

DISS. ETH NO. 18225

**Sea Surface Topography and Marine Geoid by
Airborne Laser Altimetry and Shipborne Ultrasound Altimetry
in the Aegean Sea**

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

presented by
PHILIPPE LIMPACH
Ing. Génie Rural EPFL
born September 7, 1977
citizen of Luxembourg

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

2009

Abstract

The aim of this thesis was to contribute to the improvement of sea level monitoring and to provide local-scale information on the short-wavelength structure of the marine gravity field, by developing enhanced methods for offshore sea surface height observations. The methods investigated included airborne laser altimetry, shipborne ultrasound altimetry and GPS-equipped buoys.

In a first step, instrumental aspects of sea surface height observations by airborne and shipborne altimetry are analyzed and discussed. Knowledge of high-precise position and attitude of the range sensor is crucial for an accurate sea surface height computation. For this purpose, the aircraft and boat were equipped with a multi-antenna GPS array and inertial systems. Instantaneous sea surface heights were computed from the range data by direct georeferencing. Important aspects are the influences of errors in the differential kinematic GPS positioning and in the attitude determination, as well as the calibration of boresight misalignments. In a second step, the instantaneous sea surface heights were reduced to mean sea surface by applying corrections for geophysical effects, including waves, tides and atmospheric pressure and wind forcing.

In the framework of this work, several regional campaigns for sea surface height surveys based on airborne and shipborne altimetry were carried out in the Eastern Mediterranean Sea. Dedicated offshore sea surface height surveys, including deployments of GPS buoys, were performed along Jason-1 radar altimetry ground-tracks, providing in situ sea surface height information. Airborne laser altimetry data was acquired along densely-spaced flight-tracks covering an area of 200 km by 200 km around the western part of the island of Crete, Greece, in the vicinity of the Hellenic Trench. The objective was the determination of a detailed regional geoid and sea surface topography model in the framework of the GAVDOS project, funded by the European Union. Furthermore, several campaigns for shipborne sea surface height observations were carried out in the North Aegean Sea, in the vicinity of the North Aegean Trough.

Based on the airborne and shipborne altimetry data, a high-resolution sea surface topography of the survey areas was computed, with a vertical accuracy below 10 cm. Geoid heights were derived from the sea surface heights by subtracting the mean dynamic ocean topography, induced by ocean currents. Around western Crete, the geoid obtained from airborne laser altimetry is characterized by very pronounced gradients, with an average slope of 20 m along a distance of only 200 km and maximum local gradients of 22 cm/km. These gradients are a clear indication for strong gravity effects caused by the bathymetry and the geodynamic system of the Hellenic Trench. In the North Aegean Sea, the geoid obtained from shipborne altimetry shows a distinct depression of more than 1.5 m, indicating a connection with the bathymetry and the geodynamic features of the North Aegean Trough.

The high resolution and accuracy of the geoid heights obtained in both survey areas was shown by comparisons with mean sea surface models from multi-mission spaceborne radar altimetry and with global and regional geoid models. The reduction of the geoid heights for modeled mass effects of topography, bathymetry, marine sedimentary deposits and crust/mantle boundary revealed strong gravity anomalies related to the geodynamic processes in the survey areas.

Zusammenfassung

Ziel der Dissertation ist die präzise Bestimmung der Meeresoberfläche als Beitrag zur Verbesserung der Beobachtung des Meeresspiegels und zur lokalen Bestimmung der kurzwelligen Strukturen des Schwerefeldes. Zu diesem Zweck wurden mehrere Methoden zur präzisen und flächendeckenden Vermessung der Meeresoberfläche untersucht, weiterentwickelt und eingesetzt. Es handelt sich hierbei um flugzeuggestützte Laser-Altimetrie, schiffsgestützte Ultraschall-Altimetrie und GPS Bojen-Messungen.

In einem ersten Schritt werden die instrumentellen Aspekte von Meereshöhenbeobachtungen mittels flugzeug- und schiffsgestützter Altimetrie analysiert und diskutiert. Für die genaue Berechnung der Meereshöhen ist die präzise Kenntnis von Position und Lage der Messplattform von entscheidender Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden Flugzeug und Schiff mit mehreren GPS-Antennen und einem Inertialsystem ausgerüstet. Die momentanen Meereshöhen wurden mittels direkter Georeferenzierung aus den Altimeterdaten berechnet. Die wichtigsten Aspekte sind hierbei die Einflüsse von Fehlern in der differentiellen kinematischen GPS-Positionierung, Fehlern in der Lagebestimmung, sowie Orientierungsfehler der Sensoren. In einem zweiten Schritt wurden zeitabhängige Variationen der Meereshöhe, verursacht durch Einflüsse von Wellen, Gezeiten, Luftdruck und Wind, korrigiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere regionale Messkampagnen im östlichen Mittelmeer durchgeführt. Die Messgebiete beinhalten Ground-Tracks des Radar-Altimeter Satelliten Jason-1. Entlang dieser Tracks wurden Messungen während Überflügen von Jason-1 durchgeführt. In einem Gebiet von 200 auf 200 km rund um die Insel Kreta wurde die Meeresoberfläche mittels flugzeuggestützte Laser-Altimetrie vermessen. Das Gebiet umfasst einen Teil des Hellenischen Grabens. Ziel dieser Messkampagne war die Bestimmung eines detaillierten Geoid- und Meeresoberflächenmodells im Rahmen des GAVDOS-Projektes, unterstützt von der Europäischen Union. Des Weiteren wurden mehrere Messkampagnen mittels schiffsgestützter Ultraschall-Altimetrie in der Nord-Ägäis durchgeführt. Ein besonderes geodynamisches Merkmal dieser Region ist der Nordägäische Graben.

Mit Hilfe der Flugzeug- und Schiffsdaten konnte eine hochauflösende Meerestopographie mit einer vertikalen Genauigkeit unter 10 cm bestimmt werden. Durch Abzug der dynamischen Meerestopographie, welche durch Meeresströmungen verursacht wird, wurden aus den beobachteten Meereshöhen Geoidhöhen abgeleitet. Das resultierende Geoid rund um Kreta zeigt sehr starke Gradienten, mit einem durchschnittlichen Gefälle von 20 m auf 200 km und maximalen Gradienten von 22 cm/km. Diese Gradienten sind ein klarer Hinweis auf signifikante Schwerefeldeffekte, verursacht durch die Bathymetrie und das geodynamische System des Hellenischen Grabens. Das Geoid in der Nord-Ägäis zeigt eine ausgeprägte Depression von etwa 1.5 m, welche mit der Bathymetrie und den geodynamischen Eigenschaften des Nordägäischen Grabens in Verbindung gebracht werden kann.

Die hohe Auflösung und Genauigkeit der berechneten Geoidhöhen konnten durch Vergleiche mit Modellen der mittleren Meereshöhe aus Satelliten-Radar-Altimetrie, sowie mit globalen und regionalen Geoidmodellen, aufgezeigt werden. Des Weiteren wurden durch die Reduktion von modellierten Masseneffekten, verursacht durch Topographie, Bathymetrie, marinen Sedimenten und Krusten/Mantel-Grenze, starke Anomalien im Schwerefeld detektiert, welche mit den geodynamischen Prozessen in den Messgebieten in Verbindung stehen.