



Doctoral Thesis

## **GPS based determination of the integrated and spatially distributed water vapor in the troposphere**

**Author(s):**

Troller, Marc Roland

**Publication Date:**

2004

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004796376> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 15513

**GPS based Determination of the  
Integrated and Spatially Distributed  
Water Vapor in the Troposphere**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
MARC ROLAND TROLLER  
Dipl. Verm. Ing. ETH  
born September 6, 1974  
citizen of Olten and Kienberg SO

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. H.-G. Kahle, examiner  
Prof. Dr. M. Rothacher, co-examiner

Zurich 2004

---

## Abstract

Climate change and global warming have become a major challenge for the sustainable development of our Earth and its environment. Intensive research is carried out to understand atmospheric processes and their implications. In this content, water vapor plays a key role. It is an important component of the global energy balance and is involved in many chemical reactions. In microwave measurements, the tropospheric refractivity causes a delay in the arrival of the signal propagating through the atmosphere. This refraction effect is one of the limiting factors in accurate GPS positioning. The tropospheric path delay can be decomposed into a dry and wet part, where the latter part is coupled with the integrated precipitable water vapor above the GPS receiver.

On the one hand, the refraction effect has to be corrected for GPS measurements, on the other hand, it is a valuable signal to determine the spatial distribution of the water vapor. This study investigates both aspects. For the first part, two basic approaches are looked into: One method is based on meteorological measurements. Thereby, the integrated amount of water vapor and its temporal variation are the prime target. The other concept makes use of long-term GPS measurements. The arrival delay of the GPS signals are used, to estimate the integrated amount of water vapor. This result can then be the basis to determine its spatial distribution and temporal behavior. The investigation is based on a tomographic approach and forms the main content of part 2 of this thesis.

In part 1, an extension of the software package COMEDIE is developed and applied to determine tropospheric path delays. COMEDIE allows a four-dimensional modeling (in space and time) of the meteorological parameters air pressure, temperature and water vapor pressure using a collocation approach. Integrating the meteorological parameters, tropospheric path delays are obtained. Evaluations and comparisons in Switzerland show the performance of this method. An overall good agreement was achieved compared to GPS-estimated path delays. The accuracy depends on the season, and is in the range of 1-2 cm for the tropospheric path delay.

Continuous GPS measurements allow to estimate tropospheric path delays in the GPS processing. In a second approach of part 1, a method based on such GPS-estimated path delays is developed. It uses - like COMEDIE - a four-dimensional model and a collocation adjustment to estimate tropospheric path delays at desired locations. Evaluations are carried out in the area of Switzerland using the permanent GPS network AGNES. Long-term time series of cross-correlations are analyzed. An accuracy of 0.5 - 1.5 cm is obtained.

To resolve the GPS-estimated water vapor in the vertical, a tomographic approach is investigated in part 2 of this study. It is based on the assimilation of GPS double-difference observations. The wet refractivity field is determined applying a least-squares adjustment. To test the performance of the software, different weather

---

conditions are simulated. Various stochastically constrained models are applied and discussed in terms of inversion stability. Results from real data gathered during a dedicated measurement campaign in the high density GPS network of the Big Island of Hawaii are analyzed. Compared to radiosondes, an accuracy of about 10 ppm (refractivity units) is achieved.

To compare the potential and limits of the investigated methods, independent data must be available. An extensive study is performed in the area of Switzerland to evaluate and compare all presented methods with each other. For the validation, data of the numerical weather model aLMo are used. Seven days of data in a high spatial distribution and on an hourly basis are investigated. The tropospheric path delays resulting from the various methods are compared and analyzed. An overall good agreement with the aLMo data was observed. To evaluate the spatial distribution of water vapor, 7680 refractivity profiles are determined with the tomographic method and compared with the numerical weather data. The analysis contains four tomographic approaches including different types of constraints. The results are statistically evaluated and compared. A correlation between the accuracy and the weather situation was found. Overall, an agreement of 5-7 ppm (refractivity units) was achieved compared to aLMo.

In conclusion, it can be stated that the determination of the integrated amount of water vapor in the troposphere was successfully performed. For the main geodetic application, the correction of GPS measurements, the estimation of path delays in the GPS processing is recommended, provided long-term GPS phase observations are available. For the determination of the spatial distribution and the temporal variation of the integrated amount of water vapor, modeling of the GPS-estimated path delays is a successful method. Moreover, the principal feasibility to resolve the vertical distribution of the water vapor applying the tomographic approach was demonstrated. However, further investigations concerning constraints or the introduction of additional information are required.

---

## Zusammenfassung

Klimaveränderung und globale Erderwärmung bilden heutzutage eine grosse Herausforderung für die nachhaltige Entwicklung unseres Planeten Erde und die Umwelt. Mit intensiver Forschungstätigkeit wird versucht, die atmosphärischen Prozesse und deren Auswirkungen zu verstehen. In diesem Zusammenhang bildet der Wasserdampf eine Schlüsselfunktion. Er ist in vielen chemischen Reaktionen involviert und bildet damit eine wichtige Grösse für die globale Energiebilanz. Das durch die Atmosphäre laufende Mikrowellen-Signal wird aufgrund der Refraktion verzögert. Dieser Effekt verursacht einen bedeutenden Genauigkeitsverlust von GPS. Troposphärische Weglängenverzögerungen können in einen trockenen und feuchten Anteil separiert werden, wobei letzterer mit dem gesamten (integrierten) ausfällbaren Wasserdampf oberhalb des GPS-Empfängers zusammenhängt.

Der Refraktivitätseffekt muss einerseits als Korrektur bei den GPS Messungen angebracht werden, andererseits kann er als Signal zur Bestimmung der räumlichen Verteilung des Wasserdampfes aufgefasst werden. In dieser Arbeit werden beide Aspekte untersucht. Im ersten Teil werden zwei grundlegende Ansätze zur Korrektur des troposphärischen Effektes erforscht. Einerseits wird die Refraktivität mit Hilfe von meteorologischen Daten modelliert. Dabei ist das Hauptziel die Bestimmung des integralen Wasserdampfgehaltes und dessen zeitliche Veränderung. Andererseits wird mit langen GPS-Messreihen die Zeitverzögerung des Signals ermittelt und der integrale Wasserdampfgehalt geschätzt. Letzterer kann im zweiten Teil dieser Arbeit dazu benutzt werden, um die räumliche Verteilung und das zeitliche Verhalten des Wasserdampfes zu bestimmen. Diese Untersuchungen basieren auf einem tomographischen Ansatz.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird eine Erweiterung der Software COMEDIE zur Bestimmung von troposphärischen Weglängenverzögerungen untersucht. COMEDIE erlaubt eine vierdimensionale Modellierung (Raum und Zeit) der meteorologischen Parameter Luftdruck, Temperatur und Wasserdampfdruck mittels eines Kollokationsansatzes. Durch die Integration der meteorologischen Parameter entlang des Signalweges lassen sich die troposphärischen Weglängenverzögerungen bestimmen. Auswertungen und Vergleiche im Gebiet der Schweiz zeigen die Qualität dieser Methode auf. Im Allgemeinen konnten gute Übereinstimmungen mit den Weglängenverzögerungen, welche mit GPS geschätzt wurden, erreicht werden. Die Genauigkeit ist jahreszeitabhängig und erreicht eine Grössenordnung von 1-2 cm für die troposphärischen Weglängenverzögerungen.

Kontinuierliche GPS-Messungen erlauben die Schätzung der troposphärischen Weglängenverzögerungen mit einer GPS-Auswertesoftware. Im nächsten Teil dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, die auf aus GPS geschätzten Weglängenverzögerungen basiert. Es wird - wie bei COMEDIE - eine vierdimensionale Modellierung und eine Kollokationsausgleichung zur Bestimmung von troposphärischen Weglängenverzögerungen an beliebigen Orten verwendet. In der Schweiz wurden Daten

---

des GPS-Permanentnetzes AGNES ausgewertet. Mit Hilfe der Kreuzkorrelationsmethode wurden Zeitserien analysiert. Dabei konnte eine Genauigkeit von 0.5-1.5 cm erreicht werden.

Um die Höhenverteilung des mit GPS geschätzten Wasserdampfes bestimmen zu können, wird ein tomographischer Ansatz untersucht. Dieser basiert auf GPS-Doppeldifferenz-Beobachtungen. Der Feuchtanteil des Refraktivitätsfeldes wird mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Um die Leistungsfähigkeit der Software zu untersuchen, wurden unterschiedliche Witterungsverhältnisse simuliert. Modelle mit verschiedenen stochastischen Nebenbedingungen wurden benutzt und bezüglich der Inversionsstabilität untersucht. Dazu wurden auch Auswertungen einer Messkampagne im dichten GPS-Netz von Hawaii analysiert. Der Vergleich zu Radiosonden ergab eine Genauigkeit von ca. 10 ppm (Refraktivitätseinheiten).

Um das Potential und die Grenzen der untersuchten Methoden bestimmen zu können, wurden alle oben vorgestellten Ansätze in einer ausgedehnten Studie auf dem Gebiet der Schweiz miteinander verglichen. Als Referenz wurden Daten des numerischen Wettermodells aLMo benutzt. Die Untersuchungen basieren auf stündlichen Zeitserien während sieben Tagen mit hoher räumlicher Auflösung im ganzen Gebiet der Schweiz. Die resultierenden troposphärischen Weglängenverzögerungen wurden miteinander verglichen und analysiert. Im Allgemeinen konnte eine gute Übereinstimmung mit den aLMo-Daten festgestellt werden. Um die räumliche Verteilung des Wasserdampfes zu untersuchen, wurden 7680 Refraktivitätsprofile mit der tomographischen Methode bestimmt und mit den numerischen Wetterdaten verglichen. Die Analyse beinhaltet vier tomographische Lösungen mit verschiedenen Nebenbedingungen. Die Auswertungen wurden statistisch analysiert und verglichen. Dabei wurde eine Korrelation zwischen der erreichten Genauigkeit und der Wettersituation festgestellt. Generell konnte im Vergleich mit aLMo eine Genauigkeit von 5-7 ppm (Refraktivitätseinheiten) erreicht werden.

Als Fazit dieser Arbeit kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Bestimmung des integralen Wasserdampfgehaltes in der Troposphäre erfolgreich demonstriert wurde. Für die geodätische Hauptanwendung, die Korrektur von GPS Messungen, wird aufgrund der gezeigten Ergebnisse weiterhin die Schätzung der Weglängenverzögerungen mit der GPS-Auswertesoftware empfohlen. Vorausgesetzt ist allerdings, dass GPS-Phasenmessungen mit langen Messzeiten vorliegen. Für die Bestimmung der räumlichen Verteilung und der zeitlichen Variation des integralen Wasserdampfgehaltes kann die Modellierung der mit GPS geschätzten Weglängenverzögerungen erfolgreich eingesetzt werden. Zudem wurde die Machbarkeit des tomographischen Ansatzes zur Bestimmung der Höhenauflösung des Wasserdampfes aufgezeigt. In diesem Zusammenhang sind noch weitere Untersuchungen bezüglich der Verwendung von Modellzwängen und auch weiterer zusätzlicher Informationen notwendig.