



Numerische Wettermodelle für die troposphärische Modellierung bei GPS und VLBI

Johannes Böhm¹

¹ *Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **93** (3), S. 139–144

2005

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Boehm_VGI_200514,  
  Title = {Numerische Wettermodelle für die troposphärische Modellierung  
    bei GPS und VLBI},  
  Author = {Böhm, Johannes},  
  Journal = {VGI -- Österreichische Zeitschrift für Vermessung und  
    Geoinformation},  
  Pages = {139--144},  
  Number = {3},  
  Year = {2005},  
  Volume = {93}  
}
```





Numerische Wettermodelle für die troposphärische Modellierung bei GPS und VLBI

Johannes Böhm, Wien

Kurzfassung

Die mittels sogenannter Projektionsfunktionen (engl.: mapping functions) modellierte troposphärische Refraktion ist eine der wichtigsten Fehlerquellen bei der Auswertung von GPS- (Global Positioning System) und VLBI- (Very Long Baseline Interferometry) Beobachtungen. Fehler in diesen Funktionen wirken sich nicht nur auf die troposphärischen Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung aus, sondern aufgrund von Korrelationen auch auf die geschätzten Stationshöhen. Um die troposphärischen Projektionsfunktionen besser bestimmen zu können, sind in den letzten Jahren meteorologische Profile verwendet worden, die aus numerischen Wettermodellen erhalten werden. So liegen bei der Vienna Mapping Function (VMF) Daten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) zugrunde. Untersuchungen zeigen, dass sich mit der VMF nicht nur die innere Genauigkeit der geodätischen Ergebnisse signifikant verbessert, sondern dass sich auch die Stationshöhen selbst im cm-Bereich ändern können.

Abstract

Tropospheric mapping functions which are used for modeling tropospheric refraction are one of the major error sources in the analyses of GPS (Global Positioning System) and VLBI (Very Long Baseline Interferometry) observations. Errors of these mapping functions do not only influence the tropospheric zenith path delays, but – through correlations – also the station heights. In recent years, data from numerical weather models have been applied to determine the mapping functions. For the Vienna Mapping Function (VMF) meteorological profiles are taken from the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Investigations show that the application of the VMF does improve the precision of geodetic parameters, and even, the station heights themselves can change at the cm-level.

1. Einleitung

Die Modellierung der troposphärischen Refraktion ist eine der wichtigsten Fehlerquellen bei der Ausgleichung von GPS- (Global Positioning System) und VLBI- (Very Long Baseline Interferometry) Beobachtungen, denn aufgrund der Korrelationen zwischen den Stationshöhen einerseits und den troposphärischen Parametern andererseits werden Fehler in der troposphärischen Modellierung auch auf die Stationshöhen übertragen.

1.1. Troposphärische Modellierung unter Annahme azimuthaler Symmetrie

Die totale Laufzeitverzögerung $\Delta L(e)$ in der neutralen Atmosphäre für eine Beobachtung zu einem GPS-Satelliten bzw. einer extragalaktischen Radioquelle (im Falle der VLBI) unter dem Elevationswinkel e setzt sich zusammen aus einem hydrostatischen (Index h) und einem feuchten Anteil (Index w) (Gl. 1).

$$\Delta L(e) = \Delta L_h^z \cdot m f_h(e) + \Delta L_w^z \cdot m f_w(e) \quad (1)$$

Jeder dieser beiden Anteile ist das Produkt aus der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung ΔL^z und der zugehörigen Projektionsfunktion $m f(e)$. Während man die hydrostatische Laufzeitverzögerung

in Zenitrichtung ΔL_h^z (≈ 2 m) sehr genau aus den Stationskoordinaten und dem Luftdruck an der Station berechnen kann [Davis et al., 1985], werden die feuchten Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung ΔL_w^z (0 – 40 cm) üblicherweise in der Auswertung von GPS- und VLBI-Beobachtungen als stückweise lineare Funktionen mitgeschätzt [Titov et al., 2001]. Für die Projektionsfunktionen $m f$ (engl.: mapping functions) werden fortgesetzte Bruchdarstellungen (siehe Gl. 2) verwendet, wobei drei Koeffizienten a , b und c ausreichend sind, um die Laufzeitverzögerungen von der Zenitrichtung auf Elevationen bis 3° mit mm-Genauigkeit zu projizieren [Marini, 1972].

$$m f(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin e + \frac{a}{\sin(e) + \frac{b}{\sin(e) + c}}}$$

Die seit Ende der 90er Jahre in den VLBI- und GPS-Softwarepaketen am weitesten verbreitete Projektionsfunktion ist die NMF (Niell Mapping Function), die auf Strahlverfolgungen durch ein Standardatmosphärenmodell beruht [Niell, 1996], und bei der die Koeffizienten a , b und c als Funktionen des Tages im Jahr und der Stationskoordinaten berechnet werden.

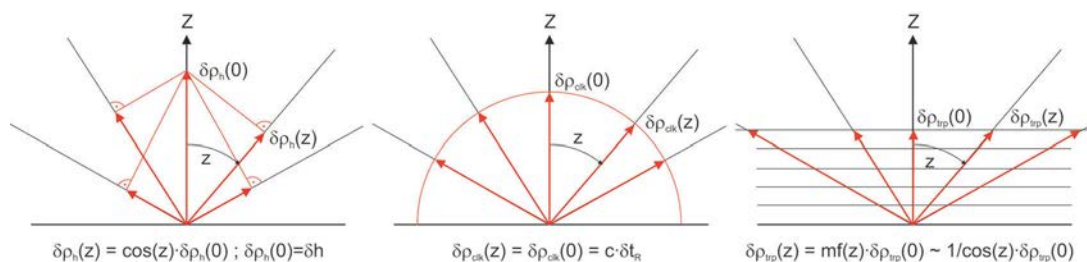


Abb. 1: Unterschiedliche Elevationsabhängigkeiten für die Stationshöhe (links), die Stationsuhr (Mitte) und die troposphärischen Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung (rechts). Nur über Beobachtungen in möglichst vielen verschiedenen Elevationen können diese drei Parameter voneinander getrennt werden.

1.2. Korrelationen

Aufgrund der relativ hohen Korrelationen zwischen den in der Ausgleichung zu bestimmenden Parametern der Stationshöhen, der Stationsuhren und der troposphärischen Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung (siehe Abb. 1) werden Fehler in den Projektionsfunktionen im Zuge der Ausgleichung auf die Stationshöhen übertragen. Nach einer Faustformel von Niell et al. [2001] entspricht der Stationshöhenfehler einem Drittel des Fehlers in der Laufzeitverzögerung bei der tiefsten Elevation. (Beispiel: Die tiefsten Beobachtungen in der VLBI oder GPS Auswertung liegen bei 5° Elevation, und die zugehörige hydrostatische Projektionsfunktion sei 10.16 anstelle des wahren Wertes 10.15. Multipliziert mit der hydrostatischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (2000 mm) erhält man einen Fehler von 20 mm bei der tiefsten Elevation, d.h. die Stationshöhe wird um rund 7 mm zu niedrig geschätzt.)

2. Vienna Mapping Functions (VMF)

Das ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) stellt seine Analyse-Daten für Höhe, Temperatur und Luftfeuchtigkeit von zur Zeit 21 Druckflächen (1000 hPa bis 1 hPa) mit einer zeitlichen Auflösung von sechs Stunden zur Verfügung. Mit einem geeigneten Strahlverfolgungsprogramm [Böhm, 2004] werden für jede Station (zur Zeit alle VLBI-Stationen und die des IGS- (International GPS Service)) die hydrostatische und feuchte Projektionsfunktion sowie der zugehörige Ausgangselevationswinkel e für eine Anfangselevation von $e_0 = 3.3^\circ$ bestimmt (siehe Abb. 2). Somit kennt man in Gl. 2 die hydrostatische bzw. feuchte Projektionsfunktion $mf(e)$ und den zugehörigen Elevationswinkel e . Nimmt man nun für die Koeffizienten b und c die Werte der IMF [Niell, 2003] für den hydrostatischen und der NMF für den feuchten Anteil,

dann kann man durch Umkehrung der Gl. 2 die Koeffizienten a der VMF für jede Station bestimmen. Kleine Fehler in b und c können durch den Koeffizienten a gut kompensiert werden, weil a , b und c stark voneinander abhängen. Mehr Informationen und Einzelheiten zur Berechnung der VMF findet man in Böhm [2004] bzw. Böhm and Schuh [2004].

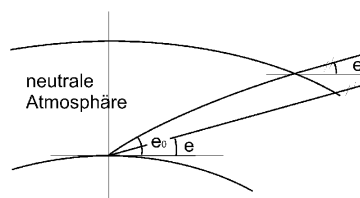


Abb. 2: Ein Anfangselevationswinkel $e_0 = 3.3^\circ$ entspricht einem Ausgangselevationswinkel e von ungefähr 3° .

3. Vergleich von NMF und VMF in Bezug auf Stationshöhen

Vergleicht man die Werte der NMF [Niell, 1996] mit denen der VMF [Böhm und Schuh, 2004], dann kann man über die in Abschnitt 1.2 eingeführte Faustformel von Niell et al. [2001] sehr gut auf scheinbare Stationshöhenänderungen schließen, die einzig durch den Wechsel von der NMF zur VMF entstehen. Abb. 3 zeigt die Werte der hydrostatischen Projektionsfunktion für die japanische Station Tsukuba bei 5° Elevation für die Jahre 2001 bis 2003. Abgesehen von der wesentlich höheren zeitlichen Auflösung der VMF (6 Stunden) erkennt man deutlich eine systematische Verschiebung in den Wintermonaten von rund 0.015. Multipliziert mit 2000 mm hydrostatischer Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung entspricht das nach der Faustformel einer Verschiebung der in der Ausgleichung geschätzten Höhenkoordinate von rund 1 cm.

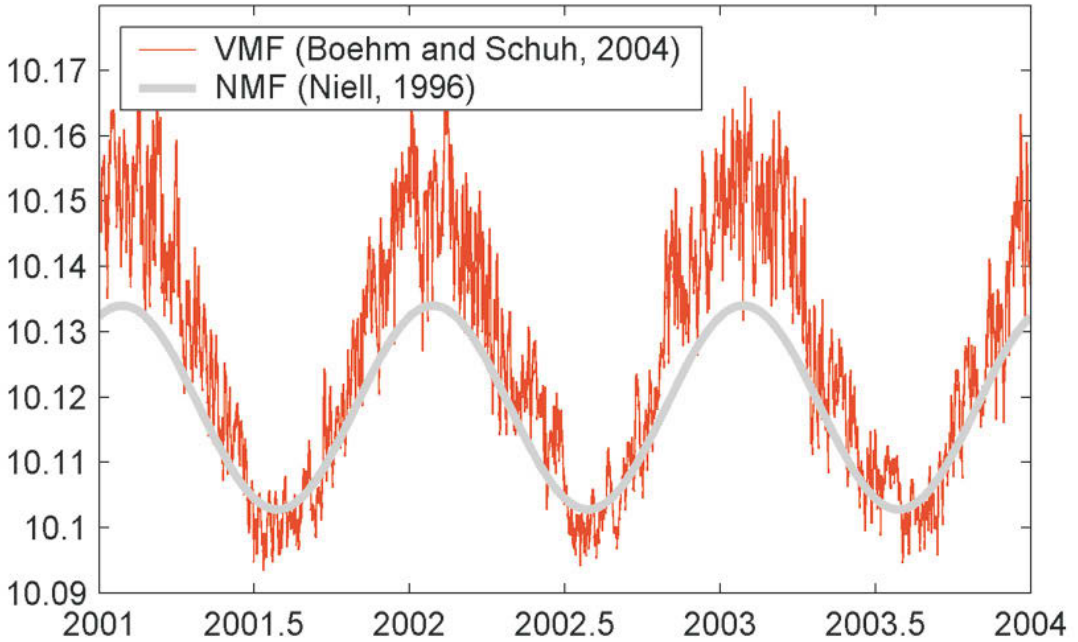


Abb. 3: Hydrostatische Projektionsfunktionen NMF (grau) und VMF (rot) für die japanische Station Tsukuba bei 5° Elevation. Deutlich zu sehen ist die systematische Verschiebung in den Wintermonaten von rund 0.015, was einer scheinbaren Stationshöhenänderung von 1 cm entspricht.

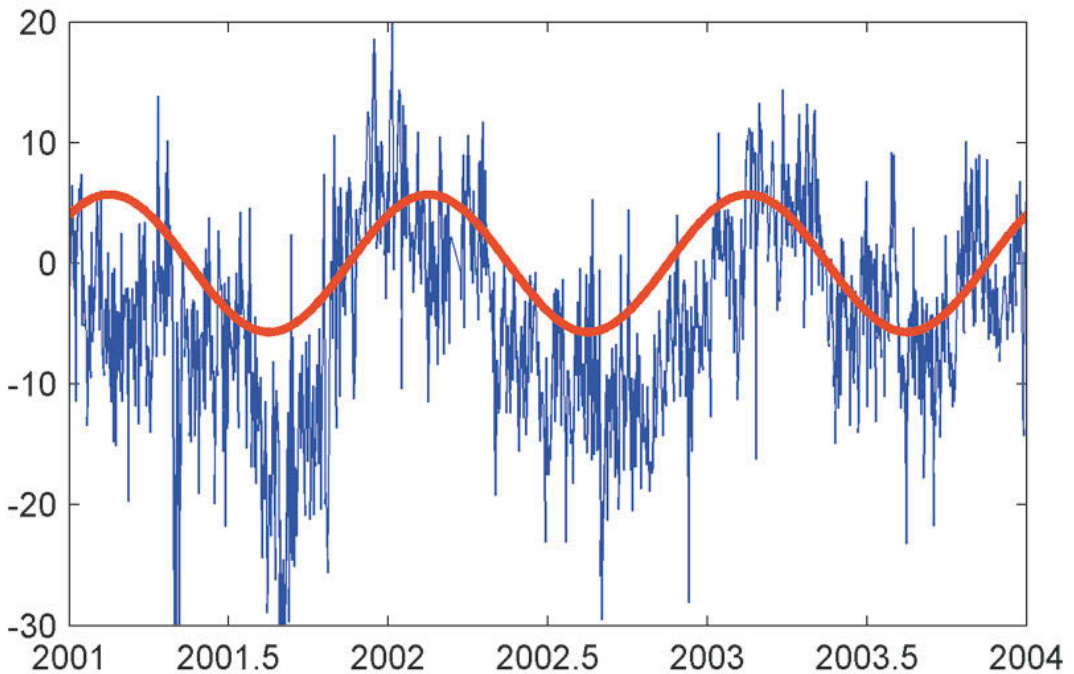


Abb. 4: Geschätzte GPS-Höhen in mm für die Station Tsukuba (Japan) des Scripps Institute of Oceanography (blau). Die rote Linie zeigt die mittlere jährliche Schwingung.

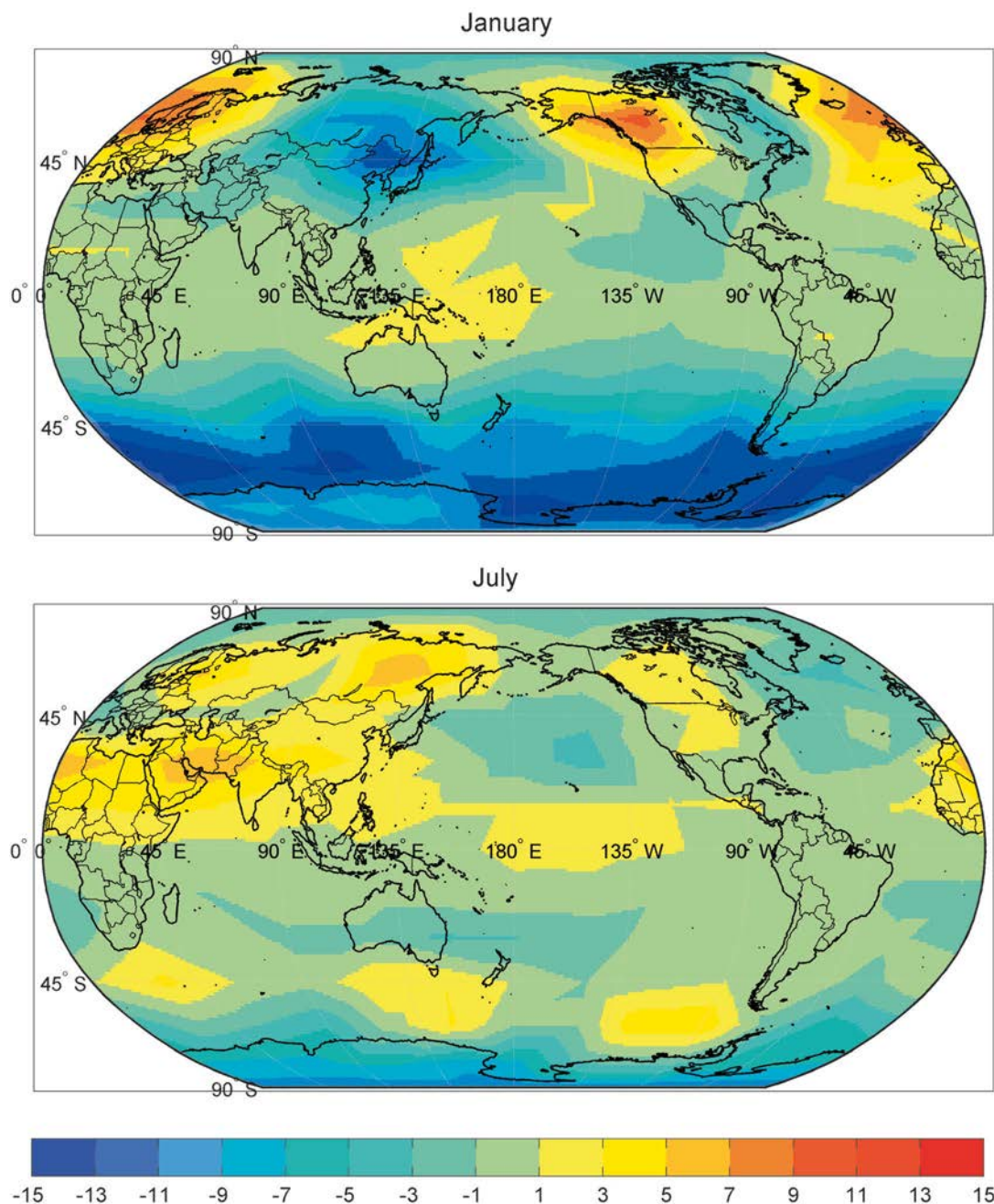


Abb. 5: Scheinbare Stationshöhenänderungen in mm im Jänner und Juli 2001, wenn man statt der NMF die genauere VMF verwendet (hydrostatisch), berechnet mit der Faustformel von Niell et al. [2001].

Abb. 4 zeigt mit blauer Farbe die aus GPS-Daten geschätzten Höhen der Station Tsukuba in eintägiger Auflösung, berechnet vom Scripps Institute of Oceanography aus täglichen GPS-Daten. Man erkennt deutlich eine jährliche

Schwingung mit einer Amplitude von rund 1 cm, die gemäß der vorigen Abschätzung zum überwiegenden Teil auf Fehler in der troposphärischen Modellierung mit der NMF zurückgeführt werden kann.

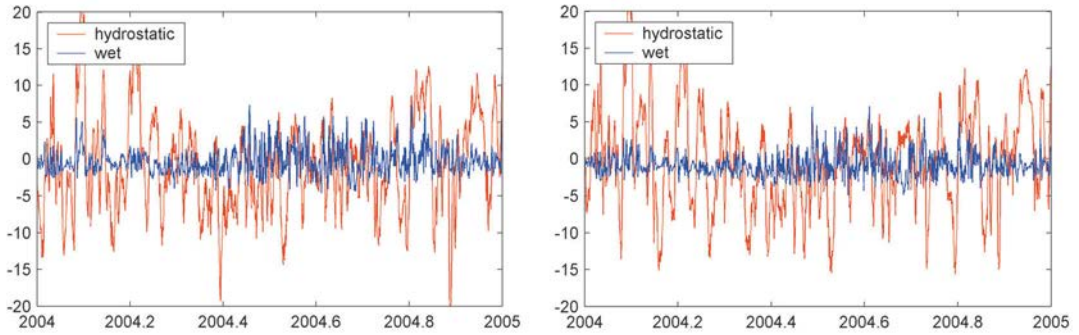


Abb. 6: Stationshöhenfehler mit NMF (im Vergleich zu VMF) für Wien (links) und Bregenz (rechts) im Jahr 2004. Die roten Linien zeigen die Fehler aufgrund der hydrostatischen, die blauen Linien die Fehler aufgrund der feuchten Projektionsfunktion NMF. An beiden Stationen ist die Standardabweichung der hydrostatisch bedingten Höhenfehler rund 6.6 mm, aufgrund der feuchten Anteile rund 1.6 mm.

Analog zur stationsweisen Betrachtung kann man die scheinbaren Höhenänderungen auch für die ganze Erde darstellen. Abb. 5 zeigt die mit der Faustformel abgeschätzten Stationshöhenfehler bei Verwendung der NMF im Vergleich zur genaueren VMF, und zwar für Mittelwerte der Monate Jänner und Juli des Jahres 2001. Man erkennt deutlich sehr große Unterschiede im Jänner für Ostasien/Japan (vgl. Abb. 3) und die Antarktis. Im Sommer (Juli) hingegen verschwinden die Unterschiede fast vollständig, und es herrscht eine gute Übereinstimmung zwischen NMF und VMF.

4. Möglichkeiten für Österreich

Um die Möglichkeiten der VMF für das österreichische Staatsgebiet abschätzen zu können, wurden Werte der NMF und VMF (hydrostatisch und feucht) für Stationen in Wien und Bregenz für das Jahr 2004 berechnet. Mit der Faustformel können daraus sehr gut die zugehörigen Stationshöhenfehler aufgrund von Fehlern der NMF bestimmt werden. Abb. 6 zeigt die scheinbaren Höhenänderungen in mm, wenn man für die Modellierung des hydrostatischen (rot) bzw. feuchten Anteils (blau) die VMF anstelle der NMF nimmt. Man erkennt deutlich die langperiodischen Änderungen (teilweise über mehrere Wochen) aufgrund von Änderungen der hydrostatischen VMF, die auf großräumige Luftdruckänderungen zurückzuführen sind und teilweise knapp 2 cm betragen können (Standardabweichung 6.6 mm). Die Änderungen aufgrund des feuchten Anteils der VMF erfolgen viel schneller, sie sind aber wesentlich kleiner (Standardabweichung 1.6 mm).

Abb. 6 zeigt die scheinbaren Stationshöhenänderungen, wenn man die Stationen Wien und

Bregenz in einem globalen Netz auswerten würde. Wertet man jedoch nur ein österreichweites Netz aus, dann kann man die Stationshöhenfehler in Bregenz relativ zu denen in Wien betrachten (Abb. 7). Sehr deutlich sieht man einen Rückgang der hydrostatisch bedingten Höhenfehler (von 6.6 mm auf 3.9 mm Standardabweichung), was darauf zurückzuführen ist, dass sowohl in Bregenz als auch in Wien zumeist ein ähnlicher Luftdruck herrscht. Anders ist die Situation beim feuchten Anteil, der sowohl zeitlich als auch räumlich wesentlich variabler ist. Erstaunlich ist dennoch, dass die Standardabweichung sogar leicht ansteigt (von 1.6 mm bei der globalen Lösung auf 2.0 mm bei der regionalen Lösung Wien-Bregenz), was darauf hindeutet, dass die feuchten Projektionsfunktionen VMF für Wien und Bregenz, bezogen auf NMF, sogar leicht negativ miteinander korreliert sind.

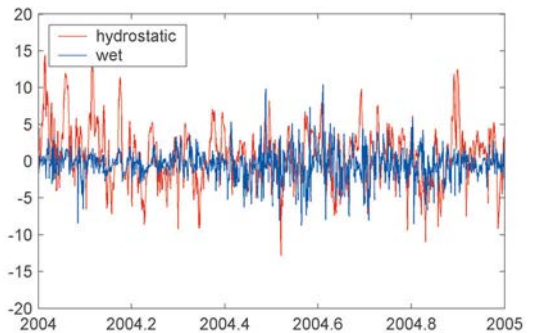


Abb. 7: Relative Stationshöhenfehler in mm in Bregenz, bezogen auf Wien. Die Standardabweichung der hydrostatischen Fehler beträgt 3.9 mm (rot), der feuchten Anteile 2.0 mm. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg der Fehler aufgrund der feuchten Anteile in den Sommermonaten, da die feuchte Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung dann wesentlich größer ist als im Winter.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In Böhm [2004] und Böhm und Schuh [2004] wird gezeigt, dass die Vienna Mapping Function VMF eine signifikante Verbesserung bei den Wiederholbarkeiten der VLBI Basislinienlängen bringt. Im vorliegenden Artikel wird außerdem darauf hingewiesen, dass beim Übergang von der NMF zur VMF sehr große scheinbare Stationshöhenänderungen mit jährlichen Schwankungen auftreten können, die in Ostasien und in der Antarktis sogar größer als 1 cm sein können. Das führt einerseits zu signifikanten Änderungen des terrestrischen Referenzrahmens, andererseits ist die genaue troposphärische Modellierung aber auch von größter Bedeutung, um geophysikalische Effekte (z.B. atmosphärische oder hydrologische Auflasteffekte) von Fehlern der Projektionsfunktionen trennen zu können.

In Zukunft soll die VMF auch für die Auswertung von österreichweiten GPS-Netzen verwendet werden, um den Einfluss auf die Genauigkeit für ein regional begrenztes Netz zu untersuchen.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für den Zugang zu den ECMWF Daten und beim FWF für die Unterstützung dieser Arbeit im Rahmen des Projektes P16992-N10 (VLBI für klimatologische Studien).

Literaturverzeichnis

- [1] *Böhm, J., and H. Schuh*: Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004.

- [2] *Böhm, J.*: Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI, Veröffentlichung des Instituts für Geodäsie und Geophysik, Geowissenschaftliche Mitteilungen Heft Nr. 68, ISSN 1811-8380, 2004.
- [3] *Davis, J.L., T.A. Herring, I.I. Shapiro, A.E.E. Rogers and G. Elgered*: Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length, *Radio Science*, Vol. 20, No. 6, pp. 1593-1607, 1985.
- [4] *Marini, J.W.*: Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile, *Radio Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 223-231, 1972.
- [5] *Niell, A.E., A.J. Coster, F.S. Solheim, V.B. Mendes, P.C. Toor, R.B. Langley and C.A. Upham*: Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS and VLBI, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, pp. 830-850, 2001.
- [6] *Niell, A.E.*: Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 101, B2, pp. 3227-3246, 1996.
- [7] *Niell, A.E., and L. Petrov*: Using a Numerical Weather Model to Improve Geodesy, in *Proceedings: The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy*, April 2-4, 2003, Luxembourg, 2003.
- [8] *Titov, O., V. Tesmer, J. Böhm*: Occam Version 5.0 Software User Guide, AUSLIG Technical Report 7, 2001.

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Dr. Johannes Böhm: Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien. email: johannes.boehm@tuwien.ac.at 