

Aerogeophysikalische Grundwassererkundung in der Namib-Wüste

Bernhard Siemon und Klaus-Peter Sengpiel, BGR, Hannover

1 Einleitung

Das Meßgebiet Kuiseb (Abb. 1) liegt an der Atlantikküste Namibias südlich von Walvis Bay (ehem. zu Südafrika gehörig). Der Fluß Kuiseb trennt die Sand-Namib im Süden von der Stein-Namib im Norden und begrenzt in etwa nach Nordosten das Meßgebiet, das überwiegend von mächtigen Sanddünen überzogen ist. Der Kuiseb ist während der meisten Zeit des Jahres trocken und führt nur während der Regenzeit im Khomas Hochland Wasser, das aber den Atlantik nur etwa alle zehn Jahre erreicht. In den letzten Jahren fielen die Regenfälle spärlicher aus, so daß der Kuiseb spätestens im Gebiet Dorop etwa 15 - 20 km südlich von Walvis Bay und mehr als 10 km von der Küste entfernt versiegte.

Hydrogeologische Beobachtungen zeigten, daß der Kuiseb Wasser in den Untergrund abgeben muß. Und da an der Atlantikküste in der Nähe von Sandwich Harbour, etwa 50 km südlich von Walvis Bay gelegen, Süßwasser gefunden wurde, lag die Vermutung nahe, daß das Wasser des Kuiseb unter den Sanddünen, d.h. dem größten Gefälle folgend, zur Küste fließt.

Der geologische Aufbau im Meßgebiet kann stark vereinfacht in drei Bereiche unterteilt werden: Über dem Grundgebirge, das nördlich des Kuiseb ansteht, liegt eine bis zu 100 m mächtige Sandsteinbedeckung (Tsondab Sandstone), die im Nordwesten des Meßgebietes fehlt. Den Abschluß bilden die bis über 100 m hohen Sanddünen, die im Landesinneren in NNW-SSE-Richtung verlaufen. Zwischen Sand und Sandstein befindet sich eine vor allem im Süden weit verbreitete Karbonatkruste (Karpfenkliff Conglomerate, calcrete), die jedoch nur wenige Meter mächtig ist.

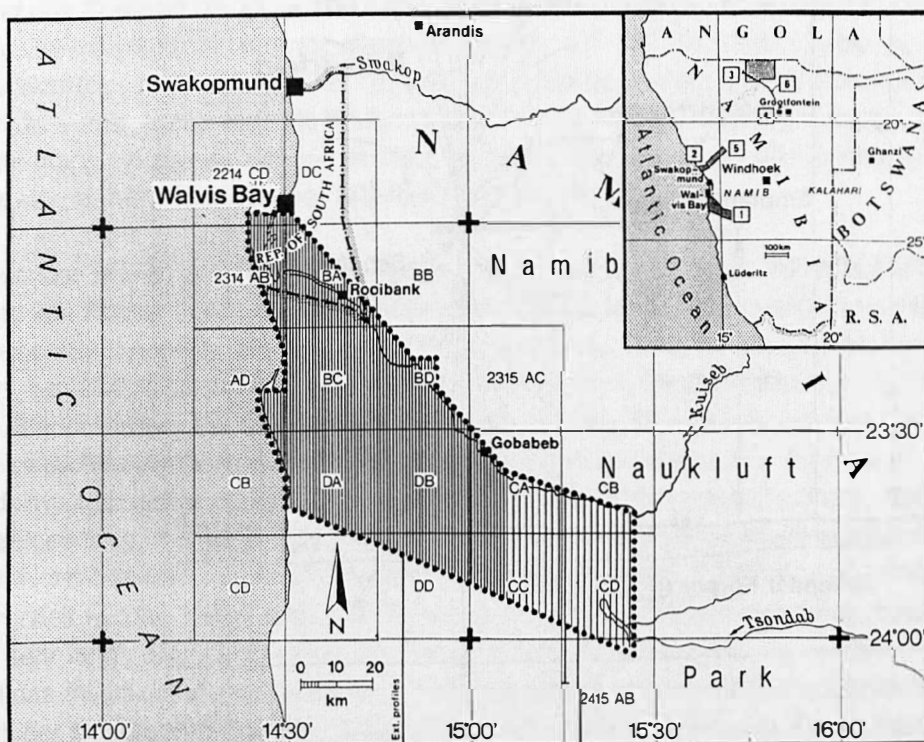


Abb. 1: Skizze des Meßgebietes Kuiseb in Namibia. In der kleinen Übersichtskarte sind die Meßgebiete (Gebiet 1: Kuiseb) zu sehen, die 1992-1993 von der BGR aerogeophysikalisch erkundet wurden.

Die BGR führte von Mai bis November 1992 eine über 12000 Profilkilometer umfassende Befliegung des 5312 km² großen Meßgebietes Kuiseb (vgl. Abb. 1) durch mit dem Ziel, das verdeckte Drainagesystem zu erkunden und Informationen zu liefern, inwieweit der Tsondab-Sandstein als grundwasserhöffiger Speicher in Betracht kommt. Dabei wurden drei geophysikalische Meßmethoden gleichzeitig eingesetzt, die Elektromagnetik (EM), die Magnetik und die Gammastrahlenspektrometrie. Für die Grundwassererkundung ist die EM die bedeutendste dieser drei Methoden, da die elektrischen Eigenschaften des Bodens stark durch das Vorhandensein von Wasser beeinflusst werden können. Im folgenden werden daher nur die Ergebnisse der Hubschrauberelektromagnetik (HEM) präsentiert.

2 Meßprinzip

Das aerogeophysikalische Meßsystem der BGR umfaßt die o.g. geophysikalischen Methoden. Das Gammastrahlenspektrometer wie auch die Datenaufzeichnungsgeräte und Navigations-/Positionierungssysteme befinden sich im Meßhubschrauber, einer Sikorsky S-76B. Die Sensoren für EM und Magnetik werden in Flugkörpern ca. 45 m bzw. 30 m unterhalb des Hubschraubers nachgeschleppt (Abb. 2). Die Fluggeschwindigkeit beträgt bis zu 150 km/h, die maximale Meßflugdauer 2h45.

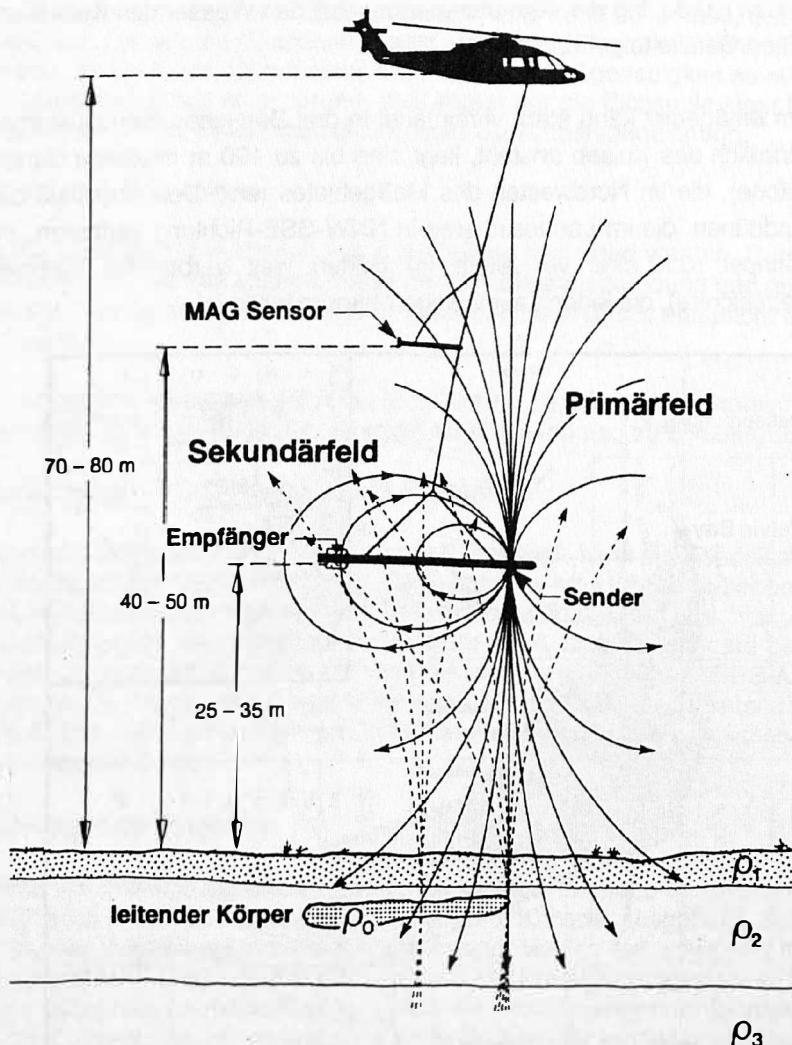


Abb. 2: Schaubild des Meßhubschraubers mit nachgeschleppten Sensoren für die Magnetik (oben) und EM (unten) über einem leitenden Untergrund.

Das im Gebiet Kuiseb eingesetzte elektromagnetische Meßsystem (Dighem III) ist in einem zigarrenförmigen Flugkörper untergebracht, der etwa 9 m lang ist und der sich während des Meßfluges etwa 30 m über Gelände befindet. Das System besteht aus drei horizontal-koplanaren Spulenpaaren sowie Kompensations- und Eichspulen. Die Sender für die Frequenzen 921 Hz, 7249 Hz und 32015 Hz sind in der Spitze des Flugkörpers („bird“) eingebaut, die Empfänger in 6,3 - 8 m Entfernung davon.

Durch die Kreisspulen werden magnetisches Dipolfelder (Primärfelder) erzeugt, die im leitfähigen Untergrund Wirbelströme induzieren, deren Magnetfelder (Sekundärfelder) von den Empfängerspulen registriert werden. Das gelingt nur durch eine vollständige, stabile Kompensation des Primärfeldsignals im Empfänger und wird durch Kompensationsspulen mit Signaleinspeisung in die Empfängerspulen erreicht. Die zunächst in mV vorliegenden Meßwerte werden mittels bekannten Eichsignalen in ppm umgerechnet (siehe auch den Beitrag von Sengpiel (1996) in diesem Band). Durch die Verwendung von unterschiedlichen Frequenzen erhält man Informationen aus verschiedenen Tiefen. Je nach Untergrund können mit diesem System Tiefen von wenigen Metern bis über 100 m erkundet werden.

3 Inversion der HEM-Daten

Das registrierte Sekundärfeld hängt von der Verteilung des spezifischen Widerstandes im Untergrund und von Systemparametern (Meßfrequenz, Spulenordnung und -abstand, Sensorhöhe) ab. Ist der Untergrund homogen oder horizontal geschichtet, läßt sich das Sekundärfeld mit Gleichung (1) aus Siemon (1996) berechnen.

Die Inversion der HEM-Daten in die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand, scheinbare Tiefe und Schwerpunkttiefe ist in diesem Band in Siemon (1996) ausführlich beschrieben (Erklärung der Parameter siehe dort). Ein Beispiel für diese Art der Inversion zeigt Abb. 3 für einen Dreischichtfall. $\rho_a(z_p^*)$ reproduziert den Deckschichtwiderstand ($\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$) für hohe Frequenzen ($f > 10^5 \text{ Hz}$) sehr gut und strebt für sehr niedrige Frequenzen sehr langsam gegen den spezifischen Widerstand des Substratums ($\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$). Bei $f = 10 \text{ Hz}$ liegt ρ_a jedoch noch unter $200 \Omega\text{m}$. Die gutleitende Zwischenschicht wird vor allem im Bereich $10^3 - 10^4 \text{ Hz}$ erkannt, aber ρ_a liegt mit über $30 \Omega\text{m}$ deutlich über dem wahren Wert ($\rho_2 = 20 \Omega\text{m}$). Stehen nur die drei Meßfrequenzen zur Verfügung, wird die vorgegebene vertikale Widerstandsverteilung noch weniger reproduziert (Sterne in Abb. 3). Bessere Approximationen werden erreicht, wenn $\rho_a(z_p^*)$ dynamisiert wird (siehe Siemon (1996)) oder wenn eine Mehrschicht-Inversion (1D-Inversion) durchgeführt wird.

Die 1D-Inversion basiert auf dem Marquardt-Verfahren, das von Weidelt (1988) auf MT-Daten angewendet und von Fluche (1990) auf HEM-Daten erweitert wurde. Das Marquardt-Verfahren erwartet die Vorgabe eines Startmodells. Während von Fluche dieses von Hand für einzelne Meßpunkte eingegeben wurde, kann heute ein ganzes Meßprofil invertiert werden. Dies erfordert eine automatische Vorgabe von Startmodellen, die aus den $\rho_a(z_p^*)$ -Werten der drei Meßfrequenzen generiert werden. Vor einer automatischen Inversion müssen lediglich die Rahmenparameter, wie Schichtzahl, Abbruchkriterium, Modelltyp (gut-/schlechtleitende Deckschicht) getestet und festgelegt werden. Abb. 3 zeigt zwei Inversionsergebnisse, die auf identischen Startmodellen (3 Schichten, ohne besondere Vorgaben für die Deckschicht) basieren, aber mit unterschiedlich scharfen Abbruchkriterien η (= Änderung der Anpassung) erzielt wurden. Wählt man η sehr klein (z.B. 0.01 %) wird der Iterationsprozeß während der Inversion sehr lange aufrechterhalten, um die vorgegebene Genauigkeit zu erhalten. In diesem Fall entspricht das Inversionsmodell exakt dem Ausgangsmodell, sofern die Eindringtiefen der EM-Felder im Bereich der Modellschichtgrenzen liegen und fehlerfreie Daten vorliegen. Da Meßdaten immer fehlerbehaftet sind, muß der Iterationsprozeß wesentlich früher beendet werden (z.B. durch Vorgabe von $\eta = 10 \%$), um eine Interpretation von Datenfehlern durch extreme Schichtfolgen vorzubeugen. In Abb. 3 reproduziert ein so erlangtes Inversionsmodell nicht alle Details des Ausgangsmodells, insbe-

sondere wird der hohe spezifische Widerstand des Substratums in diesem Beispiel nicht erreicht, aber die Struktur des Modells wird gut erkannt.

Auch bei der 1D-Inversion gelingt eine bessere Approximation an das Ausgangsmodell, wenn zur Generierung des Startmodells die Sondierungskurve $\rho_a(z_p^*)$ dynamisiert wird. Dies ist insbesondere auch dann von Bedeutung, wenn mehr Modellparameter berechnet werden sollen als Daten vorhanden sind. Aufgrund der Verwendung der verallgemeinerten Matrixinversion ist dies prinzipiell möglich, liefert allerdings keine Inversionsmodelle mehr, die gleichzeitig Schichtwiderstand und -mächtigkeit auflösen. Aber zwei eingelagerte Leiter (d.h. 9 Modellparameter) können mit diesem Verfahren mit drei Frequenzen (d.h. 3 komplexe Sekundärfelder) durchaus aufgelöst werden, wenn sie im Bereich der Eindringtiefen und nicht zu nahe zusammen liegen.

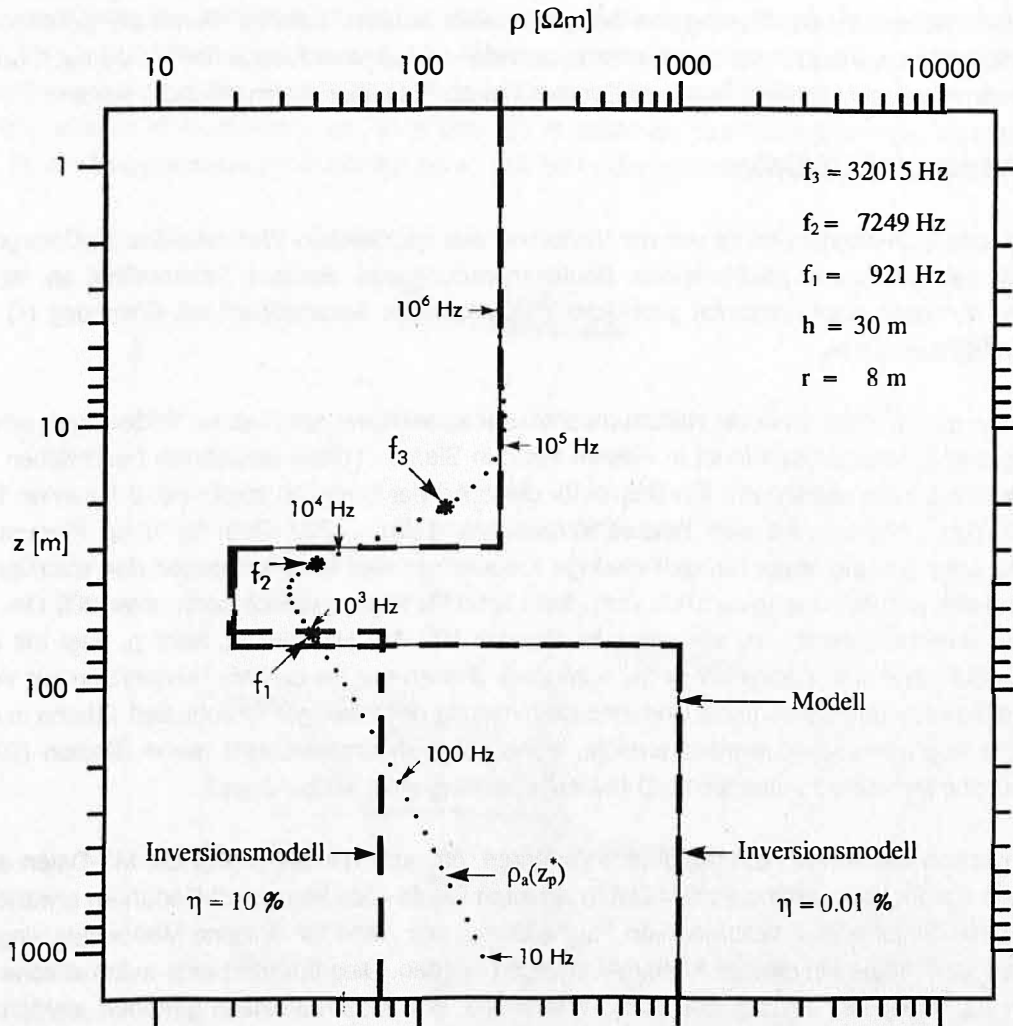


Abb. 3: $\rho(z)$ -Diagramm für einen geschichteten Halbraum mit den spezifischen Widerständen $\rho_1 = 200 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 20 \Omega\text{m}$ und $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$ sowie den Schichtmächtigkeiten $d_1 = 30 \text{ m}$ und $d_2 = 40 \text{ m}$. Die gepunktete Linie zeigt die Sondierungskurve $\rho_a(z_p^*)$ im Frequenzbereich $f = 10 - 10^6 \text{ Hz}$. Die Marquardt-Inversionsergebnisse sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet a) bei optimaler Inversion ($\eta = 0.01 \%$) und b) für eine weniger genaue Inversion ($\eta = 10 \%$), die fehlerbehaftete Meßdaten simulieren soll.

4 Präsentation der HEM-Ergebnisse

Normalerweise erfolgt die Präsentation der HEM-Ergebnisse in Form von farbigen Isolinienkarten oder Vertikalschnitten. Hier werden s/w-Darstellungen gezeigt, die auf einer dynamischen Grauskala basieren (Abb. 4) oder einfach nur s/w-Kopien von Farbbildungen sind (Abb. 5 - 6 und 8).

Die scheinbaren spezifischen Widerstände werden für die jeweilige Meßfrequenz in Kartenform dargestellt. Im Meßgebiet Kuiseb zeigen ρ_{a3} ($f = 32015$ Hz) und ρ_{a2} ($f = 7249$ Hz) im wesentlichen oberflächennahe Strukturen. Insbesondere prägen die NNW-SSE-verlaufenden Dünenketten diesen Karten eine Art Streifenmuster auf. Dieses Muster ist auch noch in der Karte für ρ_{a1} ($f = 921$ Hz) zu beobachten, wenn auch aufgrund der erhöhten Eindringtiefe deutlich schwächer. Zusätzlich kommen Strukturen in ESE-WNW-Richtung zum Vorschein, die als alte Flußläufe des Kuiseb interpretiert werden können. Abb. 4 zeigt den dynamisierten scheinbaren spezifischen Widerstand ρ_{a1}^e (vgl. Siemon (1996)), der gegenüber ρ_{a1} auch geringere Widerstandskontraste auflöst. Zur weiteren Kontraststeigerung wurde ein dynamischer Graukeil gewählt. Ein hoher Schwärzungsgrad markiert in der Karte die Bereiche hoher Leitfähigkeit, z.B. den Atlantischen Ozean und das Eindringen des Meerwassers in die sandigen Küstenregionen sowie eine Region mit sehr leitfähigen Sedimenten im Nordosten des Meßgebietes. Ein niedriger Schwärzungsgrad kennzeichnet dementsprechend die Bereiche mit hohem spezifischen Widerstand, z.B. das Grundgebirge. Die alten Flußläufe (PC = paleo channel) sind im Grundgebirge an ihrem hohen Schwärzungsgrad und im gutleitenden Tsondab-Sandstein (TS) an ihrer vergleichsweise geringen Schwärzung zu erkennen. In Abb. 4 sind zahlreiche PC vorhanden, die aufgrund der starken Verkleinerung (Originalmaßstab 1:250000) und Qualitätsverluste beim Kopiervorgang z.T. nicht mehr zu erkennen sind. In Abb. 7 sind diese PC in einer generalisierten topographischen Karte eingetragen.

Eine weitere Präsentationsform der HEM-Ergebnisse sind Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes (Abb. 5 - 6 und 8). Diese Vertikalsektionen ergeben sich durch Aneinanderreihung der 1D-Inversionsmodelle entlang eines Meßprofils. Für jeden Meßpunkt werden die 1D-Modelle als Farbsäule bezüglich des topographischen Reliefs (in m ü. NN) aufgetragen (etwa 40-50 pro km, je nach Flugeschwindigkeit). In den Original-Vertikalsektionen werden über den Modellen die Flughöhe, der Anpassungsfehler der Inversion und die Meßdaten der drei Methoden gezeigt.

Auf Basis der ρ_a -Karten sind insgesamt 18 Bohrpunkte festgelegt worden. Die durch die HEM vermuteten PC konnten durch diese Bohrungen bestätigt werden. Ein typisches Beispiel für einen im Grundgebirge eingeschnittenen PC zeigt die Abb. 5. Dort ist ein kleiner Bereich einer Vertikalsektion des spezifischen Widerstandes der aus einer Bohrung (TP 1) abgeleiteten geologischen Schichtung gegenübergestellt. Da PC 1 brackisches bis salziges Wasser führt, zeichnet sich dieser PC in den Vertikalsektionen als Zone hoher Leitfähigkeit aus, die deutlich von der Umgebung zu unterscheiden ist. Aufgrund dieser hohen Leitfähigkeit wird das Grundgebirge unterhalb des PC in den Vertikalsektionen nicht erkannt. Ein Beispiel für einen in Tsondab-Sandstein eingeschnittenen PC ist in Abb. 6 zu sehen. Dort unterscheidet sich der PC 3 durch eine gegenüber der Umgebung verringerte Leitfähigkeit, da der Tsondab Sandstein relativ gutleitend ist und im PC 3 Süßwasser gefunden wurde. Das Grundgebirge ist auch in diesem Beispiel nicht in den Vertikalsektionen zu erkennen, da es mit über 120 m unter Gelände (TP 13) zu tief liegt.

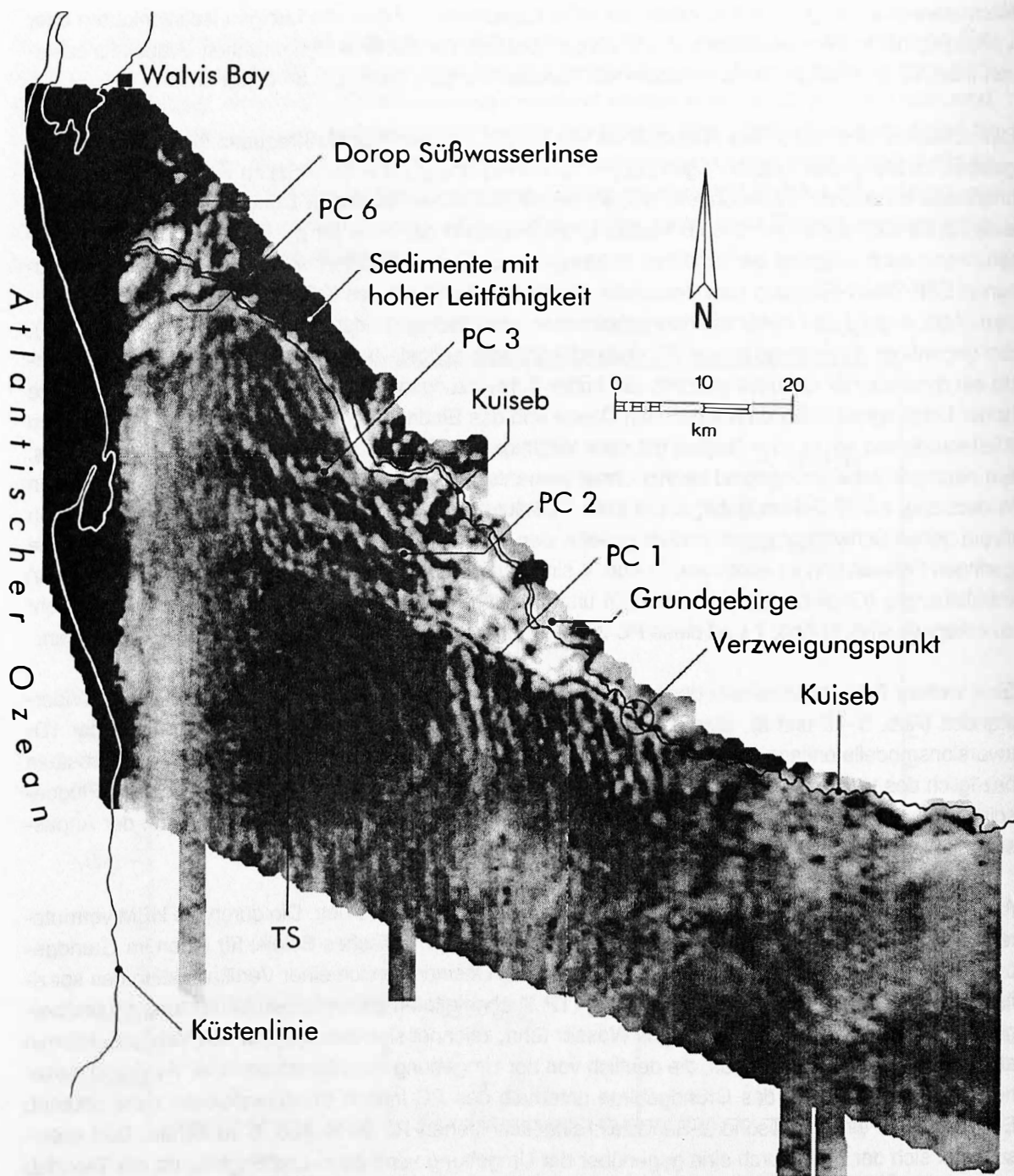


Abb. 4: Dynamisierte ρ_{ai}^* -Karte in s/w-Darstellung. Hohe spezifische Widerstände werden durch einen geringen, niedrige durch einen hohen Schwärzungsgrad charakterisiert. Deutlich zu erkennen sind die ESE-WNW-verlaufenden ehemaligen Flußläufe des Kuseb (PC), die heute von mächtigen Dünen verdeckt sind. Die PC erscheinen dunkel im Grundgebirge (z.B. der östliche Teil von PC 1 oder PC 6) und hell im Tsondab-Sandstein (TS). Die schwarzen Bereiche entlang der Atlantikküste repräsentieren die extrem niedrigen spezifischen Widerstände der offenen See oder die Meerwasser-Intrusion in die sandigen Küstengebiete. Süßwasserlinsen in Küstennähe (z.B. Dorop) erscheinen dunkelgrau.

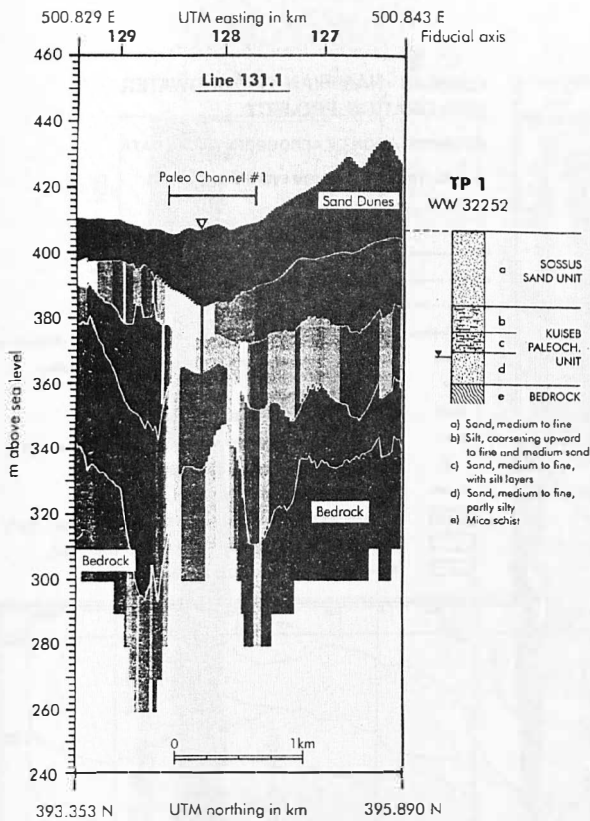


Abb. 5: Ausschnitt aus einer Vertikalsektion des spezifischen Widerstandes in der Nähe des Bohrpunktes TP 1 als Beispiel für einen ins Grundgebirge eingeschnitten PC.

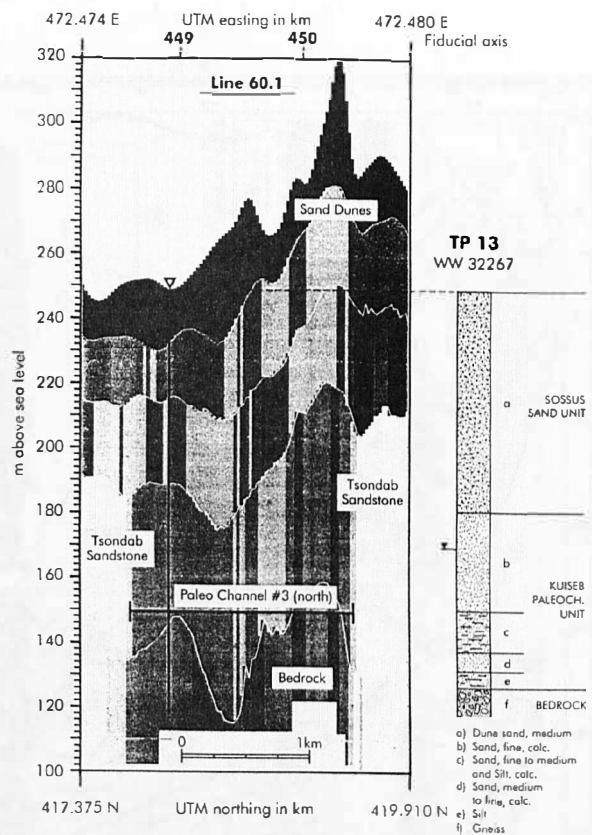


Abb. 6: Ausschnitt aus einer Vertikalsektion des spezifischen Widerstandes in der Nähe des Bohrpunktes TP 13 als Beispiel für einen im Tsondab-Sandstein eingeschnitten PC.

Durchsucht man alle Vertikalsektionen nach typischen PC-Merkmalen wie in Abb. 5 - 6 und markiert ihre Lage in einem Fluglinienplan, ergeben sich Muster wie in Abb. 7. Dort sind die vermuteten PC-Bereiche durch kurze Linien gekennzeichnet, die die Breite der PC verdeutlichen sollen. Können diese Markierungen über mehrere benachbarte Fluglinien verfolgt werden, so ergibt sich der ungefähre Verlauf eines PC, wie z.B. bei PC 1 in Abb. 7. Im nördlichen Bereich des Meßgebietes waren die PC recht gut zu kartieren, so daß deutlich mehrere PC zu erkennen sind, die vom Kuiseb ausgehend sich in Richtung Küste erstrecken. In einem hochohmigen Streifen in Küstennähe (vgl. Abb. 4) sind sie jedoch aufgrund zu geringer Widerstandskontraste oder zu mächtiger Bedeckung kaum zu sehen. Am deutlichsten erscheint der PC 1, der etwa parallel zu einer Verwerfungslinie (Lenz et al. (1995), „step lineament“ in Abb. 7) verläuft. Die Vermutung liegt nahe, daß der Kuiseb im Laufe der Zeit seinen Verlauf immer weiter nach Norden verlegte (oder gedrängt wurde). Südlich der Verwerfungslinie sind nur vage Aussagen über das Vorhandensein alter Flußläufe möglich.

Die in Abb. 8 dargestellten Vertikalsektionen sind im Nordwesten des Meßgebietes gewonnen worden. Dort befindet sich eine ausgedehnte Süßwasserlinse (Dorop, Gebiet I in Abb. 7), die für die Wasserversorgung von Walvis Bay von größter Bedeutung ist. Die S-N-verlaufenden Profile 212.5, 219.1 und 222.1 zeigen in Abb. 8 Querschnitte der Süßwasserlinse (helle bis graue Bereiche) in zunehmenden Abstand von der Küste (W nach E). Unterhalb des Süßwassers befindet sich Salzwasser (dunkel, im Original rot). Die Süß-/Salzwassergrenze ist deutlich erkennbar. Oberhalb der Linse sind die Sanddünen (dunkel, im Original blau) zu sehen.

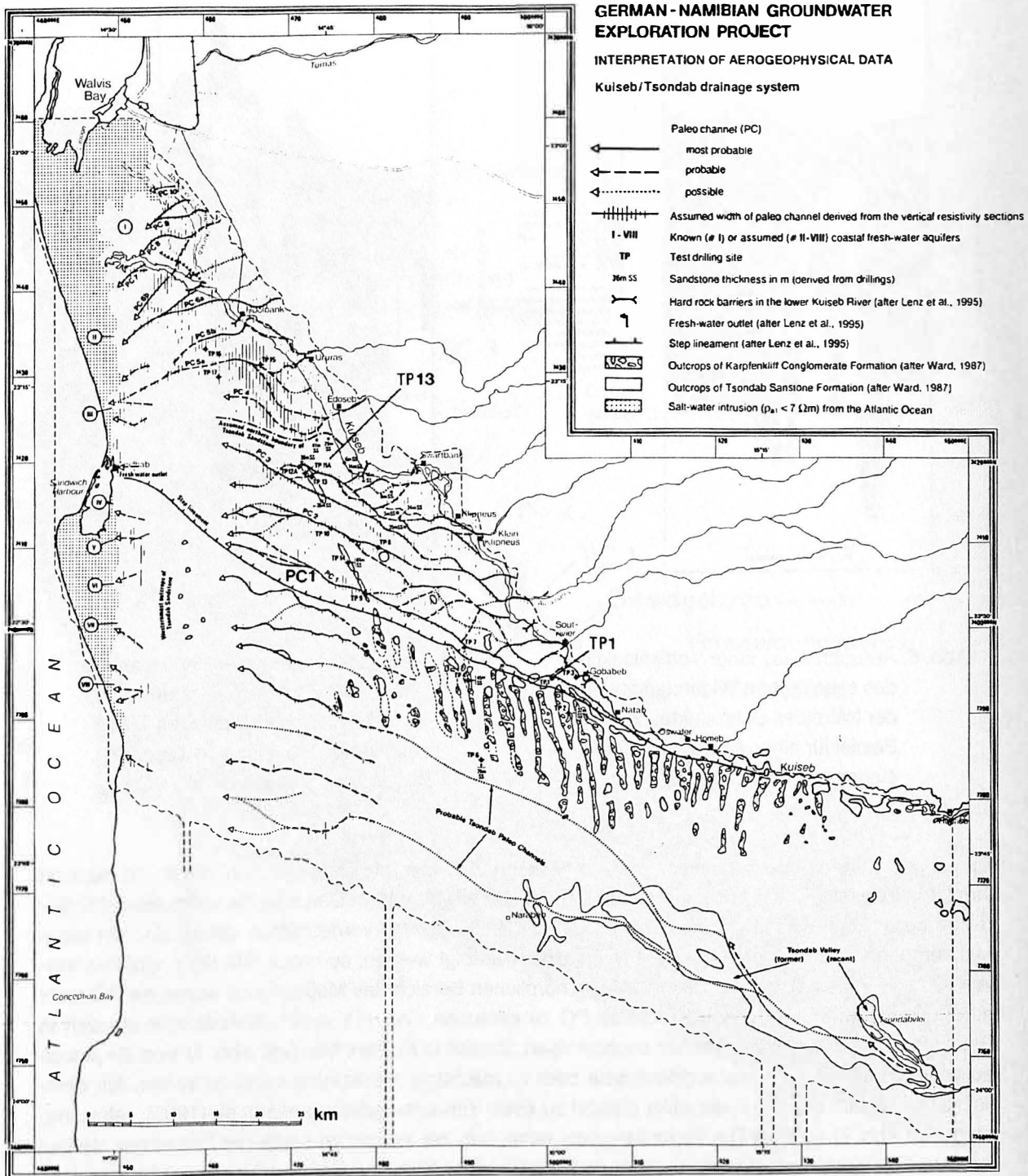


Abb. 7: Die Interpretation der aerogeophysikalischen Ergebnisse lieferte z.B. die Verbreitung des Tsondab-Sandsteins, den Verlauf ehemaliger Flußtäler des Kuiseb, die Verbreitung der Meerwasser-Intrusion längs der Küste und die bekannten bzw. vermuteten Süßwasserlinsen I-VIII. Die Ergebniskarte, die aus Sengpiel & Siemon (1995) entnommen und vom Originalmaßstab 1:250 000 verkleinert worden ist, enthält außerdem noch die vor der Befliegung bekannte Verbreitung des Tsondab-Sandsteins bzw. der Karbonatkruste (nach Ward 1987).

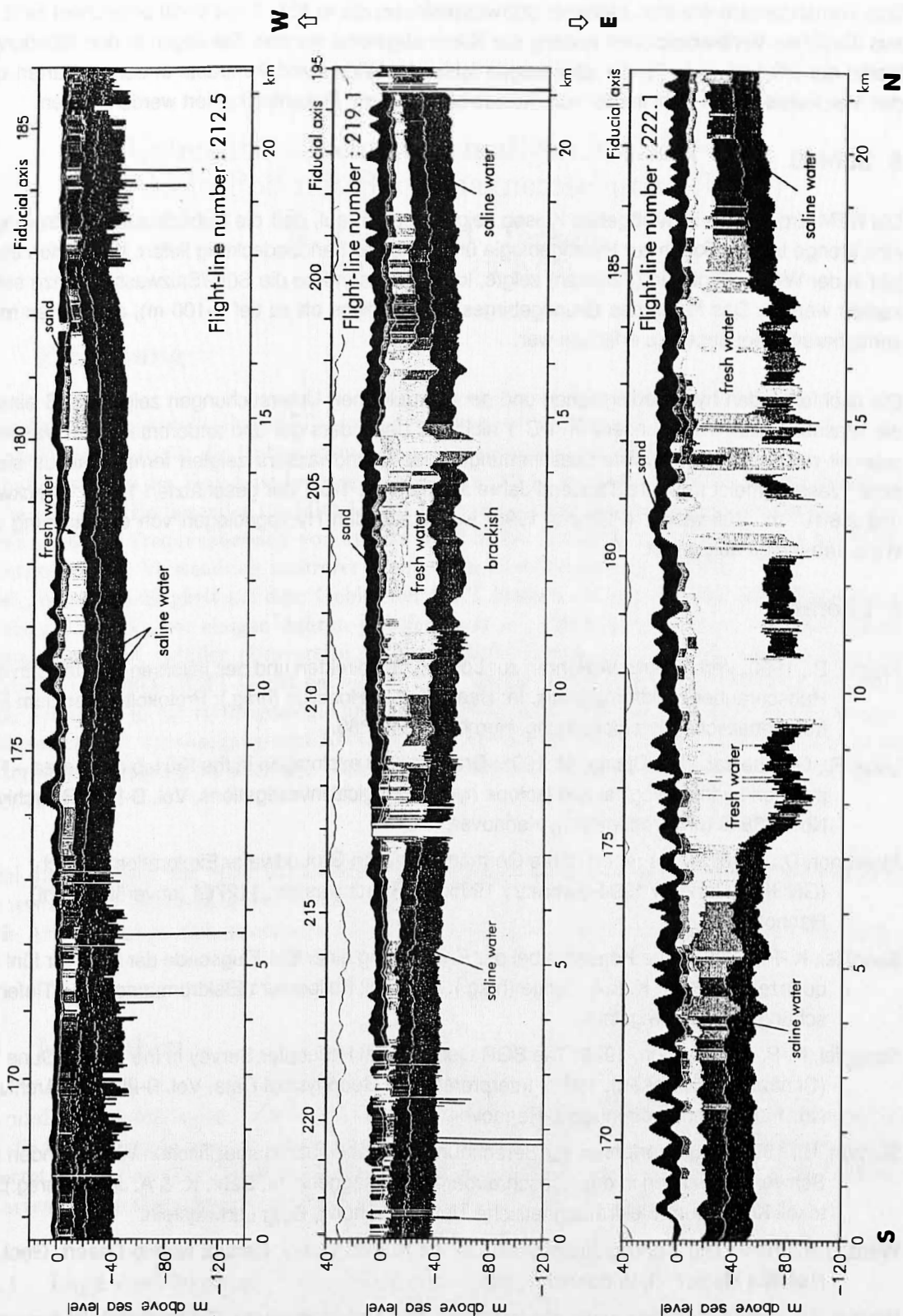


Abb. 8: Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes für drei S-N-Profile, die eine Süßwasserlinse (Dorop, Gebiet I in Abb. 7) schneiden, zeigen von W nach E die zunehmende Ausdehnung des Aquifers (helle bis graue Bereiche). Salzwasser (unten) und Sanddünen (oben) erscheinen aufgrund der s/w-Kopie gleichermaßen dunkel, obwohl die zugehörigen spezifischen Widerstände extrem niedrig ($< 1 \Omega\text{m}$) bzw. hoch ($> 1000 \Omega\text{m}$) sind.

Das Vorhandensein weiterer, kleinerer Süßwasserlinsen, die in Abb. 7 mit II-VIII bezeichnet sind, kann aus ähnlichen Vertikalsektionen entlang der Küste abgeleitet werden. Sie liegen in den Mündungsgebieten der PC (vgl. Abb. 7), die aber wegen fehlender Widerstandskontraste in den ρ_a -Karten und in den Vertikalsektionen nicht immer vom Kuiseb bis zur Küste lückenlos kartiert werden konnten.

5 Schluß

Die HEM-Ergebnisse im Meßgebiet Kuiseb zeigen deutlich auf, daß die Hubschrauberelektromagnetik eine Menge Informationen zur Hydrogeologie unterhalb der Sandbedeckung liefert. Wie schon ein Projekt in der Wüste Cholistan (Pakistan) zeigte, kann insbesondere die Süß-/Salzwassergrenze sehr gut kartiert werden. Das Relief des Grundgebirges lag allerdings oft zu tief (>100 m), als daß es mit den verfügbaren Frequenzen zu erfassen war.

Die nachfolgenden hydrogeologischen und geohydraulischen Untersuchungen zeigten, daß einerseits die Wasserqualität insbesondere im PC 1 nicht gut besonders gut und andererseits die Wasserwegsamkeit relativ gering war. Altersbestimmungen des Grundwassers zeigten ferner, daß es sich um altes Wasser (meist mehrere Tausend Jahre alt) handelt. Trotz der geschätzten 10^8 m^3 Brackwasser und $2.8 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ Süßwasser (Plöthner 1995) wurde von den Hydrogeologen von der Nutzung dieser Wasserreserven abgeraten.

6 Literatur

- Fluche, B., 1990. Verbesserte Verfahren zur Lösung des direkten und des inversen Problems in der Hubschrauber-Elektromagnetik. In: Haak, V. & J. Homilius (hrsg.): Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Hornburg, 249-266.
- Lenz, R., Grobbelaar, H. & Djama, M., 1995: Groundwater exploration in the Kuiseb dune area – Reports on hydrogeological and isotope hydrogeological investigations. Vol. D-I. BGR Archives No. 113840 (unveröffentlicht), Hannover.
- Ploethner, D., 1995: Status report of the German-Namibian Groundwater Exploration Project (GNIGEP), January 1994–February 1995. BGR Archives No. 112764 (unveröffentlicht), Hannover.
- Sengpiel, K.-P., 1996. Neue Konzepte bei der Entwicklung einer EM-Flugsonde der BGR für fünf Frequenzen. In: Bahr, K. & A. Junge (hrsg.): Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Burg Ludwigstein.
- Sengpiel, K.-P. & B. Siemon, 1995. The BGR Geophysical Helicopter Survey in the Kuiseb Dune Area (Central Namib Desert), 1992 - Interpretation of Geophysical Data. Vol. B-III. BGR-Archives No. 113810 (unveröffentlicht), Hannover.
- Siemon, B., 1996. Neue Verfahren zur Berechnung von scheinbaren spezifischen Widerständen und Schwerpunktstiefen in der Hubschrauberelektromagnetik. In: Bahr, K. & A. Junge (hrsg.): Protokoll Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Burg Ludwigstein.
- Ward, J.D., 1987: The Cenozoic succession in the Kuiseb Valley, Central Namib Desert. Geol. Surv. Namibia Memoir, 9, Windhoek.
- Weidelt, P., 1988. Einführung in die elektromagnetische Tiefenforschung. Vorlesungsskript (unveröffentlicht), Inst. f. Geophysik u. Meteorologie TU Braunschweig.