

DISS. ETH NO. 22020

3-D EM INVERSION OF GROUND-BASED MAGNETIC SQ
VARIATIONS. METHODOLOGY AND APPLICATION TO
AUSTRALIAN LARGE-SCALE ARRAY DATA

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

STEPHAN KOCH
M.Sc., LMU/TU, Munich, Germany

Born on March 5th 1984
Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

PD	Dr. Alexey Kuvshinov	ETH Zurich	Examiner
Prof.	Dr. Andrew Jackson	ETH Zurich	Co-examiner
Prof.	Dr. Nils Olsen	DTU	Co-examiner

Abstract

Resolving the three-dimensional (3-D) physical properties of the Earth's interior is one of the challenging tasks of modern geophysics. Two direct techniques can be utilized to gain information on the subsurface heterogeneity. The first comprises the measurement of seismic velocity anomalies. This technique has made a major contribution to our current understanding of Earth's composition and dynamics. The strength of this technique lies in its sensitivity to bulk mechanical properties, which influence the passing seismic wave field. Recent developments allow to sound the Earth's interior at many depths and scales with increasing accuracy. The second direct means of probing Earth's interior, is electromagnetic (EM) induction sounding which aims to recover the electrical conductivity distribution within the Earth. The strength of this technique lies in its sensitivity on fluids, partial melts and volatiles, but it is relevant to note that recovering the 3-D electrical conductivity on a regional to global scale has only become feasible through recent improvements in global 3-D EM forward modelling solutions and the vast growth of computational resources. So far, however, numerical inverse solution schemes exist to determine the shallow subsurface 3-D electrical conductivity from short period variations (< 3 h), and the deep mantle 3-D electrical conductivity from long period variations (> 24 h). Analysis of short-period variations exploits the approximation of the source by plane waves, and provides information to depths of 100 km. Analysis of variations longer than 24 h generally exploits the approximation of the magnetospheric source by a distant ring current and provides information in the depth range 500 - 1500 km. Conductivities in depth range 100 - 500 km remained poorly constrained due to lack of adequate tools that can deal with the complex Sq source structure, which is responsible for variations in the transitioned period range of 3 - 24 h. In the present work, we developed and applied a numerical solution that works in a consistent manner with Sq data.

In the work presented here we have pursued the following three main goals: (1) Implementation of an approach for accurate Sq source determination; (2) Development of an EM inversion scheme to recover the 3-D electrical conductivity from Sq ground based data; (3) Application of the scheme to experimental data in order to recover the upper mantle 3-D electrical conductivity distribution beneath Australia. Regarding task (1), we implemented an approach that makes use of a known conductivity structure of the Earth with nonuniform oceans. Based on model studies in synthetic, but realistic test environments, we showed that this approach outperforms the conventional potential method. Task (2) comprises the modifications of the inverse scheme, which was originally developed to work with local magnetic C -responses. In order to use complex Sq source data, we work with time spectra of the magnetic field rather than with C -responses. More

explicitly, the approach is based on a regularized least-squares formulation, exploits a limited-memory quasi-Newton optimization method, and makes use of the adjoint source approach to efficiently calculate the misfit function gradient. To compute EM fields we employ an integral equation solver. The numerical scheme was verified with synthetic tests. In addition, resolution studies were performed using checkerboard conductivity structures at depths between 10 and 1600 km for different inverse setups. We conclude from our model studies, that the vertical (Z) component is most sensitive to 3-D conductivity structure, and that Sq data can reliably resolve the heterogeneity in the depth range 100 – 520 km. Task (3) summarizes the application of the numerical scheme to ground-based geomagnetic Sq observations of the Australia Wide Array of Geomagnetic Stations (AWAGS). The dense AWAGS network was operated in the year 1991 and consisted of 53 non-permanent sites. From this data set we were able to recover the 3-D conductivity distribution beneath Australia in the depth range 100 – 520 km. Our 3-D inversions of data from either single or multiple days revealed a strong offshore conductor near the south-east coast of Australia, which persists at all considered depths. Varying in details, this anomaly is remarkably robust irrespective of the considered day(s). We compared our results to those obtained from a different inversion scheme and an independent induction data set, and observed encouraging similarity. Combination of the two results suggests, that this conductor continues to the base of the mantle transition zone at 660 km. The nature of this anomaly is not fully understood but one possible explanation is that it is attributed to a reservoir responsible for three hot spots in the region.

In order to better understand the dynamics of the Sq source system, we also investigated in a side study the day-to-day, seasonal, longitudinal and solar cycle variability of the Sq foci tracks. For this purpose, we processed the data from Sq days of the years 1990 and 2011. The computed tracks result in narrow bands in the northern and southern hemisphere, which seem to neither follow the geographic nor the geomagnetic or dip equator. We interpret this observation as implying that the Sq foci tracks are controlled by an interplay of the Sun inclination – which causes the seasonal variations of Sq – and the Earth’s main magnetic field. Remarkably, we observe a distinct scattering of the tracks over the South Atlantic Anomaly (SAA), a depletion in the Earth’s magnetic main field. This systematic scattering is due to a larger shift of the southern hemisphere focus northwards during northern summer solstice and southwards during the southern summer solstice. Our explanation of this behavior is that if the main magnetic field is weak, which is the case for the SAA, the Sun inclination becomes the dominating factor leading to a larger sensitivity of the Sq current system on seasonal variations in the vicinity of the SAA.

Zusammenfassung

Die Bestimmung und Interpretation der dreidimensionalen (3-D) physikalischen Eigenschaften des Erdinneren ist eine der Herausforderungen moderner Geophysik. Zwei direkte Methoden können genutzt werden um Informationen über die Heterogenität des Erdinneren zu gewinnen. Die erste, und am weitesten entwickelte, basiert auf der Interpretation von seismischen Geschwindigkeitsanomalien, welche zum grundlegenden Verständnis über die Struktur und Dynamik des Erdinneren beigetragen hat. Diese Technik nutzt die Sensitivität seismischer Wellen bezüglich mechanischer Eigenschaften des Erdinneren. Die jüngsten Entwicklungen in diesem Forschungsfeld ermöglichen, das Erdinnere in allen Tiefen und Skalen mit zunehmender Genauigkeit in 3-D zu kartieren. Die zweite Möglichkeit, um das Innere der Erde zu untersuchen, ist elektromagnetische (EM) Tiefensondierung. Hierbei wird die elektrische Leitfähigkeit innerhalb der Erde bestimmt, welche als Indikator für Flüssigkeiten und Schmelzen im Erdinneren interpretiert werden kann. Es sei angemerkt, dass die Bestimmung der 3-D elektrischen Leitfähigkeit im globalen Maßstab erst im letzten Jahrzehnt realisierbar wurde. Ausschlaggebend dafür waren die jüngsten Entwicklungen in globaler 3-D EM Modellierung und die Verfügbarkeit von Computerressourcen mit wachsender Rechenleistung. Bisher existieren numerische Lösungsverfahren um die elektrische Leitfähigkeit der oberflächennahen Strukturen und des tiefen Erdmantels mit kurzperiodischen Feldvariationen (< 3 h), respektive mit langperiodischen Feldvariationen (> 24 h) in 3-D zu bestimmen. Hierbei stammen die kurzperiodischen Variationen mit einer Tiefenaufösung bis ca. 100 km von einem Quellsystem, das mathematisch als ebene Welle beschrieben werden kann. Die langperiodischen Variationen stammen von einem weiteren Quellsystem, dem magnetosphärischen Ringstrom. Diese können die elektrische Leitfähigkeitsverteilung in einer Tiefe von ca. 500 km bis 1600 km bestimmen. Die 3-D elektrische Leitfähigkeit im Bereich des oberen Mantels, in ca. 100 km bis 500 km Tiefe, konnte bislang nicht bestimmt werden. Die Feldvariation im Übergangsbereich mit Perioden von 3 – 24 h stammen von dem ionosphärischen Sq Quellsystem, welches aufgrund seiner komplexen geometrischen Struktur schwer zu ermitteln ist. Die vorliegende Arbeit beschreibt einen neuen numerischen Lösungsansatz und dessen Anwendung, um Daten von Sq Variationen zu invertieren und die elektrische Leitfähigkeit des mittleren Erdmantels in 3-D zu bestimmen.

Die Studie verfolgt drei Hauptziele: (1) Umsetzung eines numerischen Konzepts für eine genaue Sq Quellbeschreibung, (2) Entwicklung eines numerischen Inversionsalgorithmus, um die 3-D elektrische Leitfähigkeit mithilfe von Sq Daten zu bestimmen, (3) Anwendung der numerischen Lösung um die 3-D elektrische Leitfähigkeit des oberen Mantels unter Australien zu bestimmen. Aufgabe (1) basiert auf einem Konzept, welches ermöglicht

die bekannte elektrische Leitfähigkeit der Erdoberfläche einzubinden, um die Beschreibung des Quellsystems zu verbessern. Basierend auf Modellstudien in realistischen und synthetischen Testumgebungen zeigen wir, dass dieser Ansatz die traditionelle Gaußsche Potential Methode zur Feldtrennung verbessert. Aufgabe (2) umfasst die Änderungen eines existierenden Inversionsalgorithmus, welcher ursprünglich dazu entwickelt wurde mit magnetischen C -Responses zu arbeiten. Da das C -Response Konzept der komplexen Sq Quellstruktur nicht gerecht wird, verfolgt unser Ansatz die direkte Inversion der Zeitspektren der Magnetfeldvariation. Der Inversionsalgorithmus basiert auf einer regularisierten Least-Squares Formulierung mit einer Limited-Memory Quasi-Newton Optimierung und dem Adjoint-Source Ansatz für die effiziente Berechnung des Gradienten der Misfit Funktion. Die numerische Implementierung für die effiziente Modellierung der EM-Felder für das Vorwärtsproblem stammt aus der Integralgleichungsmethode. Der implementierte Inversionsalgorithmus wurde mithilfe synthetischer Checkerboard-Tests überprüft, um die horizontale und vertikale Auflösung zwischen 10 km und 1600 km abzuschätzen. Wir folgern aus diesen Studien, dass die vertikale (Z)-Komponente am empfindlichsten auf 3-D Leitfähigkeitsanomalien reagiert und Sq Daten sensitiv in einem Tiefenbereich von 100 km bis 520 km sind. Aufgabe (3) umfasst die Anwendung des numerischen Inversionsalgorithmus auf Sq Daten, welche mit dem Australia Wide Array of Geomagnetic Stations (AWAGS) Netzwerk im Jahr 1991 aufgezeichnet wurden, um die 3-D Leitfähigkeitsverteilung unterhalb Australiens im Tiefenbereich von 100 km bis 520 km zu bestimmen. Die resultierenden 3-D Modelle zeigen eine stark positive Leitfähigkeitsanomalie entlang der südöstlichen Australischen Küste. Die Modelle der einzelnen invertierten Tage unterscheiden sich im Detail, das großflächige Erscheinungsbild bleibt jedoch bestehen. Das finale Model wurde mit den Ergebnissen einer unabhängigen Studie verglichen, welche die 3-D Leitfähigkeit im mittleren bis tiefen Erdmantel bestimmt. Beide Modelle zeigen die küstennahe Leitfähigkeitsanomalie und die Kombination beider Modelle deutet auf einen durchgehenden Leiter von 100 km bis 660 km Tiefe hin. Der Grund für diese Anomalie ist nicht vollständig verstanden. Eine mögliche Erklärung ist, die Anomalie auf ein Reservoir zurückzuführen, welches mit drei Hot-Spot Vulkanen verbunden ist, die in direkter Umgebung der Anomalie zu finden sind.

Um die Dynamik des Sq Quellsystem genauer zu verstehen, wurde zusätzlich die tägliche, die saisonale sowie die Sonneyklus Variabilität der Sq Foki untersucht. Dafür wurden die Daten von Sq Tagen aus den Jahren 1990 und 2011 analysiert. Die Foki für 24 Stunden aller Sq Tage resultieren in schmalen Bändern in der nördlichen und der südlichen Hemisphäre, welche weder dem geographischen noch dem geomagnetischen oder dem Dip-Äquator folgen. Wir folgern daraus, dass das Sq Quellsystem durch das Zusammenspiel von zwei Hauptfaktoren beeinflusst wird. Zum einen von der Stellung der

Erde zur Sonne, welche die Jahreszeiten hervorruft, zum zweiten vom Hauptmagnetfeld der Erde. Bemerkenswert ist eine deutliche Streuung des Bandes über der Südatlantischen Magnetfeldanomalie. Diese systematische Streuung resultiert von einer Verschiebung des südlichen Sq Fokus in Richtung Norden während des nördlichen Sommers, und in Richtung Süden während der südlichen Sommers. Wir folgern daraus, dass das Sq Quellsystem sensitiver für die Erd-Sonnenkonstellation wird, wenn das Hauptmagnetfeld schwach ist, wie über der Südatlantischen Magnetfeldanomalie sichtbar wird.