

Diss. ETH No. 20012

**WATER VAPOR TOMOGRAPHY USING  
GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS**

A dissertation submitted to the  
ETH Zurich  
for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
DONAT PERLER  
MSc ETH CS  
born January 04, 1980  
citizen of Wünnewil-Flamatt, Gurmels, and Fribourg

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. A. Geiger, examiner  
Prof. Dr. M. Rothacher, co-examiner  
Dr. D. Ruffieux, co-examiner

2011

# Abstract

Water vapor plays an important role in the atmosphere. It is involved in many atmospheric processes and is a major contributor to the atmospheric energy budget and as such is a key quantity in numerical weather prediction (NWP) models. In recent years, NWP models gain in importance in hazard mitigation. But to provide precise quantitative forecasts, especially with respect to precipitation, we need accurate knowledge of the water vapor distribution in the atmosphere. Ground-based Global Navigation Satellite System (GNSS) tomography is a technique which can provide highly resolved and accurate water vapor profiles in space and time.

The main objective of this thesis is to develop new tomographic algorithms which fulfill the requirements to assimilate refractivity measurements derived from GNSS into NWP models. A new tomography software called AWATOS 2 has been implemented. It is an assimilation system for point and integrated refractivity measurements. The tomographic model in AWATOS 2 is formulated as a Kalman filter and different voxel parameterizations are provided. The new trilinear and spline-based parameterizations allow a more accurate representation of the refractivity field without considerably increasing the number of unknowns. Advantages of these new parameterizations are a) more accurate results, b) point observations need not to be interpolated to the voxel centers and c) the tomographic solutions are at least  $C^0$ -continuous in space. The stochastic prediction model implemented in AWATOS 2 relies on in-situ measurements and NWP model data. The prediction model is evaluated and adjusted with respect to data from the high-resolution NWP model COSMO-2 and from balloon soundings in Europe. In addition, AWATOS 2 provides a sophisticated simulation framework to carry out synthetic tests based on simple refractivity fields and on NWP model data.

The algorithms of AWATOS 2 are assessed with synthetic tests and with real data in a long-term study using one year of data. The synthetic tests have confirmed the theoretical properties of the model such as a bias-free solution in case of bias-free input data, fast convergence rates, and the capability to resolve vertical structures in the wet refractivity field. In the long-term study, a root-mean-square (RMS) error of 3.0 ppm ( $0.4 \text{ g m}^{-3}$  absolute humidity) is achieved with respect to the NWP model COSMO-7. The investigations have shown that the newly introduced voxel parameterizations lead to significantly more accurate results than the classical constant parameterization. The improvements are about 15% with respect to balloon soundings and 5% with respect to NWP analysis data. The performance of the trilinear and spline-based parameterizations are similar.

Further investigations have revealed the importance of a bias correction model. A newly developed bias correction model has decreased the RMS error with respect to the NWP model analysis from 4.9 ppm ( $0.7 \text{ g m}^{-3}$ ) to 3.0 ppm ( $0.4 \text{ g m}^{-3}$ ) using the spline parameterization. For the other parameterizations, the improvements are significantly smaller. The systematic differences corrected here are mainly caused by a) systematic differences between GPS tropospheric path delays and the NWP model data and b) by discretization errors. Another error source is related to the departure of the NWP model's topography from the true one which can amount to several hundred meters in alpine areas. Investigations have shown that processes near the Earth's surface have a strong impact on the wet refractivity. Therefore, differences between the true topography and that of the NWP model can cause substantial errors. This topic has to be addressed if GNSS observations are assimilated into NWP models in complex terrain.

Considerable progress has been made in the field of low-cost GNSS receivers in recent years

---

allowing to build dense networks at low costs. Furthermore, the existing GNSSs are improved and new ones are being launched. These developments offer new possibilities in GNSS tomography. With error analyses, the potential of such improvements for GNSS tomography have been investigated. The use of GPS together with Galileo has the potential to improve the formal accuracy of the GNSS tomography by 10-15% compared to a GPS-only solution. In Switzerland, equipping the SwissMetNet with GNSS receivers would increase the number of GNSS stations from 31 to 91. This would improve the formal accuracy of the tomographic solution by about 20-25%. The investigations have shown that the improvements obtained by a more dense network and additional GNSSs are cumulative. Placing the stations on different altitudes and choosing locations with good satellite visibility are important to achieve accurate results and should be considered in the design of GNSS networks.

All investigations have demonstrated that accurate 4D distributions of the wet refractivity in the troposphere can be estimated with GNSS tomography. The work has also revealed the possibilities and limitations of GNSS tomography in view of the assimilation into NWP models and proposes solution strategies to overcome the limitations.

# Zusammenfassung

Wasserdampf spielt eine wichtige Rolle in der Atmosphäre. Er ist in vielen atmosphärischen Prozessen involviert und beeinflusst stark den Energiehaushalt der Atmosphäre. Als solcher ist er eine der wichtigsten meteorologischen Größen in den numerischen Wettervorhersagemodellen. In den letzten Jahren wurden Wettermodelle zu einem wichtigen Bestandteil in der Vorhersage und Beurteilung von Unwetter. Um jedoch präzise Vorhersagen über beispielsweise die Niederschlagsmenge machen zu können, bedarf es genauer Kenntnisse über die Verteilung des Wasserdampfes in der Atmosphäre. Wasserdampf-Tomografie mittels globaler Positionierungssysteme (GNSS) ist eine Methode, die zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Wasserdampffelder mit hoher Genauigkeit zur Verfügung stellen kann.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung neuer Tomografie-Algorithmen, welche die Anforderungen zur Assimilation von Feuchtrefraktivitäten in numerische Wettermodelle erfüllen. Zu diesem Zweck ist eine neue Tomografie-Software namens AWATOS 2 entwickelt worden. Die Software ist ein System zum Assimilieren von beliebigen Punkt- und Integralmessungen, die auf der Refraktivität basieren. AWATOS 2 basiert auf einem Kalman-Filter und bietet verschiedene Parameterisierungen des Wasserdampffeldes an. Die Parameterisierung mittels trilinearen Funktionen und kubischen Spline Funktionen erlauben eine genauere Wiedergabe des Wasserdampffeldes, ohne die Anzahl der zu schätzenden Parameter wesentlich zu erhöhen. Die Vorteile dieser neuen Parameterisierungen sind a) genauere Resultate, b) Punktmessungen müssen nicht mehr auf das Voxelzentrum interpoliert werden und c) die tomografische Lösung ist in jedem Fall  $C^0$ -kontinuierlich im Raum. Das in AWATOS 2 implementierte stochastische Vorhersagemodell basiert auf Erkenntnissen aus in-situ Beobachtungen (Bodenstationen und Ballonsondierungen) und Wettermodell-Daten. AWATOS 2 bietet ausserdem viele Simulationsmöglichkeiten an, um synthetische Tests basierend auf generischen Wasserdampffeldern und Wettermodell-Daten durchzuführen.

Die in AWATOS 2 verwendeten Modelle wurden in synthetischen Tests und in einer Langzeitstudie von einem Jahr Dauer mit realen Daten getestet. Die synthetischen Tests haben die theoretischen Eigenschaften der Modelle bestätigt. Insbesondere wurden die Eigenschaften, dass die Tomografie-Lösung keine systematischen Fehler aufweist, insofern auch die Messungen keine aufweisen, bestätigt, wie auch die schnelle Konvergenzrate und das Auflösungsvermögen von vertikalen Strukturen im Refraktivitätsfeld. In der Langzeitstudie wurde eine Genauigkeit (mittlere quadratische Abweichung) von 3.0 ppm ( $0.4 \text{ g m}^{-3}$  absolute Feuchte) bezüglich des Wettermodells COSMO-7 erreicht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die neuen Parameterisierungen im Vergleich zur Parameterisierung mit konstanten Voxelrefraktivitäten zu signifikant genaueren Resultaten führen. Die Verbesserungen betragen 15% im Vergleich mit Ballonsondierungen und 5% im Vergleich mit Wettermodelldaten. Zwischen den Genauigkeiten, die mit den beiden neuen Parameterisierungen erreicht werden, gibt es kaum Unterschiede.

Weitergehende Untersuchungen haben die Bedeutung eines Modells für die Korrektur von systematischen Fehler deutlich gemacht. Ein in dieser Arbeit entwickeltes Modell verkleinert den Fehler (mittlere quadratische Abweichung) der Tomografie gegenüber dem Wettermodell von 4.9 ppm ( $0.7 \text{ g m}^{-3}$ ) auf 3.0 ppm ( $0.4 \text{ g m}^{-3}$ ) bei Verwendung von der auf kubischen Spline basierenden Parameterisierung. Die Verbesserungen bei den anderen Parameterisierungen sind signifikant kleiner. Die systematischen Differenzen beruhen vorwiegend a) auf systematischen Differenzen zwischen dem numerischen Wettermodell und den troposphärischen Weglängenverzögerungen aus GPS Messungen und b) auf Diskretisierungsfehler. Eine andere Fehlerquelle ist die Abweichung der Mo-

---

dellorographie des Wettermodells von der realen Topographie. Diese Abweichung kann in alpinen Regionen bis zu mehreren hundert Meter betragen. Untersuchungen haben gezeigt, dass Prozesse in der Nähe der Erdoberfläche grossen Einfluss auf die Feuchtrefraktivität haben. Dadurch können sich grosse Unterschiede zwischen Wettermodell und Tomographielösung an Stellen im Feuchtrefraktivitätsfeld ergeben, wo sich die Topografie des Wettermodells stark von der Wirklichkeit unterscheidet. Diese Erkenntnis sollte bei der Assimilation von GNSS Daten in numerische Wettermodelle in Gebieten mit komplexer Topografie beachtet werden.

Beachtenswerte Fortschritte wurden im Bereich von günstigen GNSS-Empfängern in den letzten Jahren gemacht. Diese erlauben mit geringen Kosten dichte Empfängernetze aufzubauen. Andererseits wurden existierende globale Positionierungssysteme technisch verbessert und neue sind im Aufbau. Diese Entwicklungen eröffnen neue Möglichkeiten für die Wasserdampf-Tomografie. Mittels Fehleranalysen wurde das Potential dieser Entwicklungen für die Wasserdampf-Tomografie abgeschätzt. Die formale Genauigkeit der Tomografie kann durch die Verwendung von Galileo als zusätzliches Satellitensystem zu GPS um 10-15% verbessert werden. Würde man das SwissMetNet mit GNSS-Empfänger ausrüsten, würde dies die Anzahl der Stationen in der Schweiz von 31 auf 91 erhöhen und die formale Genauigkeit der Tomografie um 20-25% verbessern. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass die Genauigkeitsgewinne durch zusätzliche Satellitensysteme und dichtere Netze kumulativ sind. Zudem hat sich gezeigt, dass die Platzierung der Empfänger an Orten, die gut über die Höhe verteilt sind und die eine gute Sichtbarkeit der Satelliten aufweisen, wichtig ist, um genaue Ergebnisse mit der Wasserdampf-Tomografie erzielen zu können. Dies sollte beim Planen neuer Netze beachtet werden.

Alle Untersuchungen haben gezeigt, dass genaue vierdimensionale Verteilungen der Feuchtrefraktivität in der Troposphäre mittels Wasserdampf-Tomografie geschätzt werden können. Die Arbeit hat auch die Möglichkeiten und Grenzen der Wasserdampf-Tomografie in Hinblick auf die Assimilation der Feuchtrefraktivität in numerische Wettermodelle aufgezeigt. Zudem wurden Lösungsstrategien vorgeschlagen, wie die Limitierungen überwunden werden können.