach and external engagement [1].

On behalf of the GGOS community, the Coordinating Office handles external relations and collaboration with stakeholder organizations such as the Group on Earth Observations (GEO), the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS), and the International Science Council (ISC) World Data System (WDS). In this capacity, the Office also seeks opportunities to link Geodesy with relevant United Nations frameworks and other engagement tools, such as the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction and the UN-GGIM and World Bank Integrated Geospatial Information Framework.

The Coordinating Office is also working to identify opportunities for improved coordination and advocacy within the geodetic community and has established the Working Group on “Digital Object Identifiers (DOIs) for Geodetic Data Sets” in 2019. This working group consists of more than 20 members associated with IAG Services who are working to establish usage parameters and advocate for consistent implementation of DOIs across all IAG Services and the larger geodetic community.

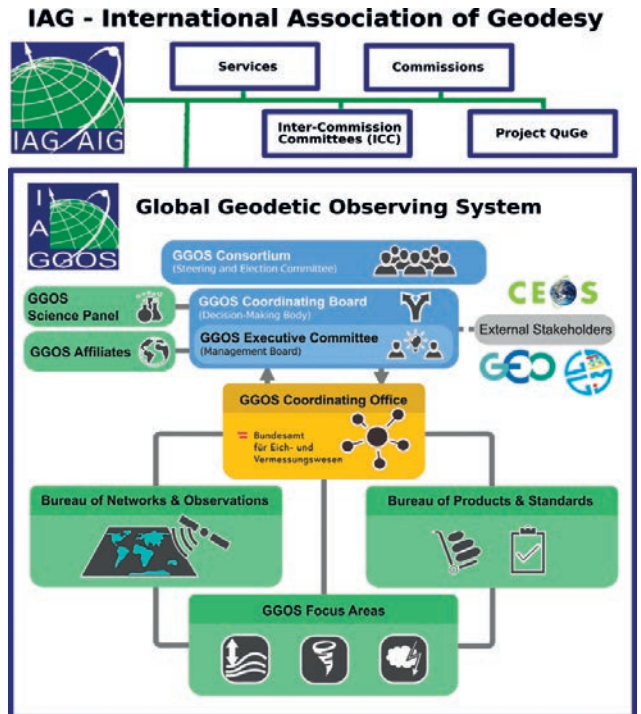


Fig. 1: Organizational structure of IAG and GGOS

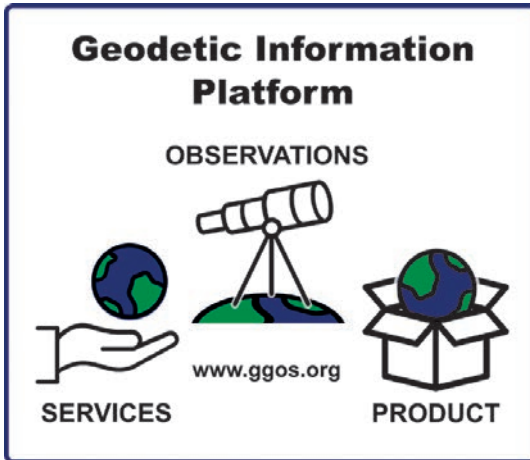


Fig. 2: Geodetic Information Platform www.ggos.org

3. GGOS Information Platform

Towards the GGOS objective to support activities and initiatives to communicate the value of Geodesy to science and society, GGOS has established and maintains its website www.ggos.org, which serves as a point of entry to Geodesy to facilitate discoverability and usability of geodetic data and products.

The redesigned GGOS website, released in December 2020, presents detailed insights of the IAG's geodetic observing system and shows

how the GGOS organization is structured. In this process, the website is continually enhanced to provide a comprehensive information platform (Figure 2) that focuses on the IAG's observations (ggos.org/obs), geodetic products (ggos.org/products), and IAG Services (ggos.org/services). Visually appealing graphics (Figure 3) guide the user to easy understandable introductions about geodetic products or observing techniques (Figure 4). The descriptions of observations and products are complemented by a large selection of web links containing scientific descriptions and data repositories provided by the IAG Services and additional data sources.

The GGOS Coordinating Office, as the primary organizational unit responsible for the GGOS website, has worked extensively with members of the GGOS Bureau of Products and Standards (BPS) [2], the GGOS Bureau of Networks and Observations (BNO), the GGOS Science Panel, and other key persons in the geodetic science community to establish and launch this information platform. The contributions of the IAG Services and other providers of geodetic products are gratefully acknowledged. The GGOS website contributes to make Geodesy more visible and to promote IAG and GGOS at global and multidisciplinary levels.

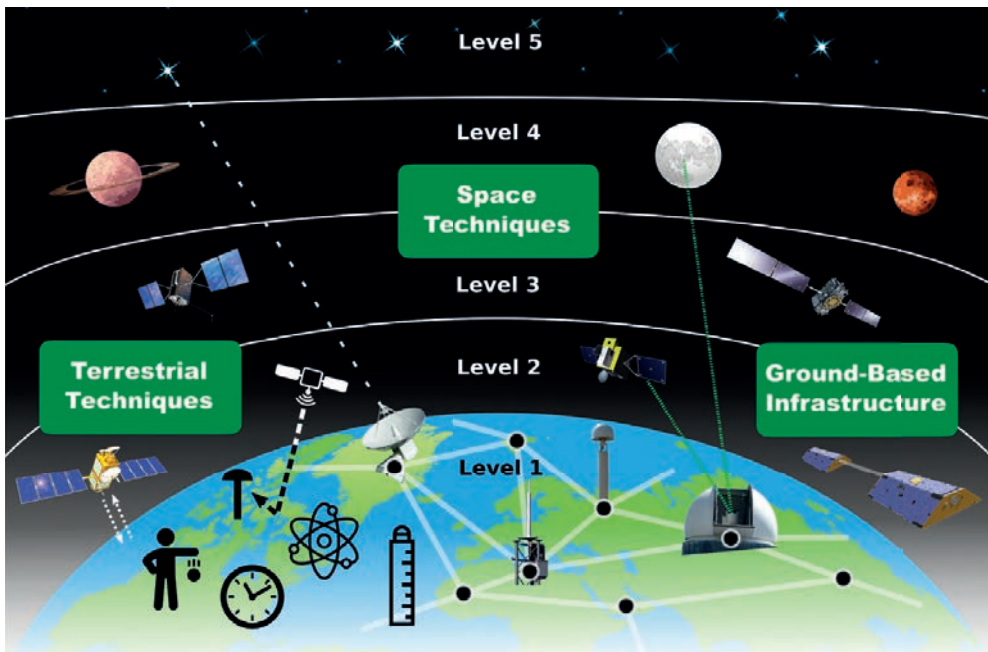


Fig. 3: Overview graphic of geodetic observation techniques on the GGOS website ggos.org/obs/

GGOS
Global Geodetic Observing System

About | Observations | Services | Products | Events | Blog | Q | [Social Media Icons]

Height Reference Frame

What is a height above sea level?

A height system is a **one-dimensional coordinate system** used to express the metric distance (height) of a **point above a reference surface** (i.e., the zero-height level). Traditionally, the reference surface is linked to the **mean sea level** and the heights are determined using **geodetic levelling techniques**. These techniques measure the distance between two **equipotential or level surfaces** of the **Earth's gravity field** and provide the height along the curved plumb line. The mean sea level serving as the zero-height level is inferred from averaged **tide gauge records** over certain time intervals and the heights are determined along the so-called vertical or levelling networks. As the tide gauges register the local sea level and the vertical networks cover limited regions, these systems are known as local height systems. Presently, there are about **hundred local and regional height systems** in use, and they exhibit discrepancies with respect to each other up to ± 2 m.

PRODUCTS

Reference Frames

- Height Reference Frame
- Celestial Reference Frame
- Gravity Reference Frame
- Terrestrial Reference Frame

Earth Orientation

- Earth Orientation Parameters

Geometry

- Surface Deformation Models

Local zero-height levels (A and B) depending on the mean sea level registered at individual tide gauges and the global zero-height reference level defined by the International Height Reference System (IHRF) and its realisation, the International Height Reference Frame (IHRF).

Fig. 4: Example of a product description on the GGOS website: “Height Reference Frame”

4. GGOS Film “Discover GGOS and Geodesy”

In public relations, it is important to reach the target audience through different channels and media. In addition to the existing social media channels Twitter (@IAG_GGOS), LinkedIn (iag-ggos) and Facebook (iagGGOS), GGOS has started to reach more people by launching a YouTube channel (youtube.com/@iag-ggos) in 2021 to provide existing and self-produced videos about Geodesy.

To introduce the Global Geodetic Observing System and explain the value of Geodesy to non-geodesists, the GGOS Coordinating Office recently worked together with key people of GGOS to produce a short film (Figure 5) entitled “Discover GGOS and Geodesy” [3]. With the volunteer support of many people in the geodetic community, the worldwide coverage of this film has been extended through translations into 11 languages. The GGOS film is now available in English, Spanish,

French, Arabic, Portuguese, German, Farsi, Japanese, Italian, Dutch and Bulgarian. The fact that all versions of this film together have been viewed more than 11,000 times as well as the many positive comments show the great interest in such videos. Motivated by this success and to intensify its outreach activities, GGOS will create more videos in the future to explain geodetic products and observation techniques.



Fig. 5: GGOS film “Discover GGOS and Geodesy” [3]

5. GGOS Portal – Unique Access Point for Geodetic Data and Products

The IAG Services provide very important and valuable geodetic data, information, and data products that are increasingly relevant for Earth System research, including monitoring of global change phenomena and a wide range of diverse applications such as satellite navigation, surveying, mapping, engineering, geospatial information systems, and so on.

Currently, it is difficult for many people to obtain an overview of all available geodetic products and data. GGOS aims to fill this gap by developing the GGOS Portal (ggos.org/portal), which will serve as a unique search and access point (one-stop shop) for geodetic data and products [4] (Figure 6). Data and products will be described by detailed metadata and remain physically located at their originating data centers of each contributing IAG Service and other data providers. In the long term, the GGOS Portal will provide a set of tools for organized knowledge search, including visualization to support identification and selection of appropriate resources (information, data, products).

In general, geodetic data portals are a dime a dozen. However, the GGOS portal will be much more than just a data portal for geodetic data from the IAG Services. The combination of the easy understandable descriptions of products and observation techniques with this comprehensive source of detailed geodetic metadata makes the future GGOS portal unique.

Presently, the GGOS Coordinating Office is working on the implementation of the GGOS Portal together with the Technical University of Vienna (TU Wien). To get an overview of the current availability of data products and their metadata, GGOS conducted a survey within the geodetic and geoscience community. This survey also inquired the opinions of geodetic data users on data availability and visibility, as well as desired requirements for a comprehensive and user-friendly GGOS Portal.

With this future platform and all other outreach initiatives, GGOS will help to increase the visibility of geodetic data for scientific research and raise awareness of Geodesy and its useful products to other disciplines and society.



Fig. 6 : Logo of the GGOS Portal ggos.org/portal

References

- [1] Sehnal, Martin (2022). GGOS Coordinating Office – Outreach and Education. Presentation at GGOS Days 2022, Munich, Germany. doi.org/10.5281/zenodo.7321807
- [2] Angermann, Detlef et al. (2022). GGOS Bureau of Products and Standards: Description and Promotion of Geodetic Products. In: International Association of Geodesy Symposia. Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/1345_2022_144
- [3] Sehnal, Martin et al. (2022). Discover GGOS and Geodesy. Film available at YouTube: youtube.com/@iag-ggos - doi.org/10.5446/56288
- [4] Sehnal, Martin (2022). GGOS-Portal – Revival of a Metadata Platform. Presentation at GGOS Days 2022, Munich, Germany. doi.org/10.5281/zenodo.7321835

Contacts

Dipl.-Ing. Martin Sehnal, Director of GGOS Coordinating Office, BEV - Federal Office of Metrology and Surveying, Division Surveying Service, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Vienna, Austria.

E-Mail: martin.sehnal@bev.gv.at

Dr.-Ing. Detlef Angermann, Director of GGOS Bureau of Products and Standards, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technical University of Munich (DGFI-TUM), Arcisstraße 21, 80333 Munich, Germany.

Email: detlef.angermann@tum.de

Dr.-Ing. Laura Sánchez, Vice-President of GGOS, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technical University of Munich (DGFI-TUM), Arcisstraße 21, 80333 Munich, Germany.

Email: lm.sanchez@tum.de

Basara Miyahara, President of GGOS, GSI - Geospatial Information Authority of Japan 1, Kitasato, Tsukuba 305-0811, Japan.

Email: miyahara-b96ip@mlit.go.jp

Veranstungskalender

International Symposium on Digital Earth (ISDE)

11.06. – 14.06.2023 Athen, Griechenland
<https://pcoconvin.eventsair.com/isde23>

International Conference on Cartography & GIS

22.06. – 23.06.2023 London, Großbritannien
<https://waset.org/cartography-and-gis-conference-in-june-2023-in-london>

FOSS4G-Europe

26.06. – 02.07.2023 Prizren, Kosovo
<https://2023.foss4g.org/>

GI_Salzburg (AGIT)

04.07. – 06.07.2023 Salzburg, Österreich
<https://gi-salzburg.org/de/>

ESRI USER CONFERENCE

10.07. – 14.07.2023 San Diego, CA, USA
<https://www.esri.com/en-us/about/events/uc/save-date>

International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)

11.07. – 20.07.2023 Berlin, Deutschland
<http://www.iugg.org/>

Bayrische Woche der Geodäsie

15.07. – 23.07.2023 div. Orte in Deutschland
<https://bayern.dvw.de/09/veranstaltungen/bayerische-woche-der-geodaesie>

International Cartographic Conference (ICC)

14.08. – 18.08.2023 Kapstadt, Südafrika
<https://icaci.org/icc2023/>

ISPRS Geospatial Week

02.09. – 07.09.2023 Kairo, Ägypten
<https://www.isprs.org/calendar/2023.aspx>

Österreichische ESRI Anwenderkonferenz & SynerGIS Kundentage

05.10. – 05.10.2023 Wien, Österreich
<https://www.esri-austria.at/news/veranstaltung/id/synergis-konferenz-2023/>

INTERGEO

10.10. – 12.10.2023 Berlin, Deutschland
<https://www.intergeo.de/>

Trimble Dimension

06.11. – 08.11.2023 Las Vegas, USA
<https://www.trimble.com/en/our-company/events/dimensions/overview>

CLGE General Assembly

10.11. – 11.11.2023 Paris, Frankreich
<https://www.clge.eu/event/clge-general-assembly-paris-fr-10-11-november-2023#2023-11-10>

DGPF Jahrestagung

13.03.2024 Remagen am Rhein, Deutschland
<https://www.dgpf.de/cal/Eventdetail/164/114%7C136/dgpf-jahrestagung-2024.html>

Munich Satellite Navigation Summit

20.03. – 22.03.2024 München, Deutschland
<https://www.munich-satellite-navigation-summit.org/>

International Symposium on Mobile Mapping Technology (ICMMT)

22.03. – 23.03.2024 Prag, Tschechien
<https://waset.org/mobile-mapping-technology-conference-in-march-2024-in-prague>

EGU General Assembly 2024

14.04. – 19.04.2024 Wien, Österreich
<https://earth.esa.int/eogateway/events/egu-general-assembly-2024>

International Conference on GI Systems (GISTAM)

02.05. – 04.05.2024 Angers, Frankreich
<https://gistam.scitevents.org/Home.aspx>

kataster.bev.gv.at


Schnell

Einfach

Kostenlos

Tagesaktuell



 Bundesamt
für Eich- und
Vermessungswesen

Kostenlos, schnell und userfreundlich:
Das Katasterservice bringt Zugang zu den tagesaktuellen
Informationen zu 10 Millionen österreichischen Grundstücken.
Für die Innovationskraft wurde das Service mit dem
Verwaltungspreis 2023 ausgezeichnet. [bev.gv.at](https://kataster.bev.gv.at)

