

Die deutsche Nordseeküste im Fokus von aereoelektromagnetischen Untersuchungen

Teilgebiete Langeoog mit Wattenmeer und Elbemündung

Gerlinde Schaumann¹, Annika Steuer², Bernhard Siemon², Helga Wiederhold¹ & Franz Binot¹

¹Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover

²Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover

gerlinde.schaumann@liag-hannover.de

1. Einleitung

Hubschrauberelektromagnetische (HEM) Untersuchungen bieten ein großes Potential für die flächen-deckende Kartierung der Sedimente der ersten hundert Meter des Untergrundes (Siemon *et al.*, 2009). Sie sind für hydrogeologische Fragestellungen von großer Bedeutung, da mit Hilfe des spezifischen Widerstands die Verteilung sandiger und tonhaltiger Sedimente im Untergrund sowie Versalzungs-zonen und Süßwasserbereiche ermittelt werden können.

In den Jahren 2008 und 2009 wurden in Kooperation von LIAG und BGR im Rahmen des LIAG-Projektes zur „Flächenhaften Befliegung“ und des „D-AERO“-Projektes der BGR gemeinsam aereogeophysikalische Erkundungen zu Salz-/Süßwasserfragestellungen in insgesamt fünf Messgebieten im Bereich der deutschen Nordseeküste durchgeführt (Wiederhold *et al.* 2008, Steuer *et al.* 2009). Das Messgebiet Langeoog umfaßt die Ostfriesischen Inseln Langeoog und Spiekeroog und das angrenzende Wattenmeer, das Messgebiet Glückstadt umfaßt den Bereich der Elbemündung nordwestlich von Hamburg (Abb. 1).

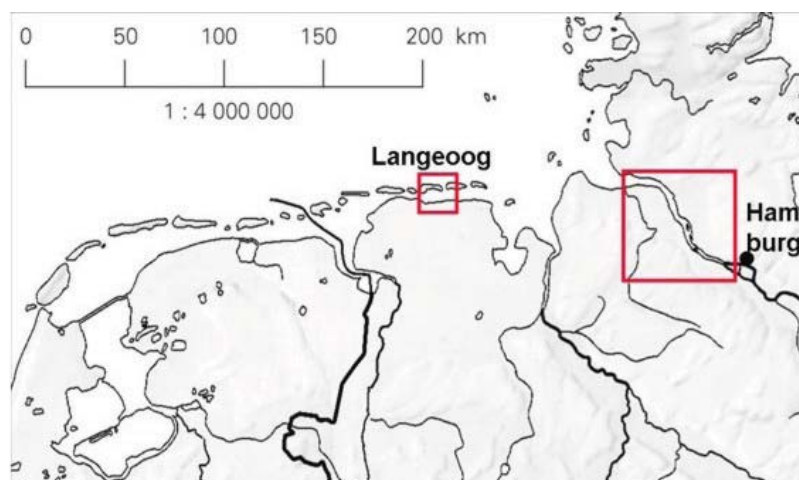


Abbildung 1: Lage der Messgebiete Langeoog und Glückstadt (nordwestlich von Hamburg).

Für die Insel Langeoog waren die Lage und die Ausdehnung der Süßwasserlinse zu ermitteln. Im küstennahen Bereich erhoffte man im Wattenmeer mutmaßliche Süßwasseraustritte zu finden. Im Bereich der Elbemündung sollten die grundwasserführenden Schichten und mögliche Versalzungszonen kartiert werden.

Die Daten dienen als Grundlage für die Planung und Arbeit in vielfältigen ökonomischen und ökologischen Bereichen, wie z.B. Raumplanungen und der Entwicklung von Wassernutzungs- und Wasserschutzkonzepten. Sie werden über das Fachinformationssystem (FIS) Geophysik des LIAG nutzbar sein.

Das eingesetzte Messsystem wird bei *Steuer et al. (2010)* beschrieben. Die Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands ρ_a und der Schwerpunktstiefe z^* (*Siemon, 2009*) für die verschiedenen Messfrequenzen geben einen ersten Überblick über die Leitfähigkeitsstrukturen in den Messgebieten. Die Erkundungstiefe nimmt dabei mit abnehmender Frequenz und Leitfähigkeit zu. Die HEM-Messungen liefern die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bis maximal 150 m Tiefe. Dabei können Salzwasser und Süßwasser oder ton- und sandhaltige Sedimente unterschieden werden. Hier dargestellt sind erste Ergebnisse in Form von Karten auf dem Bearbeitungsstand nach der Grundprozessierung, bei der Korrekturfaktoren und Filtereinstellungen für jeden Flug gleich angesetzt werden. Die darauf folgende Feinprozessierung behandelt jeden Flug und jede Frequenz individuell. Die Prozessierung der Daten beinhaltet: Filterung, Sprungkorrektur, Nullniveauekorrektur, Feinjustierung der Kalibrierfaktoren und Berechnung der Halbraumparameter.

2. Messgebiet Langeoog

Langeoog und Spiekeroog sind zwei der Ostfriesischen Inseln im Wattenmeer der Nordsee, die sich wenige Kilometer vor der Küste befinden. Sie bestehen aus quartären Sedimenten wie Sanden, Tonen und Schluffen (Abb. 3). Durch Versickerung der Niederschläge in den Dünengürteln werden dort Grundwasserreservoirs mit Süßwasser aufgefüllt, die die Versorgung der Inseln mit Frischwasser sicherstellen. Weil Süßwasser ein geringeres spezifisches Gewicht als das versalzte Grundwasser hat, schwimmt es als „Linse“ auf dem Salzwasser. Verändert sich der Wasserstand des dichteren Salzwassers, ändert sich das Druckniveau und entsprechend auch Stand und Ausdehnung der Süßwasserlinse. Durch Stürme können Salzwassereinträge bis an den Rand des inneren Dünengürtels der Inseln gelangen und dort versickern. Solche Ereignisse, aber auch der erhöhte Wasserbedarf für den Tourismus in den Sommermonaten gefährden das Süßwasserreservoir. Noch erfolgt die gesamte Trinkwasserversorgung mit inseleigenem Grundwasser, welches in den Wintermonaten allein durch Regenfälle wieder aufgefüllt wird. Unterhalb wasserundurchlässiger Bodenschichten kann Süßwasser darüber hinaus vom Festland aus unterschiedlich weit in das Wattenmeer vordringen, um dann unter gewissen Bedingungen an die Oberfläche zu treten. Die Befliegungen wurden bei Niedrigwasser durchgeführt, um vergleichbare Bedingungen für jeden Flug zu haben und insbesondere auch, um den Untergrund des Wattenmeeres ohne die bei Flut vorhandene Meerwasserschicht besser erkun-

den zu können. Aufgrund der Berücksichtigung von Naturschutzaufgaben konnte die aerogeophysikalische Erkundung nur in den Wintermonaten durchgeführt werden. Das Messgebiet umfasst die gesamte Insel Langeoog, den westlichen Teil der Insel Spiekeroog und das Wattenmeer zwischen Langeoog und dem Festland (Abb. 2). Einen Überblick über die Messkampagne gibt Tabelle 1.

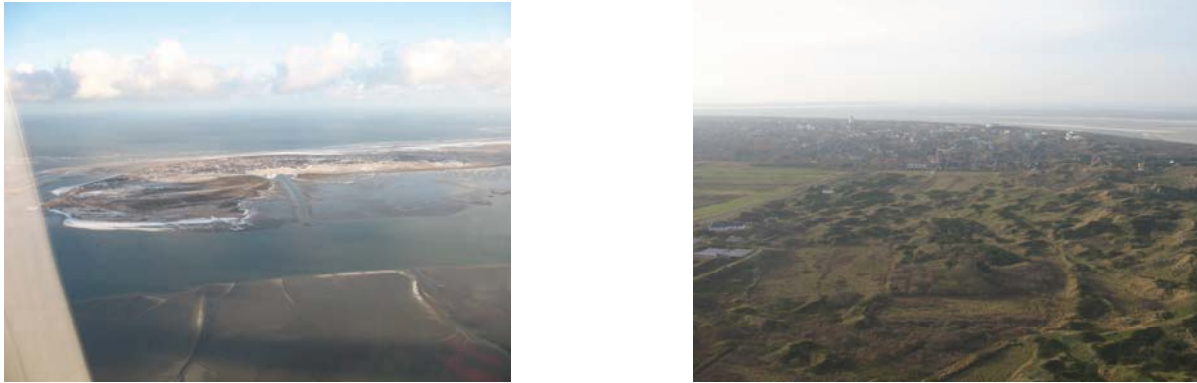


Abbildung 2: Insel Spiekeroog mit Wattenmeer während der Befliegung im März 2009 und westlicher Teil von Langeoog mit der Dünenlandschaft, unter der sich Süßwasserlinsen verbergen (Fotos: W. Voß).

Tabelle 1:

Größe des Messgebietes:	259 km ²
Gesamtprofillänge:	1200 km
Linienabstand:	67 Mess-Linien mit 250 m (N-S), 7 Kontroll-Linien mit 2000 m (W-O)
Messzeitraum:	Februar und November 2008, Februar und März 2009; nur bei Niedrigwasser

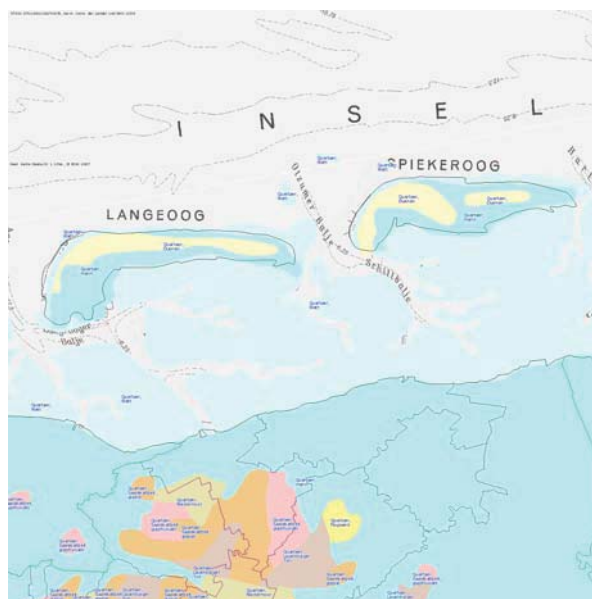


Abbildung 3: Geologische Karte des Messgebietes aus dem FIS Geophysik des LIAG.

Abbildung 4 zeigt die vorläufigen Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands (mit ρ_a bis maximal $2000 \Omega\text{m}$) der verschiedenen Messfrequenzen (133400 Hz, 41520 Hz, 8390 Hz, 5345 Hz, 1823 Hz und 387 Hz) für das Messgebiet. Jeder Frequenz wird dabei zu den einzelnen Messpunkten eine Schwerpunkttiefe z^* zugeordnet, die in Abbildung 5 dargestellt ist. Für die höchsten Frequenzen sind dies einige wenige Meter unter der Erdoberfläche, die tiefsten Frequenzen erreichen eine Erkundungstiefe bis etwa 100 m. Diese Erkundungstiefen sind neben der Frequenz auch von den spezifischen Widerständen der Untergrundstrukturen abhängig und können somit von Messpunkt zu Messpunkt variieren. Die Abfolge einer Auswahl von Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands in einer 3D-Darstellung gibt daher eine Abbildung der Leitfähigkeitsstrukturen mit Bezug zur Tiefe nur bedingt wieder (Abb. 7). Die tiefste Frequenz bildet die Basis der Süßwasserlinse ab.

Deutlich sind die den Süßwasserlinsen zugeordneten Strukturen auf der Insel und die mit salzhaltigem Nordseewasser gefüllten Priele zu erkennen. Im Bereich vor der Festlandküste kann man Gebiete mit für Süßwasser typischen Werten der scheinbaren Widerstände erkennen. Hier ist zu klären, ob dies Austritten von Süßwasser im Watt entspricht.

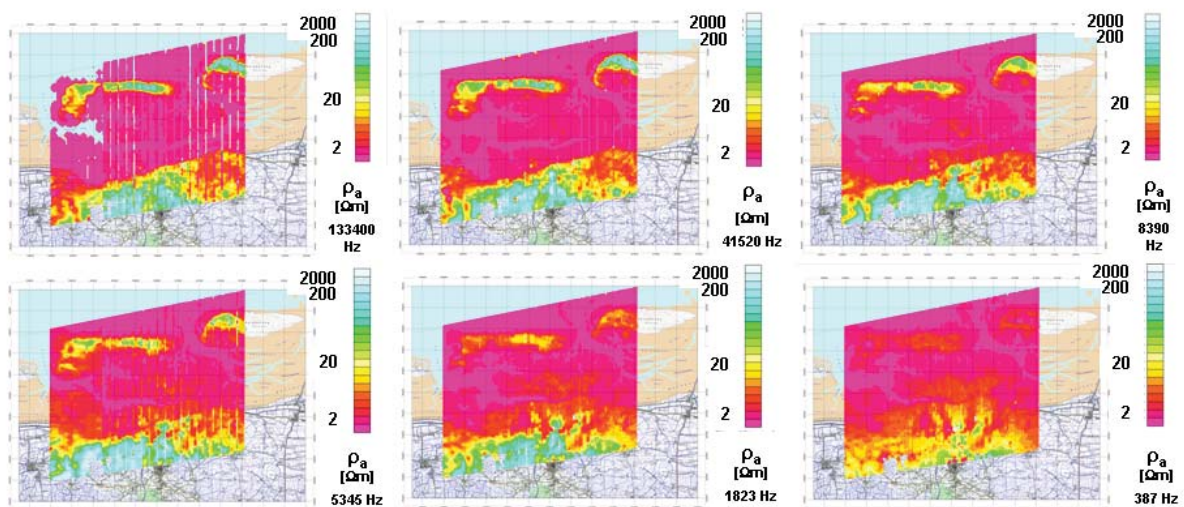


Abbildung 4: Vorläufige Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands ρ_a für die Messfrequenzen 133400 Hz, 41520 Hz, 8390 Hz, 5345 Hz, 1823 Hz und 387 Hz (ρ_a bis maximal $2000 \Omega\text{m}$).

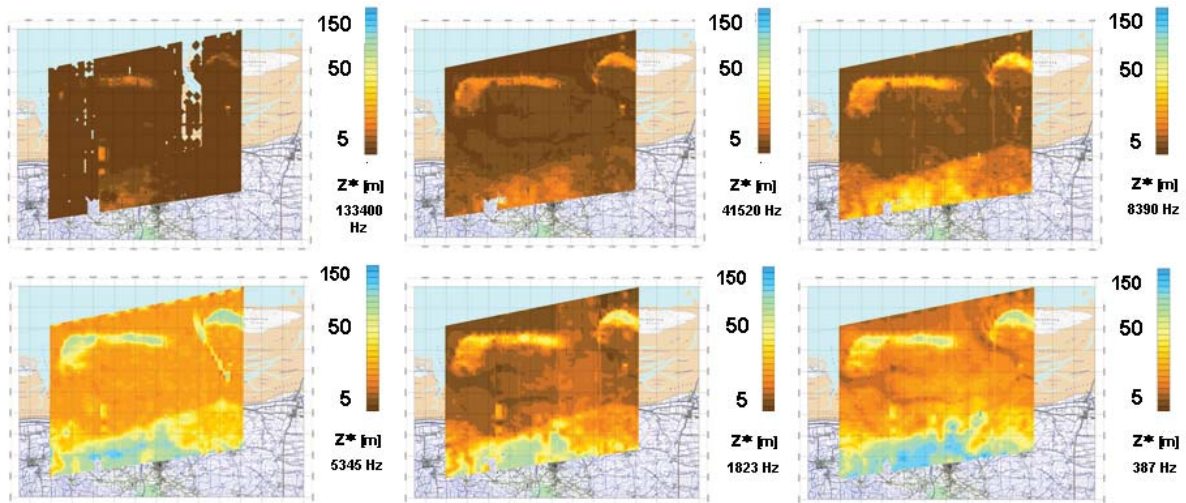


Abbildung 5: Vorläufige Karten der Schwerpunkstiefe z^* für die Messfrequenzen 133400 Hz, 41520 Hz, 8390 Hz, 5345 Hz, 1823 Hz und 387 Hz.

Benutzt man einen anderen Farbkeil für die Darstellung der scheinbaren spezifischen Widerstände (mit ρ_a bis maximal $200 \Omega m$), kann man beispielsweise die Priele noch viel deutlicher erkennen, siehe Abbildung 6. Auch die mutmaßlichen Austritte von Süßwasser im Bereich vor der Festlandküste sind wesentlich besser aufgelöst.

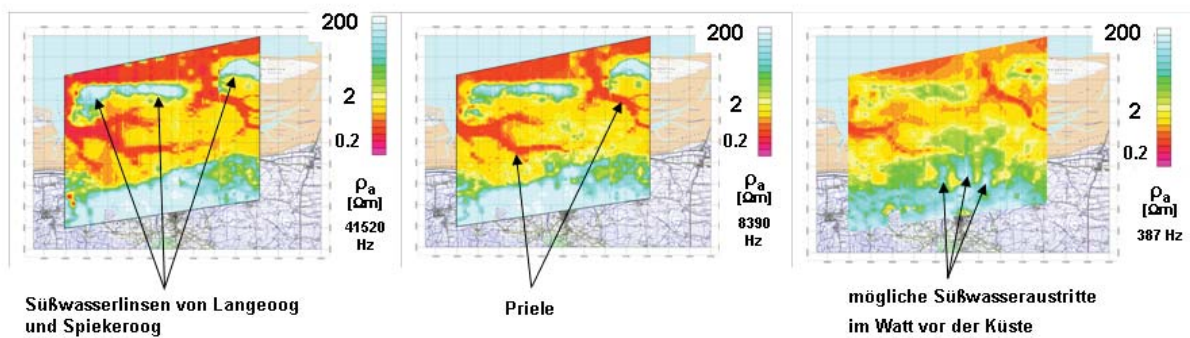


Abbildung 6: Vorläufige Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands ρ_a für drei ausgewählte Frequenzen (41520 Hz, 8390 Hz und 387 Hz), dargestellt mit einem anderen Farbkeil (ρ_a bis maximal $200 \Omega m$).

In Abbildung 8 wird die topographische Karte mittels des digitalen Höhenmodells (*digital elevation model*, DEM) aus dem FIS Geophysik des LIAG gezeigt. Dabei wurden die Daten des Höhenmodells auf die Fluglinien übertragen. Die topographische Karte kann auch aus GPS- und Laseraltimeterdaten des Hubschraubermesssystems abgeleitet werden.

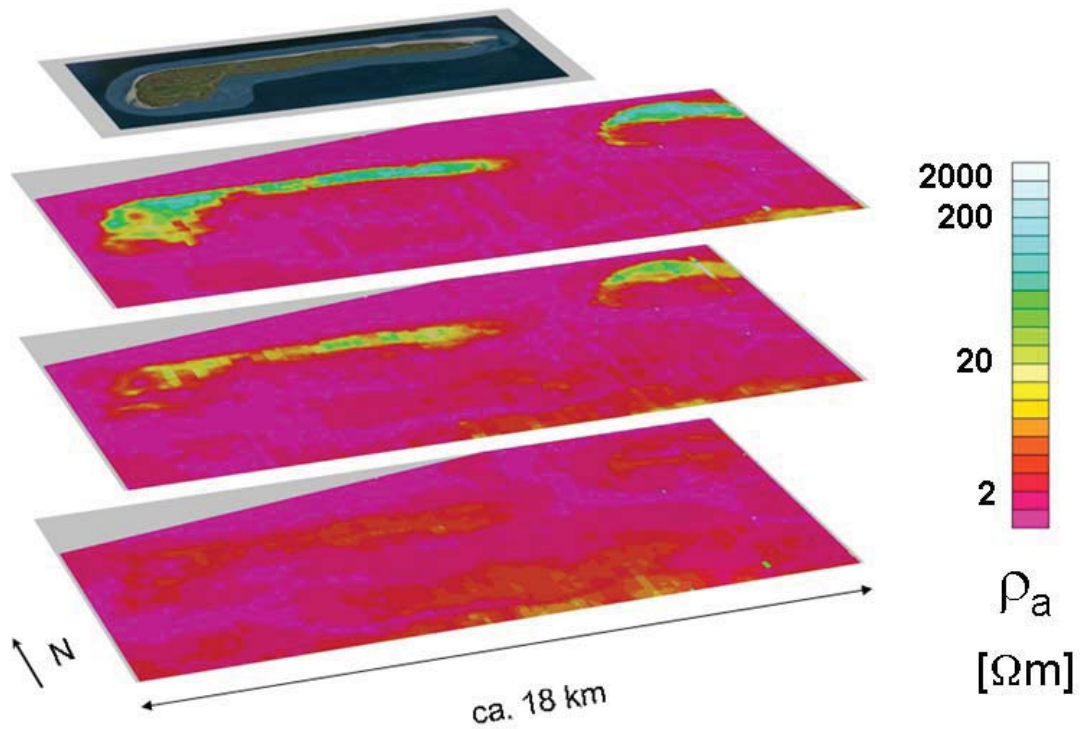


Abbildung 7: 3D-Darstellung der Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands ρ_a für die Frequenzen 41520 Hz, 8350 Hz und 387 Hz. Bild aus Google-Earth, September 2009.

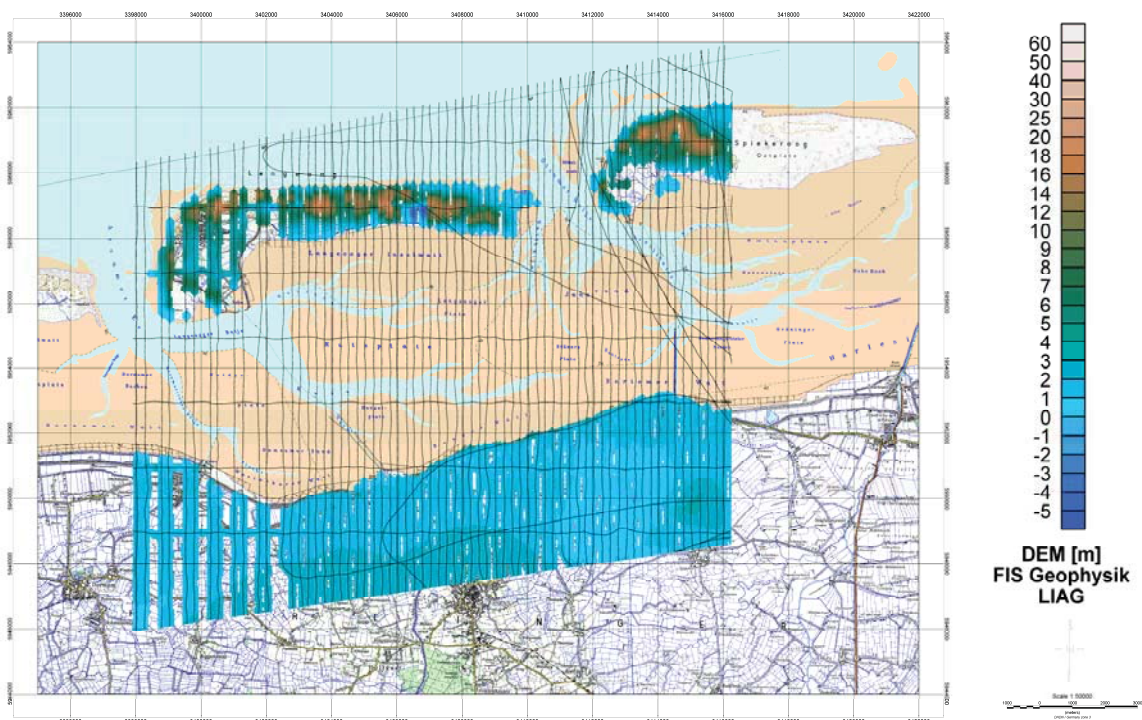


Abbildung 8: Topographische Karte mittels des digitalen Höhenmodells (*digital elevation model*, DEM) aus dem FIS Geophysik des LIAG. Dabei wurden die Daten des Höhenmodells auf die Fluglinien übertragen.

3. Messgebiet Glückstadt

Das Messgebiet Glückstadt umfasst große Teile des Elbemündungsbereichs (Abb. 9). Teile der Ergebnisse der HEM-Befliegung werden in das Projekt *KLIMZUG-NORD* (www.klimzug-nord.de) einfließen, bei dem unter anderem die Auswirkungen des Klimawandels auf das Ästuar der Elbe erforscht werden. Es ist davon auszugehen, dass sich der Elbwasserstand in diesem Gebiet erhöht, was eine Intrusion von Brackwasser in den Süßwasseraquifer nach sich ziehen würde. Mit hydraulischen Strömungsmodellen können solche Fragestellungen untersucht werden. Bereits vorhandene geologische Informationen sollen mit Hilfe von elektrischen Leitfähigkeitsmodellen der HEM flächenhaft zu einem geologischen Strukturmodell ergänzt werden. Dieses wird mit hydraulischen Parametern belegt und dient damit als Grundlage für eine hydraulische Modellierung.

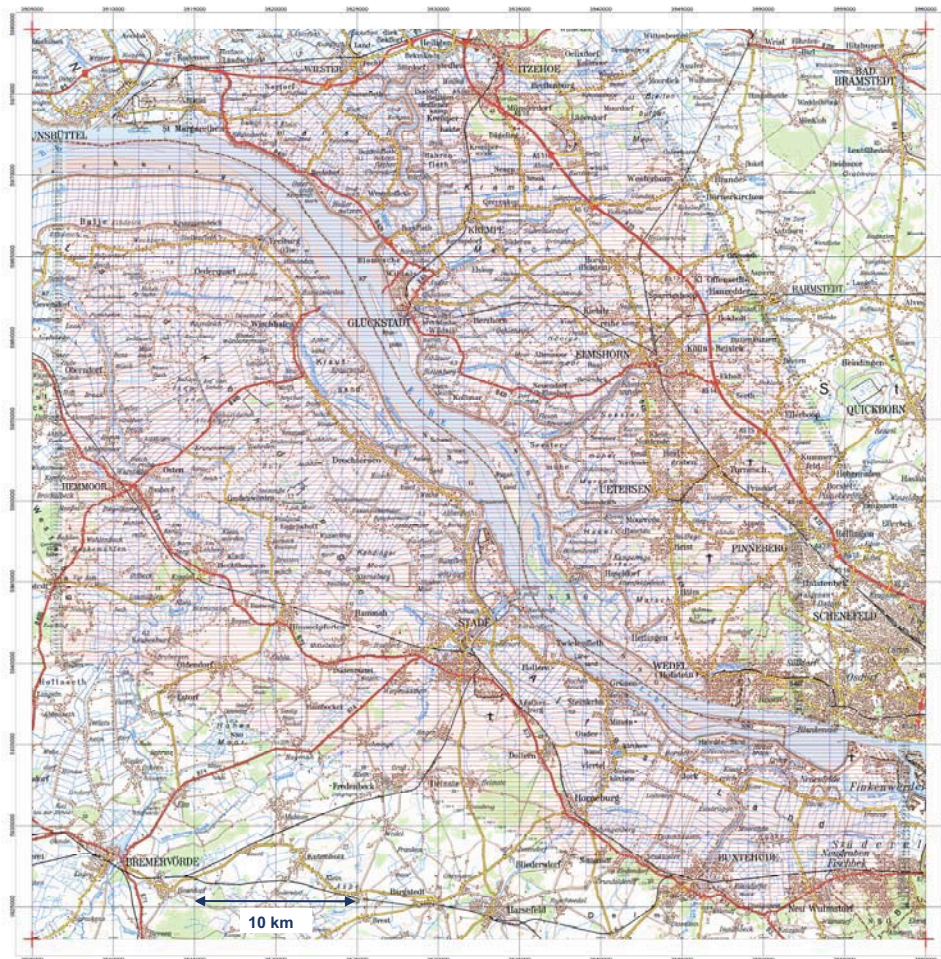


Abbildung 9: Flugplan für das Messgebiet Glückstadt, welches große Teile des Elbemündungsbereichs umfasst.

Einen Überblick über den Umfang der Messkampagne gibt Tabelle 2.

Tabelle 2:

Größe des Messgebietes:	1949 km ²
Gesamtprofillänge:	8500 km
Linienabstand:	209 Mess-Linien mit 250 m (W-O), 19 Kontroll-Linien mit 2500 m (N-S)
Messzeitraum:	Juli und Oktober 2008, März-Mai 2009

Aus den GPS- und den Laseraltimeterdaten des Hubschraubermesssystems kann ein digitales Höhenmodell abgeleitet werden (Abb. 10). Hier wird besonders der Verlauf der Geest (Höhenzug bestehend aus pleistozänen Sandablagerungen von Moränen) und der Marsch (flaches holozänes Schwemmland) deutlich.

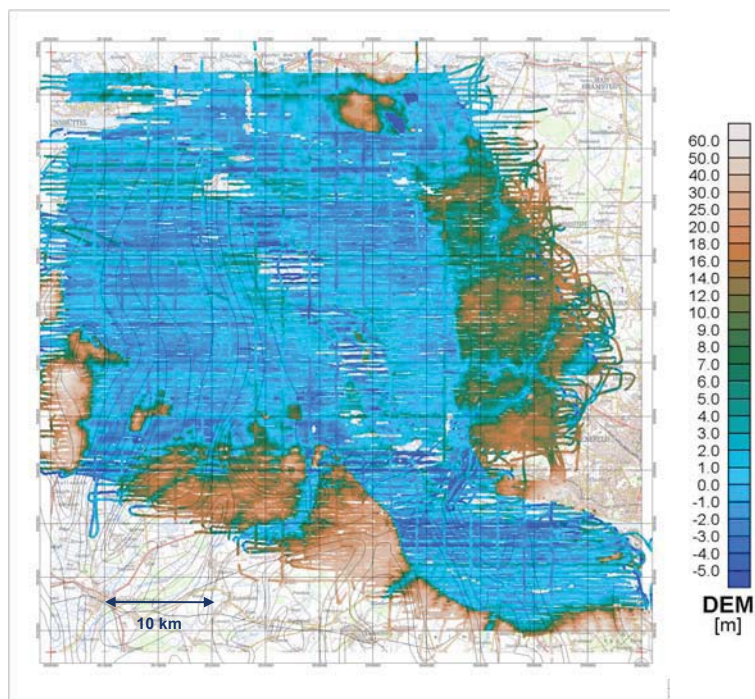


Abbildung 10: Digitales Höhenmodell des Elbemündungsgebietes, abgeleitet aus GPS- und Laseraltimeterdaten des Hubschraubermesssystems.

Erste Ergebnisse in Form von vorläufigen Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands und der Schwerpunkttiefe sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Datenlücken sind teilweise auf Hochspannungsleitungen und entlang der Elbe auf Radarstationen bzw. Sperrzonen um die Atomkraftwerke herum zurückzuführen.

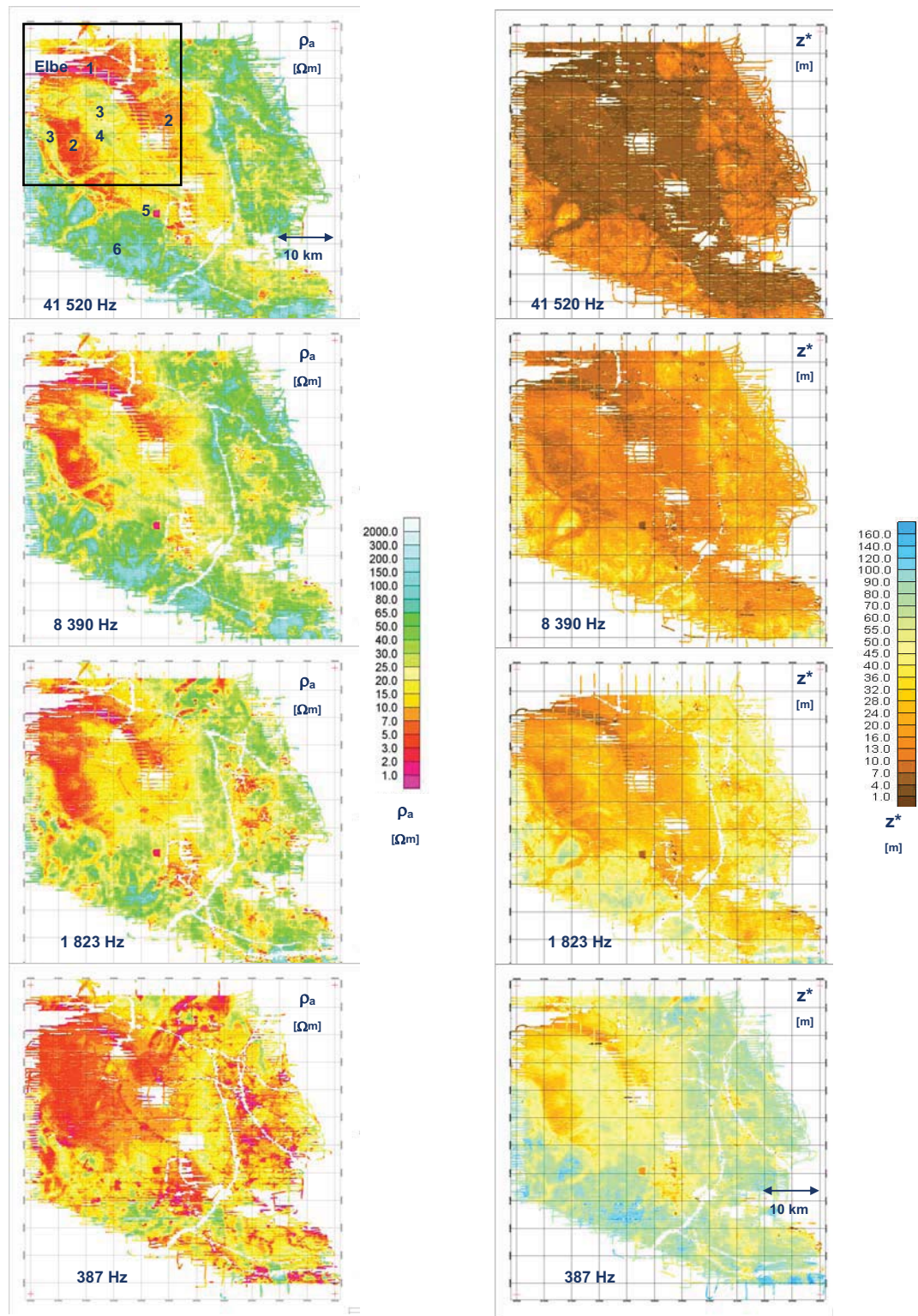


Abbildung 11: Vorläufige Karten des scheinbaren spezifischen Widerstands ρ_a und der Schwerpunkstiefe z^* für vier ausgewählte Messfrequenzen.

Mit Hilfe der geologische Karte vom Mündungsbereich der Elbe (Abb. 12a) können z.B. in der Karte des scheinbaren spezifischen Widerstands zu der Frequenz 41 kHz (Abb. 12b) folgende Leitfähigkeitsstrukturen identifiziert werden: 1. Brackwasser der Elbe, 2. Perimarine Ablagerungen: Ton, schluffig, 3. Brackische Ablagerungen: Ton bis Schluff, feinsandig, 4. Moor: Torfe, 5. Rotschlammdeponie: Eisen- und Titanoxide, 6. Glazifluviale Ablagerungen: Sand und Kies.

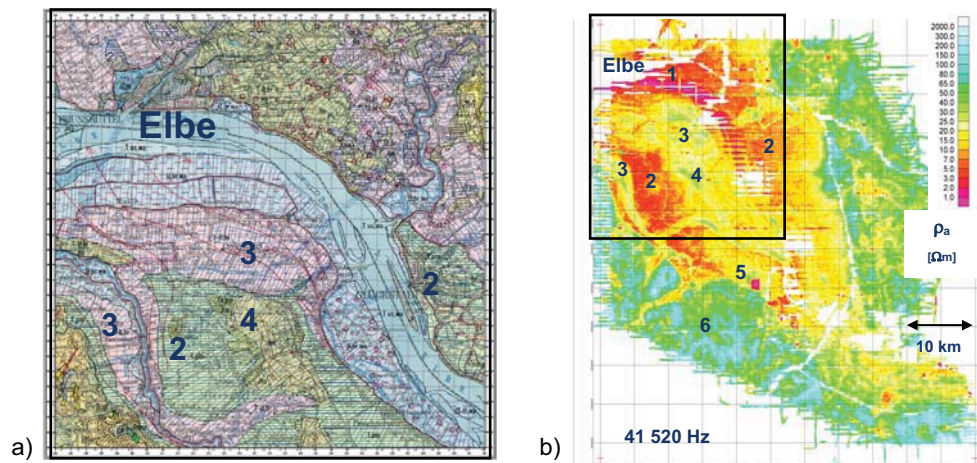


Abbildung 12: a) Geologische Karte und b) Karte des scheinbaren spezifischen Widerstands der Frequenz 41 kHz. Im Mündungsbereich der Elbe können folgende Leitfähigkeitsstrukturen identifiziert werden: 1. Brackwasser der Elbe, 2. Perimarine Ablagerungen: Ton, schluffig, 3. Brackische Ablagerungen: Ton bis Schluff, feinsandig, 4. Moor: Torfe, 5. Rotschlammdeponie: Eisen- und Titanoxide, 6. Glazifluviale Ablagerungen: Sand und Kies.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In beiden Messgebieten wurde die HEM zur Erkundung von Grundwasserstrukturen erfolgreich eingesetzt. Die hier gezeigten Karten dokumentieren die vorläufigen Ergebnisse. Nach Abschluss der Prozessierung werden die HEM-Daten in Schichtmodelle des spezifischen Widerstands invertiert.

Auf den Ostfriesischen Inseln Langeoog und Spiekeroog konnten die Lage und Ausdehnung der Süßwasserlinsen erfasst werden. Daneben zeigten sich insbesondere in den Daten der tiefsten Messfrequenz Bereiche veränderter scheinbarer spezifischer Widerstände im Wattenmeer vor der Festlandküste, die die Vermutung nahe legen, dass hier Süßwasser austritt.

Im Gebiet Glückstadt werden als Fragestellung mögliche Intrusionen von Brackwasser in den Süßwasseraquifer untersucht. Die bereits vorhandenen geologischen Informationen werden mit Hilfe der HEM-Modelle flächenhaft zu einem geologischen Strukturmodell ergänzt. Nach einer Belegung mit hydraulischen Parametern kann es damit als Grundlage für eine Interpretation mit Strömungsmodellen dienen.

Danksagung

Die hier vorgestellten Teilgebiete des *BGR/LIAG*-Projektes wurden in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM)*, der *Universität Oldenburg* sowie der *Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg* durchgeführt.

Referenzen

Siemon, B. [2009] Electromagnetic methods – frequency domain: Airborne techniques, In: Kirsch, R. (Ed.), *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*. 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 155-170.

Siemon, B., Christiansen, A.V. & Auken, E. [2009] A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. *Near Surface Geophysics*, 7, 629-646.

Steuer, A., Siemon, B., Schaumann, G., Wiederhold, H., Meyer, U., Pielawa, J., Binot, F. & Kühne, K. [2009] The German North Sea Coast in Focus of Airborne Geophysical Investigations, AGU Fall Meeting 2009, San Francisco, USA.

Steuer, A., Siemon, B. & Grinat, M. [2010] The German North Sea Coast in Focus of Airborne Electromagnetic Investigations: The Freshwater Lenses of Borkum, EMTF, this volume.

Wiederhold, H., Binot, F., Kühne, K., Meyer, U., Siemon, B. & Steuer, A. [2008] Airborne geophysical investigation of the German North Sea Coastal Area, 20th Salt Water Intrusion Meeting 2008, Naples, USA.

<http://www.liag-hannover.de/forschungsschwerpunkte/grundwassersysteme-hydrogeophysik/salzsuesswassersysteme/flaechenhafte-befliegung.html>

http://www.bgr.bund.de/cln_101/nn_328750/DE/Themen/GG_Geophysik/Aerogeophysik/Projektbeitraege/D-AERO/deutschlandweite_aerogeophysik_befliegung_D-AERO.html

<http://www.fis-geophysik.de/>