

DISS. ETH NO. 18083

**APPLICATION OF AIRBORNE GEOPHYSICS IN
LARGE SCALE HYDROLOGICAL MAPPING;
OKAVANGO DELTA, BOTSWANA**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

LESEGO PIUS KGOTLHANG

M. Sc., ITC Delft, The Netherlands

born 28.02.1969

citizen of Botswana

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Wolfgang Kinzelbach

Prof. Dr. Alan Green

Prof. Dr. Esben Auken

2008

Abstract

The Okavango River rises in the humid Southern Highlands of Angola and passes through Namibia before entering the north-western corner of Botswana where it terminates into the Okavango Delta, bounded by faults of the northeast trending Okavango Graben. It is in this graben that the delta sediments form a massive alluvial fan. The topographic relief is quite subdued over the whole Delta and the underlying geology is largely obscured by the sediments. To obtain subsurface information in such a terrain is a daunting task. Earth Observation Satellites (EOS) and aerial photography can only provide information on the ground or to some extent a few millimetres below ground. A conventional technique like drilling is not only expensive (in both time and resources), but also the least attractive if we are to preserve the pristine nature of the Delta. There is, therefore, a need to use other remote sensing techniques that can give information from within the subsurface.

This thesis focuses on the integrated use of remotely sensed airborne magnetic, electromagnetic and ground-based gravity data sets for hydrological mapping of the pristine Okavango wetlands. We seek to determine the geometry of the aquifer system underlying the overland flow system. The two systems are coupled and hence one cannot model flow dynamics of one system without considering the influence of the other. It has been estimated by previous workers that approximately 300 000 tonnes of salts are deposited in the delta system. Being a terminal evaporative system that has fresh surface waters requires that some portion of the salts be fed into the deep aquifer to account for the salt balance. We investigate the mechanism that is responsible for disposing of the salt other than the one that results in encrustation of salts onto the numerous islands scattered throughout the delta.

The results from our analysis of airborne magnetics and ground-based gravity data show that the aquifer thickness is structurally controlled and is on average 180m thick. It is thicker within the Okavango Graben and thinner on the flanking horst structures. We insert the distributed aquifer thickness derived from airborne magnetic data into our hydrological model, which we use to simulate impacts of water management scenarios and the consequences of natural influences, like climate. We show through the use of a coupled surface-groundwater hydrological model that earthquake movements could have played a role in influencing the surface-flow-regime shift observed in the Okavango Delta. This is achieved by tilting the most tectonically active north-eastern block and the panhandle by a modest 30cm in a southwest direction and simulating the effect of this on the spatial distribution of flooding frequency. An average increase of about 20 % in flooding frequency is observed along the south-western branch of the Delta. However, it appears that small scale tectonic events, as postulated by previous workers, have more influence than the average regional subsidence.

We have found from ground resistivity derived from airborne electromagnetic data that the numerous islands in the delta provide a platform whereupon evapo-concentration of salts leads to salt removal below the islands due to density driven flow. This finding

underscores the importance of preserving the Delta's 'coastline' provided by the islands-surface water interface. Our work with these data also reveals a feature that appears to be an earlier delta buried in a small graben system in the upper part of the Okavango Delta. This feature terminates against some northeast trending proximal faults pretty much in the same way as the present day delta terminates against the distal Kunyere-Thamalakane fault system. Resistivity data suggest that this feature contains freshwater-bearing material capped by a low resistivity material that is most likely to be clay or clayey sands. Indeed borehole information show that the feature is a fine-grained freshwater-bearing sand capped by clay. We refer to this feature as the Proto-Okavango Delta.

Our results from the airborne electromagnetic survey can be used for further work in attempts to better understand the dynamics of spatial salinity distribution through mass transport modelling. A flow model has been developed in a co-thesis and therefore progression in this direction should not be an insurmountable task.

Kurzfassung

Der Okavango Strom entspringt in den feuchten, südlichen Hochebenen Angolas. Der Strom durchquert Namibia und erreicht den Nordosten von Botswana, wo sein Lauf in einem Binnendelta endet, das durch die Verwerfungen des nordöstlich verlaufenden Okavango Grabens begrenzt wird. In diesem Graben haben die Deltaablagerungen einen mächtigen Schwemmfächer gebildet. Die Oberflächentopographie ist über das ganze Gebiet des Deltas sehr flach und die darunter liegenden Gesteinseinheiten sind fast vollständig durch Sedimente verdeckt. In einer solchen Umgebung Untergrundinformationen zu gewinnen, ist mit grossem Aufwand verbunden. Anhand von Erderkundungssatelliten und Luftbildaufnahmen können Kenntnisse über die Oberfläche und zum Teil über die obersten Millimeter des Bodens erhalten werden. Herkömmliche Erkundungsmethoden wie Bohrungen sind nicht nur Zeit- und Ressourcenaufwendig, sie sind auch wenig geeignet wenn es darum geht, die unberührte Natur des Deltas zu erhalten. Es besteht deshalb das Bedürfnis, Fernerkundungsmethoden einzusetzen, die Erkenntnisse über den Untergrund liefern können.

Die vorliegende Doktorarbeit ist auf die integrierte Nutzung von Fernerkundungsdaten der Bereiche Magnetik und Elektromagnetik sowie gravimetrische Bodenmessungen ausgerichtet, mit dem Zweck hydrologische Karten der unberührten Feuchtgebiete des Okavango zu erstellen. Ein Ziel ist es, die Geometrie des unter dem Oberflächenwassernetz liegenden Grundwasserleiters zu erforschen. Oberflächen- und Grundwassersysteme sind gekoppelt, sodass die hydrologische Modellierung nur eines Systems, ohne Berücksichtigung des anderen, nicht möglich ist. In früheren Arbeiten wurde geschätzt, dass jährlich ungefähr 300 000 Tonnen Salze im Deltasystem abgelagert werden. Weil im oberflächenabflusslosen Deltasystem hohe Verdunstungsraten herrschen, die Oberflächengewässer jedoch frisch sind, muss ein Teil der Salze in tiefere Lagen des Grundwasserleiters eindringen, um den Salzgehalt stabil zu halten. Zusätzlich zum bekannten Mechanismus der Ablagerung von Salzen an den unzähligen Inseln, die über das ganze Feuchtgebiet verstreut sind, werden andere Mechanismen der Salzablagerung untersucht.

Magnetische Messungen vom Flugzeug aus und gravimetrische Bodenmessungen zeigen, dass die Mächtigkeit des Grundwasserleiters durch geologische Strukturen beeinflusst ist und einen mittleren Wert von 180m hat. Der Grundwasserleiter ist im Okavango Graben mächtiger und in den begrenzenden Horst Strukturen dünner. Die berechnete Mächtigkeitsverteilung des Grundwasserleiters fliesst in ein Hydrologisches Model des Deltas ein, das die Auswirkungen von Klimawandel- und Wasserwirtschaftszenarien auf das Feuchtgebiet simuliert. Anhand des Modells kann gezeigt werden, dass durch Erdbeben ausgelöste Veränderungen der Topographie eine wichtige Rolle in den beobachteten Verschiebungen der Oberflächenwasserflüsse gespielt haben könnten. Dies wurde gezeigt, indem der tektonisch aktivste, nordöstliche Block und der Panhandle um lediglich 30cm in südwestliche Richtung gekippt wurden und die Auswirkung dieser Bewegung auf die räumliche Verteilung der Überflutungshäufigkeit simuliert wurden. Eine

durchschnittliche Zunahme der Überflutungshäufigkeit von 20 % kann in den südwestlichen Teilen des Deltas beobachtet werden. Jedoch scheinen, wie schon in früheren Studien erwähnt, kleinräumige Grabenentwicklungen einen grösseren Einfluss zu haben als grossräumige Setzungen.

Aus dem gemessenen elektromagnetischen Datensatz kann der elektrische Widerstand des Untergrundes abgeleitet werden. Anhand dieser Daten konnte gezeigt werden, dass die unzähligen Inseln des Feuchtgebietes die Möglichkeit bieten, dass sich durch Evapokonzentration von Salzen unter den Inseln Dichteströmungen bilden, durch die letztendlich Salze abgeleitet werden. Diese Erkenntnis hebt die Wichtigkeit hervor, die durch die Anzahl an Inseln beeinflusste gesamte Länge der Uferlinie zu erhalten. Die Arbeit mit diesem Datensatz hat auch die wahrscheinlich ursprüngliche Lage des Deltas enthüllt, als es bis zu einem Graben oberhalb des Kunyere-Thamalakane Bruchsystems reichte, ähnlich wie das heutige Delta bis zu weiter entfernten Verwerfungen reicht. Die Werte des elektrischen Widerstandes deuten auf die ursprüngliche Lage als Frischwasser enthaltende Ausdehnung im Grundwasserleiter hin. Nach oben wird dieses ursprüngliche Delta durch Ablagerungen mit tiefen Widerstandswerten, höchstwahrscheinlich Lehm oder lehmige Sande, begrenzt. Bohrlochdaten bestätigen feinkörnige, Frischwasser enthaltende Ablagerungen, die mit Lehm überlagert sind. Diese Struktur wird auch als Proto Okavango Delta bezeichnet.

Die Resultate, die aus dem elektromagnetischen Datensatz gewonnen werden konnten, können in Zukunft für Arbeiten zum weiteren Verständnis der Dynamik der räumlichen Verteilung der Salinität benutzt werden. Ein hydrologisches Modell wurde in einer zweiten Doktorarbeit entwickelt und könnte auch für die Modellierung von Stofftransport eingesetzt werden. Weiterführende Forschung in Richtung Stofftransport ist daher keine unüberwindbare Aufgabe.