



Bestimmung von Love-Zahlen und FCN-Periode aus VLBI-Daten

Hana Krásná, Wien

Kurzfassung

Die Gravitationswirkung der Sonne und des Mondes auf die Erde verursacht eine Deformation der Erdoberfläche, die täglich bis zu mehreren Dezimetern in der vertikalen Richtung betragen kann. Die Verschiebung der Erdoberfläche ist eine Funktion der sog. Love-Zahlen (vertikale Richtung) und der Shida-Zahlen (horizontale Ebene). Bei den heutigen hohen Genauigkeitsanforderungen der Geodäsie müssen die Love- und Shida-Zahlen in komplexer Form angegeben werden, wobei der imaginäre Teil die Anelastizität des Erdmantels ausdrückt. Außerdem muss man die einzelnen Tiden innerhalb der verschiedenen Frequenzbänder unterscheiden. Andererseits ermöglichen die hochgenauen Weltraumverfahren der Geodäsie, wie z.B. die Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Informationen über die geophysikalischen Parameter aus den Beobachtungen abzuleiten und damit die theoretischen Modelle zu validieren.

In der vorliegenden Arbeit werden die Love-Zahlen der zwölf täglichen Tiden aus einer Gesamtlösung aller geeigneten VLBI-Daten aus 27 Jahren (1984.0 – 2011.0) geschätzt. Außerdem wird eine direkte Schätzung der Free Core Nutation (FCN)-Periode aus den VLBI-Daten präsentiert. Die FCN verursacht auf einer Seite durch ihre Resonanz mit der Gezeitenkraft eine starke Frequenzabhängigkeit der Love- und Shida-Zahlen im täglichen Bereich, auf der anderen Seite ist ihre Wirkung in der quasiperiodischen Bewegung des Celestial Intermediate Pole im himmelfesten Referenzrahmen sichtbar. Unter Berücksichtigung beider Phänomene in einem globalen Ausgleich der VLBI-Daten wurde ein Wert von -431.18 ± 0.10 Sterntagen für die FCN-Periode bestimmt.

Schlüsselwörter: Love- und Shida-Zahlen, Gezeiten der festen Erde, Free Core Nutation, Radiointerferometrie auf langen Basislinien

Abstract

The gravitational attraction of the Moon and the Sun causes deformation of the Earth's surface which can reach several decimetres in vertical direction during a day. The displacement is a function of the so-called Love numbers (vertical direction) and Shida numbers (horizontal plane). Due to the present accuracy of the VLBI measurements the parameters have to be specified as complex numbers, where the imaginary parts describe the anelasticity of the Earth's mantle. Moreover, it is necessary to distinguish between the single tides within the various frequency bands. On the other hand, the increasing accuracy of the space geodetic techniques, such as Very Long Baseline Interferometry (VLBI), allows access to these parameters in the theoretical models and provides possibilities to validate them directly from the measured data. In this work Love numbers of twelve diurnal tides included in the solid Earth tidal displacement modelling are estimated directly from 27 years of VLBI measurements (1984.0 – 2011.0). Furthermore, the period of the Free Core Nutation (FCN) is computed which shows up in the frequency-dependent solid Earth tidal displacement as well as in a nutation model describing the motion of the Earth's axis in space. The FCN period in both models is treated as a single parameter and its estimated value is -431.18 ± 0.10 sidereal days.

Keywords: Love and Shida numbers, solid Earth tides, Free Core Nutation, Very Long Baseline Interferometry

1. Einleitung

Radiointerferometrie auf langen Basislinien (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) ist ein geodätisches Weltraumverfahren, das eine direkte Verknüpfung des terrestrischen und des himmelfesten Referenzrahmens durch die Erdorientierungsparameter ermöglicht. Das Grundprinzip der VLBI liegt in einer simultanen Beobachtung einer kosmischen Radioquelle mit mindestens zwei erdbasierten Antennen (Abb. 1).

Die primäre Beobachtungsgröße der VLBI ist die sog. Laufzeitverzögerung τ , welche die Differenz

der Ankunft der Wellenfront an den beiden Antennen darstellt. Die Grundgleichung der VLBI (Gl. 1) verknüpft die Basislinie b zwischen den beiden Antennen mit dem Einheitsvektor der Richtung zur Radioquelle k durch die Erdorientierungsparameter. Die Matrix W stellt die Rotationsmatrix für die Polbewegung dar, R ist die Matrix der Erddrehung und Q beschreibt die Präzession und Nutation.

$$\tau = -\frac{1}{c} b \cdot WRQ \cdot k \quad (1)$$

Gezeiten und verschiedene Auflasten verursachen eine Deformation der Erdoberfläche und

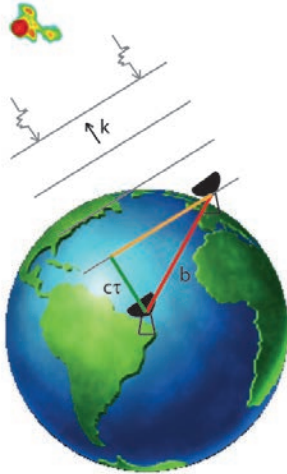


Abb. 1: Grundprinzip der VLBI: Simultane Beobachtung einer kosmischen Radioquelle mit mindestens zwei erdbasierten Antennen

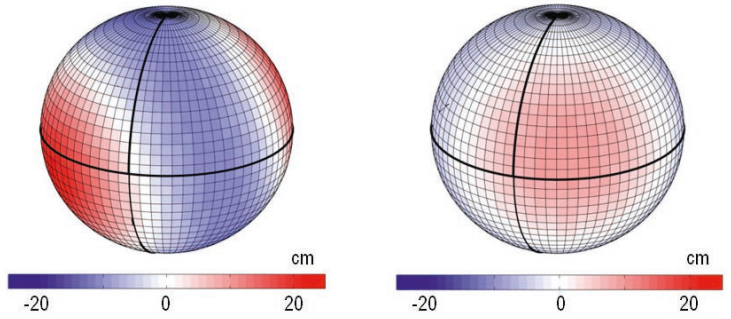


Abb. 2: Deformation der Erdoberfläche, die durch das Gezeitenpotential zweiten Grades vom Mond (links) und der Sonne (rechts) verursacht wird

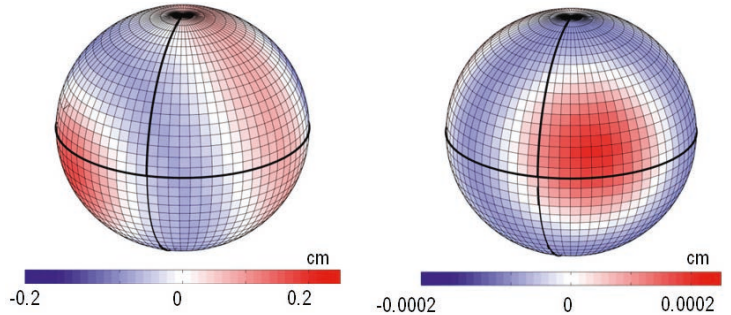


Abb. 3: Deformation der Erdoberfläche, die durch das Gezeitenpotential dritten Grades vom Mond (links) und der Sonne (rechts) verursacht wird

damit auch einer Veränderung der Basislinie. Darum sind theoretische Modelle, die solche Stationsverschiebungen beschreiben, von großer Bedeutung. Die größte vertikale Krustendeformation wird durch die Gezeiten der festen Erde verursacht. Die Hebung und Senkung der Erdoberfläche erreicht bis zu vierzig Zentimeter in den mittleren Breiten jeden Tag. Auf der anderen Seite ermöglichen die präzisen VLBI-Beobachtungen die Bestimmung der Parameter der theoretischen Modelle bzw. ihre Validierung. In dieser Arbeit wurden die sog. Love- und Shida-Zahlen aus den VLBI-Beobachtungen berechnet, die eine Verknüpfung zwischen dem Gezeitenpotential und der resultierenden Deformation der Erdoberfläche darstellen. Außerdem wurde die Periode der Nutation des freien Kerns (Free Core Nutation, FCN) berechnet, die sich auf die Love- und Shida Zahlen im täglichen Bereich als eine starke Resonanzkraft auswirkt.

2. Gezeitendeformation

Die Gezeitendeformation der festen Erde entsteht aus den Variationen im Gravitationsfeld, die durch Himmelskörper (vor allem durch den Mond und die Sonne) verursacht werden. Der Zusammenhang zwischen dem Gezeitenpoten-

zial und der Verformung der Erde wird durch die Love- und Shida-Zahlen beschrieben.

In der klassischen Theorie des Erdmodells (z.B. Melchior, 1978 [1]), in der die Erde als sphärisch, nicht-rotierend, elastisch und isotrop (SNREI) betrachtet wird, sind die Love- und Shida-Zahlen (h, l) nur vom Grad n des Gezeitenpotentials V_n^t abhängig. Der Verschiebungsvektor Δd , der durch das Gezeitenpotential verursacht wird, lautet in lokalen Koordinaten (Vertikal r , Ost e , Nord n):

$$\Delta d = \frac{1}{g} \sum_{n=2}^{\infty} h_n \cdot V_n^t \cdot \hat{r} + \frac{1}{g \cos \varphi} \sum_{n=2}^{\infty} l_n \frac{\partial V_n^t}{\partial \lambda} \cdot \hat{e} + \frac{1}{g} \sum_{n=2}^{\infty} l_n \frac{\partial V_n^t}{\partial \varphi} \cdot \hat{n}, \tag{2}$$

wobei φ und λ die geozentrische Breite und Länge der Station und g die Gravitationsbeschleunigung sind. Um die Submillimetergenauigkeit zu gewährleisten reicht es, bis zum Grad 3 des Potentials, das durch den Mond und Sonne entsteht, zu summieren (Petit und Luzum, 2010 [2]). Abbildungen 2 und 3 zeigen vertikale Verschiebungen, die durch das Gezeiten-

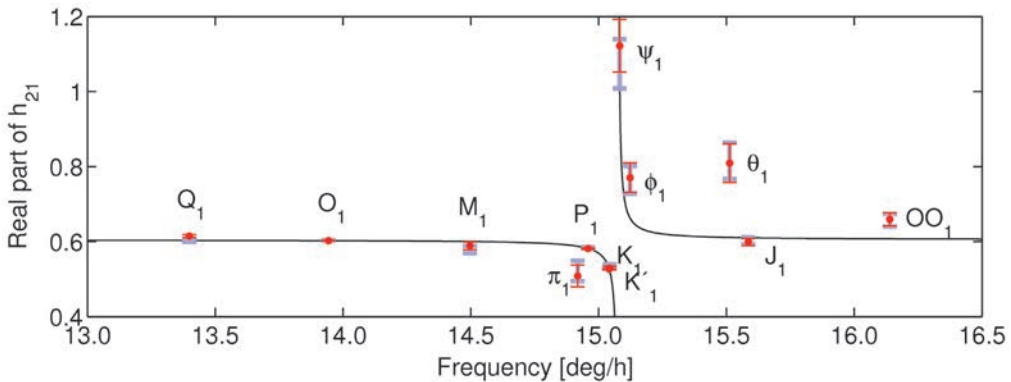


Abb. 4: Der Realteil der komplexen Love-Zahlen für die zwölf täglichen Gezeitenwellen. In rot die Lösung mit dem FES2004 Ozeanauflastmodell, in blau mit dem AG06a Modell. Die schwarze Linie zeigt die theoretischen Werte von Mathews u.a. (1997, [4]).

potential vom Mond (links) und von der Sonne (rechts) am 14. April 2012 um 12 UT erzeugt werden. Die Abbildung 2 zeigt die Auswirkung des Potentials zweiten Grades, die Abbildung 3 Verschiebungen anhand des Potentials vom Grad drei.

Die moderne Gezeitentheorie der festen Erde basiert auf dem Modell von Wahr (1981 [3]), der die Erde als rotierend und elliptisch mit einem elastischen Mantel und flüssigem Kern betrachtet. Die Rotationsachsen von Mantel und Kern sind nicht identisch, was zu einer Resonanz zwischen der Nutation des freien Kerns mit der Gezeitenkraft im täglichen Frequenzband führt. Daraus folgt eine starke Frequenzabhängigkeit der Love- und Shida-Zahlen im täglichen Bereich in der Nähe von der FCN-Frequenz.

Die Vorgangsweise zur Berechnung der Verschiebungen der Erdoberfläche, die in den aktuellen IERS Standards 2010 (Petit und Luzum, 2010 [2]) empfohlen wird, beruht auf dem Modell von Mathews u.a. (1997 [4]), welches die Verschiebung in zwei Schritten berechnet. Im ersten Schritt wird die Verschiebung mit den frequenzunabhängigen Nominalwerten von Love- und Shida-Zahlen für Grad zwei und drei des Gezeitenpotentials berechnet. In dem zweiten Schritt kommen die frequenzabhängigen Korrekturen mit den Variationen anhand der Mantelanelastizität dazu (Mathews u.a., 1997 [4]). Den Realteil der Korrektur zur Verschiebung in vertikaler Richtung aufgrund der Frequenzabhängigkeit im täglichen Bereich stellt die Gleichung 3 dar:

$$\delta u_{r(f)}^{(21)} = -\frac{3}{2} \sqrt{\frac{5}{24\pi}} H_f \delta h_{21(f)} \sin(2\varphi) \sin(\theta_f + \lambda) \quad (3)$$

H_f ist die Amplitude des Gezeitenterms mit der Frequenz f nach der Konvention von Cart-

wright und Tayler (1971, [5]), θ_f ist das Gezeitenargument mit der Frequenz f und $\delta h_{21(f)}$ ist die Love-Zahl-Korrektur zum nominalen Wert vom Grad zwei.

In dieser Arbeit werden die geschätzten Love-Zahlen für zwölf tägliche Tiden aus einer Gesamtlösung aller geeigneten VLBI-Daten aus 27 Jahren gezeigt (Krásná u.a. 2013a [6]). Es wurden 4.6 Mio. VLBI-Beobachtungen aus den Jahren 1984.0–2011.0 mit der VLBI-Software VieVS (Böhm u.a., 2012 [7]) ausgewertet. Für die Love-Zahlen-Schätzung wird die übliche Parametrisierung der VLBI-Beobachtung verwendet. Diese enthält die Schätzung von den zeitabhängigen Parametern wie der Uhren, der troposphärischen Parameter (feuchte Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung mit den troposphärischen Gradienten) und der Erdorientierungsparameter. Die zeitunabhängigen Parameter werden durch eine Stapelung der Normalgleichungen der einzelnen Sessions gewonnen. Es handelt sich um die Antennenkoordinaten und Geschwindigkeiten, die einen neuen terrestrischen Referenzrahmen bilden, die Radioquellenkoordinaten, die den himmelfesten Referenzrahmen realisieren und die Gezeitenparameter.

Abbildung 4 zeigt die Realteile der komplexen Love-Zahlen für zwölf tägliche Gezeitenwellen. Es handelt sich um die drei stärksten Gezeitenwellen (K_1 , O_1 , P_1), um vier Wellen (Q_1 , M_1 , π_1 , K'_1) mit einer niedrigeren Frequenz als die Resonanzfrequenz der FCN und um fünf Wellen (ψ_1 , Φ_1 , θ_1 , J_1 , OO_1) mit einer höheren Frequenz. Die schwarze Linie stellt die theoretischen Werte von Mathews u.a. (1997, [4]) dar. Es wurden zwei Lösungen für die Love-Zahlen berechnet, die sich durch das a priori Modell für die Ozeanauflast unterscheiden. Die Ozeanauflast wurde

nur für vier Gezeitenwellen modelliert (K_1 , O_1 , P_1 , Q_1), es wurde darum erwartet, dass sich jegliche Unterschiede in den Ozeanmodellen primär auf die Love-Zahlen für diese vier Gezeitenwellen auswirken. In der ersten (roten) Lösung wurde das FES2004 (Lettelier, 2004 [8]) Ozeanauflastmodell verwendet, in der zweiten Lösung das AG06a (Andersen, 2006 [9]) Modell.

Um eine bessere Vorstellung zu bekommen, wie stark sich die Abweichungen in den Love-Zahlen in der vertikalen Verschiebungen der Erdoberfläche widerspiegeln, wurden Differenzen in der Deformation mit Hilfe der Gleichung 4 gerechnet und in der Tabelle 1 zusammengefasst.

$$\delta R_f = -\frac{3}{2} \sqrt{\frac{5}{24\pi}} H_f \delta h_{21(f)} \quad (4)$$

Die dritte Spalte der Tabelle zeigt die Differenzen in der Verschiebung zwischen den theoretischen Werten für die Love-Zahlen und den Werten aus der ersten Lösung mit dem FES2004-Modell. Man sieht, dass die Verschiebungsdifferenz im Submillimeterbereich für alle zwölf täglichen Gezeitenwellen liegt. Den größten Unterschied (-0.30 ± 0.08 mm) bekommt man für die Tide θ_1 , was wahrscheinlich an der niedrigen Amplitude der Gezeitenwelle (3.94 mm) liegt, die eine genauere Bestimmung der Love-Zahl verhindert. Der Gesamtunterschied in der vertikalen Verschiebung zu den theoretischen Werten, der

als eine Summe der absoluten Beiträge aller zwölf täglichen Tiden gerechnet wird, erreicht 1.73 ± 0.29 mm, was bei den heutigen Genauigkeitsanforderungen der Weltraumverfahren von Bedeutung ist. Der Vergleich der Love-Zahlen und der daraus resultierenden Verschiebungsdifferenzen zwischen der FES2004-Lösung und der AG06a-Lösung in der vierten Spalte der Tabelle 1 zeigt die größten Unterschiede für die Tiden K_1 und Q_1 (-0.26 ± 0.14 mm und -0.21 ± 0.11 mm). Die Unterschiede in den restlichen zwei Tiden O_1 und P_1 , die im Ozeanmodell modelliert sind, liegen innerhalb der formalen Fehler, genauso wie die Differenzen der acht Gezeitenwellen, die das Ozeanmodell nicht berücksichtigt.

3. Free Core Nutation

Die Free Core Nutation (FCN) ist ein freier Rotationsmodus der Erde, der durch die Abweichung der Rotationsachsen des Erdmantels und des flüssigen Erdkerns verursacht wird. Im himmelfesten Koordinatensystem ergibt sich durch die FCN eine rückläufige Bewegung der Erdrotationsachse mit einer Periode von ungefähr 430 Tagen, im erdfesten Koordinatensystem ist sie als eine tägliche Bewegung sichtbar. Die starke Frequenzabhängigkeit der Love- und Shida-Zahlen im täglichen Band ist durch die Resonanz der FCN mit der Gezeitenkraft verursacht.

Tide	H_f [mm]	δR_f [mm] FES2004	$\Delta \delta R_f$ [mm] AG06a – FES2004
Q_1	-50.21	0.22 ± 0.08	-0.21 ± 0.11
O_1	-262.25	0.00 ± 0.09	0.12 ± 0.12
M_1	20.62	0.09 ± 0.08	0.08 ± 0.11
π_1	-7.16	-0.22 ± 0.08	0.04 ± 0.11
P_1	-122.35	-0.03 ± 0.08	0.11 ± 0.11
K_1	369.14	-0.08 ± 0.10	-0.26 ± 0.14
K'_1	49.97	-0.16 ± 0.08	-0.11 ± 0.11
ψ_1	2.94	-0.09 ± 0.08	0.05 ± 0.11
Φ_1	5.26	-0.22 ± 0.08	0.01 ± 0.11
θ_1	3.94	-0.30 ± 0.08	-0.01 ± 0.11
J_1	20.62	0.09 ± 0.08	-0.03 ± 0.11
OO_1	11.29	-0.23 ± 0.08	0.01 ± 0.11

Tab. 1: Zwölf tägliche Tiden mit ihrer Amplitude nach der Konvention von Cartwright und Tayler (1971, [5]) (zweite Spalte). In der dritten Spalte stehen die Verschiebungsdifferenzen anhand der Differenz in den theoretischen und geschätzten Love-Zahlen in der FES2004-Lösung, die vierte Spalte zeigt die Deformationsdifferenzen resultierend aus den Differenzen in den bestimmten Love-Zahlen in der FES2004- und AG06a-Lösung.

In dieser Arbeit wird die Schätzung der FCN-Periode aus den VLBI-Daten präsentiert. Als erstes wurde die FCN-Periode aus ihrer Auswirkung auf die täglichen Love- und Shida-Zahlen bestimmt. Die allgemeine Gleichung 5 zeigt die Ableitung der VLBI-Laufzeitverzögerung nach der FCN-Frequenz (σ_{FCN}), die durch die Love- und Shida-Zahlen eine Basisliniendifferenz zwischen zwei VLBI-Stationen verursacht (x_1 und x_2 sind die Positionsvektoren der Stationen).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_{FCN}} &= k \cdot QRW \cdot \frac{\partial b}{\partial \sigma_{FCN}} = \\ &= k \cdot QRW \cdot \left(\frac{\partial x_2}{\partial \sigma_{FCN}} - \frac{\partial x_1}{\partial \sigma_{FCN}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Weil der Zusammenhang zwischen den Stationsverschiebungen und der FCN-Frequenz nicht linear ist, musste die Bestimmung der FCN-Periode in einigen Iterationen durchgeführt werden. Die Abbildung 5 zeigt, dass bereits nach zwei Iterationsschritten die Periode stabil bei dem Wert -431.23 ± 2.44 Sterntage geblieben ist. Die allgemeinen Einstellungen der globalen VLBI-Auswertung waren identisch wie bei der Schätzung der Love- und Shida-Zahlen (Paragraph 2).

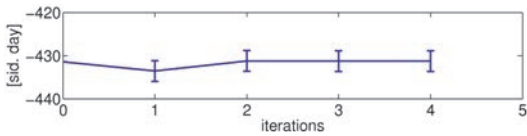


Abb. 5: Die FCN-Periode, die aus der Resonanz mit der Gezeitenkraft bestimmt wurde, konvergierte nach vier Iterationen zu -431.23 ± 2.44 Sterntagen

Die zweite Möglichkeit, wie man die FCN-Periode direkt aus den VLBI-Messungen bestimmen kann, basiert auf der Bewegung des Celestial Intermediate Pole (CIP) im himmelfesten Referenzrahmen. Abbildung 6 zeigt die X- und Y-Koordinate der Celestial Pole Offsets (CPO) im Bezug auf das IAU 2006/2000A Präzession/Nutationsmodell (Mathews u.a., 2002 [10]; Capitaine u.a., 2003 [11]) wie sie in Krásná u.a. (2013b, [12]) bestimmt wurden. Die FCN ist in den Zeitserien als eine quasi-periodische Bewegung sichtbar, weil sie aufgrund ihrer schlechten Vorhersagbarkeit im Präzession/Nutationsmodell nicht integriert werden kann.

Um die FCN-Periode direkt während der VLBI-Auswertung schätzen zu können, wurde das empirische Modell von Lambert u.a. (2007, [13]) (Gl. 6) zur IAU Präzession/Nutationsmatrix da-

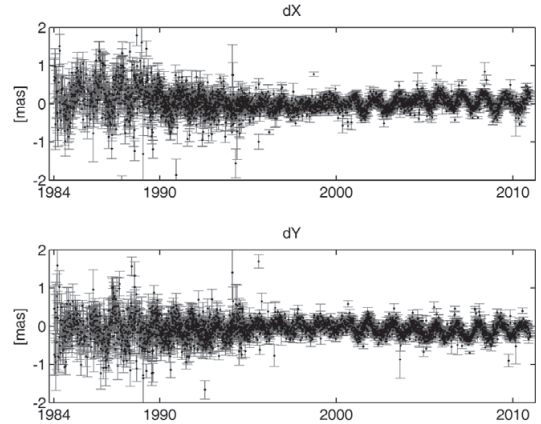


Abb. 6: X- und Y-Koordinate der Celestial Pole Offsets im Bezug auf das IAU 2006/2000A Präzession/Nutationsmodell

zugegeben (Gl. 6+7). Das Modell von Lambert u.a. (2007, [13]) besteht aus einer konstanten FCN-Frequenz σ_{FCN} von -431.39 Sterntagen, die in den IERS Standards 2010 empfohlen ist und der zeitvariablen komplexen Amplitude. Die FCN-Offsets wurden mit den Amplituden A_S und A_C der Sinus- und Cosinus-Terme ausgedrückt (Gl. 7).

$$Q = dQ \cdot Q_{IAU} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_{FCN} \\ 0 & 1 & Y_{FCN} \\ -X_{FCN} & -Y_{FCN} & 1 \end{bmatrix} \cdot Q_{IAU} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } X_{FCN} &= A_C \cos(\sigma_{FCN} \cdot t) - A_S \sin(\sigma_{FCN} \cdot t) \\ Y_{FCN} &= A_S \cos(\sigma_{FCN} \cdot t) + A_C \sin(\sigma_{FCN} \cdot t) \end{aligned} \quad (7)$$

Dies ermöglicht die VLBI-Laufzeitverzögerung nach der FCN-Frequenz abzuleiten, die in der Bewegung der Rotationsachse präsent ist (Gl. 8):

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_{FCN}} = k \cdot \frac{\partial dQ}{\partial \sigma_{FCN}} Q_{IAU} RW \cdot b \quad (8)$$

Die globale Auswertung der VLBI-Daten wurde wieder in einigen Iterationsschritten durchgeführt und die allgemeinen Einstellungen aus Paragraph 2 übernommen. Zusammen mit der FCN-Frequenz wurde auch eine konstante FCN-Amplitude mitgeschätzt. Nach vier Iterationen bleibt der Wert für die FCN-Periode bei -431.17 ± 0.09 Sterntagen stabil (siehe Abb. 7). Für die FCN-Amplitude wurde der Wert von $73 \pm 1 \mu\text{s}$ bestimmt.

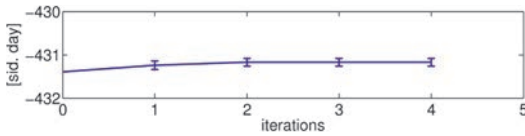


Abb. 7: FCN-Periode bestimmt aus der CIP-Bewegung. Nach vier Iterationen konvergiert der Wert zu -431.17 ± 0.09 Sterntagen.

Die umfangreichste Bestimmung der FCN-Periode stellt eine gleichzeitige Ableitung der Basislinie und der Nutationsmatrix dar (Gl. 9), wobei die FCN-Periode als ein gemeinsamer Parameter auftritt, der eine Stationsverschiebung und eine Bewegung der Rotationsachse verursacht.

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_{FCN}} = k \cdot \frac{\partial dQ}{\partial \sigma_{FCN}} Q_{IAU} RW \cdot b + k \cdot dQ \cdot Q_{IAU} RW \cdot \frac{\partial b}{\partial \sigma_{FCN}} \quad (9)$$

Der geschätzte Wert aus dieser Lösung für die FCN-Periode liegt bei -431.18 ± 0.10 Sterntagen, was in der Nähe der „Nutationslösung“ ist. Der Grund dafür ist der kleine formale Fehler, der bei dem Schätzwert aus der Nutationsbewegung im Vergleich zum Schätzwert aus den Gezeiten der festen Erde resultiert.

4. Diskussion

Es wurden zwölf Love-Zahlen aus dem täglichen Frequenzband vorgestellt, die aus einem globalen Ausgleich von VLBI-Beobachtungen bestimmt wurden. Die Deformationsdifferenzen anhand des Unterschieds zwischen den geschätzten und theoretischen Werten, die von den einzelnen Tiden verursacht werden, überschreiten nicht 0.3 mm in der vertikalen Richtung. Wenn man aber die gesamte Differenz, die als eine Summe der einzelnen Differenzen erzeugt wurde, betrachtet, erreicht der Unterschied in der vertikalen Erdoberflächendeformation 1.73 ± 0.29 mm.

Weiters wurde der Schätzwert für die FCN-Periode präsentiert, der aus einer direkten Schätzung während der VLBI-Datenauswertung gewonnen wurde. Der Wert von -431.18 ± 0.10 Sterntagen wurde aus einem globalen Ausgleich bestimmt, wo gleichzeitig der Einfluss der FCN auf die Gezeitenkraft und auf die Nutationsbewegung berücksichtigt wurde.

Referenzen

- [1] Melchior P. (1978): The Tides of the Planet Earth. Pergamon Press.
- [2] Petit G., Luzum B. (2010): IERS Conventions 2010. IERS Technical Note No. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- [3] Wahr J.M. (1981): Body tides on an elliptical, rotating, elastic, and oceanless Earth. Geophys J Roy Astr S 64/3, 677–703.
- [4] Mathews P.M., Dehant V., Gipson J.M. (1997): Tidal station displacement. J Geophys Res 102/B9, 20469–20477.
- [5] Cartwright D.E., Taylor R.J. (1971): New computations of the tide-generating potential. Geophys J Roy Astr S 23/1, 45–74.
- [6] Krásná H., Böhm J., Schuh H. (2013): Tidal Love and Shida numbers estimated by geodetic VLBI. Journal of Geodynamics 70. pp. 21–27. doi: 10.1016/j.jog.2013.05.001.
- [7] Böhm J., Böhm S., Nilsson T., Pany A., Plank L., Spicakova H., Teke K., Schuh H. (2012): The new Vienna VLBI Software VieVS. In: Kenyon, S., Pacino, M., Marti, U. (Eds.), IAG Symposium 2009, pp. 1007–1012.
- [8] Letellier T. (2004): Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux. Université de Toulouse III, Ph.D. thesis.
- [9] Andersen O.B. (2006): The ANDERSEN-2006 global empirical ocean tide model, <http://ebookbrowse.com/andersen-ag06-tide-pdf-d351826746>, last accessed: 30.04.13.
- [10] Mathews P.M., Herring T.A., Buffett B.A. (2002): Modeling of nutation-precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth's interior. J Geophys Res 107/B4.
- [11] Capitaine N., Wallace P.T., Chapront J. (2003): Expressions for IAU 2000 Precession Quantities. Astronomy & Astrophysics 412. pp. 567–586.
- [12] Krásná H., Böhm J., Schuh H. (2013): Free core nutation observed by VLBI. Astronomy & Astrophysics 555, A29. pp. 1–5. doi: 10.1051/0004-6361/201321585.
- [13] Lambert S.B., Dehant V. (2007): The Earth's core parameters as seen by the VLBI. Astronomy & Astrophysics 469. pp. 777–781. doi: 10.1051/0004-6361:20077392.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind innerhalb meiner Doktorarbeit entstanden. Ich bedanke mich sehr herzlich bei allen, die mir während meines Doktoratsstudiums geholfen haben. Für die finanzielle Unterstützung bedanke ich mich bei der Mond Austria Privatstiftung und dem Wissenschaftsfonds FWF (Projekt P23143-N21, Integrated VLBI).

Anschrift der Autorin

Dipl.-Ing. Dr.techn. Hana Krásná, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation E120-4, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.
E-Mail: hana.krasna@tuwien.ac.at