



Doctoral Thesis

Hydrogeological investigation of the Okavango Delta, Botswana using helicopter TEM and ground-based geophysical methods

Author(s):

Podgorski, Joel E.

Publication Date:

2014

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010295873> →

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. 22177

**HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATION
OF THE OKAVANGO DELTA,
BOTSWANA USING HELICOPTER TEM
AND GROUND-BASED GEOPHYSICAL
METHODS**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
JOEL EDWIN PODGORSKI

MSc in Geophysics, University of British Columbia

born on 22.06.1975

citizen of the USA

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Wolfgang Kinzelbach
Prof. em. Dr. Alan Green
Prof. Dr. Markus Holzner
Prof. Dr. Esben Auken
Dr. Thomas Kalscheuer
Prof. Dr. Klaus Holliger

2014

ABSTRACT

The Okavango Delta, Botswana is a vast wilderness wetland located at the end of one of the longest undammed river systems in Africa. It is of great importance to both wildlife and the local tourism-based economy. Effective management and safeguarding of this irreplaceable resource requires comprehensive knowledge of the diverse physical and chemical processes at work within the delta.

A combination of airborne and ground-based geophysical methods along with hydrological modeling is employed to provide a deeper understanding of the delta's hydrogeology. The cornerstone of this work is represented by a helicopter transient electromagnetic (HTEM) survey, which allows the uppermost ~200 m of the subsurface to be imaged. The survey was recorded with 50-m line spacing over two 25 – 35 km² areas within the fan and 2-km line spacing over an area of 28,000 km² of the entire panhandle and fan.

A general processing and inversion strategy is developed to correct various systematic problems in these data sets, which include: errors in recording times and amplitudes, early time gates contaminated by transmitter current, noise in late time gates, and amplitude shifts between adjacent flight lines that manifest as artificial lineations in map view. Timing and amplitude errors are corrected by calibrating the HTEM data sets with soundings from a well-calibrated ground-based TEM instrument. Early and late time gates are semi-automatically removed, and amplitude shifts between lines are corrected with a pseudo-3D inversion scheme that includes altitude and time shift parameters. This processing scheme makes the basement depths of the inversions of this HTEM survey consistent with borehole and seismic information and removes the lineations present in the original data.

The HTEM inversions image three to four primary hydrogeological units from top to bottom: a ~40-m-thick layer of moderate resistivity, a ~50 – 150 m conductive layer, and one to two layers of relatively high resistivity. To validate and refine these results, ground-based geophysical field surveys were conducted at four sites within the delta employing the methods of electrical resistance tomography (ERT), TEM, and seismic reflection/refraction. 2D smoothness-constrained models of the ERT data improve the resolution of the resistivity of the uppermost ~50 m. Pseudo-2D inversions of ground-TEM data and seismic refraction tomography indicate the presence of 30 – 50 m of freshwater sands beneath the conductive layer in two-thirds of the upper fan. This area also has strong subhorizontal seismic reflectors above and at the sediment-basement interface.

The moderately resistive surface unit is interpreted as the freshwater-saturated sands of the Okavango Delta. The underlying conductive layer is interpreted to contain sediments from Paleo Lake Makgadikgadi (PLM) on the basis of water samples and borehole data. This expands the established area of PLM from about 66,000 km² to 90,000 km², making PLM larger than any lake on Earth today. The 30 – 50 m of underlying freshwater sands beneath the upper fan are interpreted to represent a Paleo Okavango Megafan (POM) on the basis of its semi-conical shape and the seismic reflectors contained within.

Beneath much of the fan, the HTEM model shows areas of moderate resistivity extending from the surface into the underlying PLM unit to ≥ 100 m depth. 2D hydrological modeling confirms that these areas represent freshwater infiltration from permanently flooded areas into the underlying saline PLM unit. This indicates that the lower section of the PLM unit must contain impermeable clay layers that prevent the migration of saline water into the underlying freshwater POM unit. Pockets of near-surface conductivity beneath islands and dry areas confirm the widespread presence of saltwater fingering, which functions to remove solutes from the freshwater surface environment. This is the first time that the full extent of freshwater and saline water infiltration has been imaged throughout the delta.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Okavango Delta in Botswana ist ein riesiges Wildnis-Feuchtgebiet, das sich am Ende eines der längsten Flusssysteme Afrikas befindet. Für Wildtiere und die lokale Tourismuswirtschaft ist es von aussergewöhnlicher Wichtigkeit. Die wirksame Leitung und die Bewahrung dieser unersetzlichen Ressource machen eine umfassende Kenntnis der verschiedenen zugrunde liegenden physikalischen und chemikalischen Prozesse im Delta nötig.

Um das Verständnis der Hydrologie im Delta zu vertiefen wurde eine Kombination geophysikalischer Methoden in der Luft und am Boden sowie hydrologische Modellierung verwendet. Ein Grundpfeiler dieser Arbeit ist eine mit dem Hubschrauber-durchgeführte transiente elektromagnetische (HTEM) Untersuchung, die die Darstellung der höchsten ~200 m der Erdoberfläche erlaubt. Diese Untersuchung wurde mit 50 m Linienabstand über zwei Flächen von 25-35 km² im Fan und 2 km Abstand über einer Fläche von 28'000 km² des gesamten Panhandle und Fan aufgenommen.

Eine neuartige Prozessierungs- und Inversions-Strategie wurde entwickelt, um verschiedene Probleme im Datensatz zu korrigieren: Systematische Fehler der Aufnahmezeiten und -amplituden, frühzeitige Aufnahmen kontaminiert durch den Senderstrom, Rauschen in den späteren Aufnahmen und Amplitude-Verschiebungen zwischen nebeneinanderliegenden Fluglinien, die sich als künstliche Lineationen in der Kartenansicht zeigen. Die Timing- und Amplitude- Fehler werden mit einer Kalibrierung der HTEM-Datensätze korrigiert, die die Messungen eines Boden-TEM-Instruments berücksichtigen. Früh- und Spät- Zeitaufnahmen werden halbautomatisch entfernt. Amplitude-Verschiebungen zwischen Linien werden mit einem Quasi-3D-Inversionsschema inklusive Höhe- und Zeitverschiebungs- Faktoren korrigiert. Dieses an jeden HTEM-Datensatz anpassbare Verfahrensschema gleicht die Inversionstiefen an die Bohrloch- und Seismik-Daten des Übergangs zwischen den Sedimenten und dem Urgestein an und entfernt die Lineationen vom ursprünglichen Datensatz.

Die HTEM-Inversionen bildeten drei bis vier primäre hydrogeologische Einheiten von oben nach unten ab: eine ~40 m dicke Schicht mit mässigem Widerstand, eine ~50-150 m leitfähige Schicht und ein bis zwei Schichten mit relativ hohem Widerstand. Die geophysikalischen Bodenmessungen bestehend aus elektrischer Widerstandstomografie (ERT), TEM und Reflexions- und Refraktionsseismik wurden zum Validieren und Verfeinern der HTEM-Resultate an vier Orten im Delta durchgeführt. 2D-glätthehemmende Modelle der ERT-Daten verbessern die Auflösung des Widerstands in den obersten ~50 m. Quasi-2D-Inversionen der TEM-Boden-Daten und Refraktionsseismik-Tomografie verweisen auf eine 30-50 m dicke Süswasser-Sandschicht unterhalb der leitfähigen Schicht in zwei Dritteln des oberen Fans. Dieses Gebiet hat starke subhorizontale seismische Reflektoren oberhalb und direkt bei dem Übergang zwischen den Sedimenten und dem Urgestein.

Die mässig resistive oberste Einheit wird als mit Süswasser gesättigte Sandschicht des Okavango Deltas interpretiert. Basierend auf Salzwasser-Proben und in Bohrlöchern befindlichem Ton wird davon ausgegangen, dass die unterliegende leitfähige Schicht Sedimente des Paläo-Makgadkadisees (PLM) beinhaltet. Dabei wird die bekannte Fläche

des PLMs von ungefähr 66'000 km² auf 90'000 km² vergrössert, was heute dem grössten See der Welt entspräche. Basierend auf seiner halbkegeligen Gestalt und den dazu gehörigen seismischen Reflektoren wird die 30-50 m dicke zugrunde liegende Süsswasser-Sandschicht unterhalb des oberen Fans als ein Paläo-Okavango-Megafan (POM) interpretiert.

Unterhalb eines grossen Teils des Fans zeigt das HTEM-Modell Flächen mit mässigem Widerstand, die sich von der Oberfläche durch die PLM-Einheit bis in mehr als 100 m Tiefe erstrecken. 2D-hydrologische Modellierung bestätigt, dass diese Flächen die Süsswasser-Einsickerung von permanent überschwemmten Gebieten darstellen. Das zeigt, dass der niedrigere Teil der PLM-Einheit undurchlässige Ton-Schichten beinhalten muss, die die Salzwasser-Migration vom regionalen Aquifer in die darunter liegende POM-Einheit verhindern. Isolierte leitfähige Stellen direkt unterhalb von Inseln und Trockengebieten bestätigen das verbreitete Phänomen von Salzwasser-Fingering, welches aufgelöste Stoffe von der Süsswasser-Oberfläche entfernt. Das ist das erste Mal, dass das komplette Ausmass der Süsswasser- und Salzwasser-Einsickerung im ganzen Okavango Delta abgebildet wurde.