

B. Siemon, M. Ibs-von Seht, U. Meyer,  
J. Pielawa, A. Steuer, W. Voß,  
H. Wiederhold



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

# **Technischer Bericht zur Befliegung der Insel Borkum**

**März 2008**





**Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe**

**Technischer Bericht zur  
Befliegung der Insel  
Borkum**

**März 2008**

In Zusammenarbeit:

**Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG)**

und mit finanzieller Unterstützung vom

**Nds. Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr**

Autoren: B. Siemon  
M. Ibs-von Seht  
U. Meyer  
J. Pielawa  
A. Steuer  
W. Voß  
H. Wiederhold

Datum: 16.12.2009

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Personal</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Kartenverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste der Vertikalsektionen</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Das Messgebiet</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR</b> .....	<b>8</b>
4.1. Messhubschrauber .....	9
4.2. Messausrüstung.....	9
4.3. Elektromagnetik.....	10
4.4. Magnetik.....	12
4.5. Radiometrie .....	13
4.6. Navigations- und Positionierungssystem .....	14
4.7. Datenerfassung und -aufzeichnung .....	15
4.8. Videosystem .....	16
4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber .....	17
<b>5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten</b> .....	<b>18</b>
5.1. Prozessabläufe .....	18
5.2. Positionsdaten.....	19
5.2.1. Koordinaten.....	19
5.2.2. Radarhöhen .....	19
5.2.3. Laserhöhen .....	19
5.2.4. Topografische Höhen .....	20
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik.....	21
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems .....	21
5.3.2. Nullniveaubestimmung.....	22
5.3.3. Datenkorrektur .....	23
5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter .....	24
5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten .....	25

---

5.3.6. Statistische Niveauanpassung.....	25
5.3.7. Dateninterpolation und -glättung .....	26
5.3.8. 1D-Inversion der HEM-Daten.....	26
5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse.....	27
5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik.....	28
5.4.1. Magnetisches Totalfeld .....	28
5.4.2. Berechnung des IGRF .....	28
5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen.....	28
5.4.4. Statistische Niveauanpassung.....	28
5.4.5. Präsentation der Magnetik-Ergebnisse.....	29
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie .....	29
<b>6. Kartografische Arbeiten.....</b>	<b>30</b>
6.1. Topographische Karte 1:25.000 .....	30
6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software .....	30
6.3. Ergebniskarten .....	31
<b>7. Archivierung.....</b>	<b>31</b>
<b>8. Literatur.....</b>	<b>33</b>
<b>Unterschriften .....</b>	<b>34</b>
<b>Anhang I:</b> Befliegungsdaten Messgebiet Borkum .....	<b>35</b>
<b>Anhang II:</b> Korrekturwerte für HEM-Daten.....	<b>38</b>
<b>Anhang III:</b> Beschreibung der Datenformate .....	<b>39</b>
<b>Anhang IV:</b> Karten .....	<b>46</b>
<b>Anhang V:</b> Vertikalsektionen .....	<b>72</b>

## **Personal:**

### **Projektleitung**

Dr. Uwe **Meyer**, Fachbereichsleiter B2.1, Projektleitung BGR

Dr. Helga **Wiederhold**, Forschungsschwerpunktsleiterin Grundwassersysteme – Hydrogeophysik,  
Projektleitung LIAG

### **Management, Auswertung und Interpretation**

Dr. Uwe **Meyer**, Fachbereichsleiter, Projektleitung, B2.1, BGR

Dr. Bernhard **Siemon**, Arbeitsbereichsleiter, HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR

Dr. Annika **Steuer**, HEM-Datenauswertung und Interpretation, B2.1, BGR (ehemals LIAG)

Dr. Malte **Ibs-von Seht**, Geologe, HMG- und HRD-Datenauswertung, B2.1, BGR

Jens **Pielawa**, Kartograf, B2.1, BGR

### **Messgruppe**

Wolfgang **Vofß**, Vermessungsingenieur, B2.1, BGR

Karl-Heinz **Meinhardt**, Operator, Systembetreuer, B2.1, BGR

Josef **Scheiwein**, Hubschrauberingenieur, B2.1, BGR

Michael **Schütt**, Pilot, Wiking Helikopter Service GmbH

Hanno **Schmidt**, Navigator, BGR

**Adresse:** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Fachbereich B2.1

„Geophysikalische Erkundung – Ressourcen und Oberflächenprozesse“

Stilleweg 2

D-30655 Hannover

Tel.: (0511) 643 3212 (Meyer)

3488 (Siemon)

Fax: (0511) 643 3662

Email: heli@bgr.de, Uwe.Meyer@bgr.de, Bernhard.Siemon@bgr.de

---

### **Abbildungsverzeichnis:**

1. Lageskizze des Messgebietes Borkum
2. Fluglinienkarte des Messgebietes Borkum
3. Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems

### **Tabellenverzeichnis:**

1. Technische Daten der Befliegung Borkum
2. Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
3. Geophysikalische Messsysteme
4. HEM-Systemparameter
5. Basisstation
6. Strahlungsquellen und zugehörige Spektrometerkenndaten
7. Navigations- und Positionierungssysteme
8. Höhenmesser
9. Datenerfassung und -aufzeichnung
10. Videosystem
11. Sonstige Ausrüstung
12. Kalibrierwerte für das HEM-System
13. Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung
14. Eckpunktkoordinaten der Blattschnitte Borkum
15. Gitterparameter
16. Inhalt der DVD
- A-1: Flugprotokoll
- A-2: HEM-Korrekturfaktoren

---

**Kartenverzeichnis (1: 50 000):**

1. Topografie und Fluglinien
2. Digitales Höhenmodell in m NN
3. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 133.300 Hz (rhoa6) in  $\Omega\text{m}$
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 41.430 Hz (rhoa5) in  $\Omega\text{m}$
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8338 Hz (rhoa4) in  $\Omega\text{m}$
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 5495 Hz (rhoa3) in  $\Omega\text{m}$
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1823 Hz (rhoa2) in  $\Omega\text{m}$
8. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 386 Hz (rhoa1) in  $\Omega\text{m}$
9. Schwerpunktstiefe bei 133.300 Hz (zst6) in m unter GOK
10. Schwerpunktstiefe bei 41.430 Hz (zst5) in m unter GOK
11. Schwerpunktstiefe bei 8338 Hz (zst4) in m unter GOK
12. Schwerpunktstiefe bei 5495 Hz (zst3) in m unter GOK
13. Schwerpunktstiefe bei 1823 Hz (zst2) in m unter GOK
14. Schwerpunktstiefe bei 386 Hz (zst1) in m unter GOK
15. Spezifischer Widerstand bei 0m NN
16. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter NN
17. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter NN
18. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter NN
19. Spezifischer Widerstand bei 20 m unter NN
20. Spezifischer Widerstand bei 25 m unter NN
21. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter NN
22. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter NN
23. Spezifischer Widerstand bei 50 m unter NN
24. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter NN
25. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT

---

**Liste der Vertikalsektionen:**

Messprofile:

1. VRS 3.1
2. VRS 4.1
3. VRS 5.1
4. VRS 6.1
5. VRS 7.1
6. VRS 8.1
7. VRS 9.1
8. VRS 10.1
9. VRS 11.1
10. VRS 12.1
11. VRS 13.1
12. VRS 14.1
13. VRS 15.1
14. VRS 16.1
15. VRS 17.1
16. VRS 18.1
17. VRS 19.1
18. VRS 20.1

Kontrollprofile:

19. VRS 21.1
20. VRS 22.1
21. VRS 23.1
22. VRS 24.1
23. VRS 25.1
24. VRS 26.1
25. VRS 27.1
26. VRS 28.1
27. VRS 29.1
28. VRS 30.1
29. VRS 31.1
30. VRS 32.1
31. VRS 33.1
32. VRS 34.1
33. VRS 35.1
34. VRS 36.1
35. VRS 33.2
36. VRS 36.2

37. VRS 3.9
38. VRS 4.9
39. VRS 5.9
40. VRS 6.9
41. VRS 7.9
42. VRS 8.9
43. VRS 9.9
44. VRS 10.9
45. VRS 11.9
46. VRS 12.9
47. VRS 13.9

Sonderprofile:

48. VRS 101.1
49. VRS 102.1
50. VRS 103.1
51. VRS 104.1
52. VRS 105.1
53. VRS 106.1
54. VRS 107.1
55. VRS 201.1
56. VRS 202.1
57. VRS 203.1
58. VRS 204.1

## Abkürzungen

°	Grad
°C	Grad Celsius
'	Minute
”	Sekunde
%	Prozent
1D	eindimensional
A, A'	Amplituden
Ah	Amperestunden
Am	Amperemeter
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bi	Wismut
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CF	Compact Flash
cm	Zentimeter
Cs	Cäsium
$\Delta T$	Anomalien des magnetischen Feldes
$\Delta V$	(magnetische) Tagesvariationen
$\delta$	Residual
$\delta$	inverse, normierte Skintiefe (= $h/p$ )
$d_a$	scheinbare Tiefe
$D_a$	scheinbarer Abstand
DEM	Digitales Höhenmodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
dpi	dots per inch (Pixel pro Zoll)
DVD	Digital Versatile Disc
E	Osten, Ost-Süd-Ost
e	Basis des natürlichen Logarithmus ( $1/e \approx 0.37$ )
$\epsilon$	Komponentenverhältnis (= $Q/I$ )
EM	Elektromagnetik
f	Frequenz
FAS	Fugro Airborne Surveys
ft	feet (Fuss)
GK	Gauß-Krüger (Koordinaten)
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
GPS-Z	vertikale GPS-Komponente
h	Höhe des EM-Systems über Grund (Birdhöhe)

---

HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HMG	Hubschraubermagnetik
HRD	Hubschrauberradiometrie
Hz	Hertz
I	Inphase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
K	Kalium
Kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
l	Liter
log	Logarithmus
m	Meter
m NN	Meter über Normalnull
m üG	Meter über Gelände
MeV	Megaelektronenvolt
ms	Millisekunde
$\mu_0$	magnetisch Permeabilität der Luft (= $1,257 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am)
N, NE, NW	Norden, Nord-Ost, Nord-West
NL	nicht-linear
NN	Normalnull
nT	Nanotesla
$\Omega$ m	Ohmmeter (Ohm*m)
$\pi$	Kreiszahl (= 3,14159265...)
p	Skintiefe
PDF	Portable Document Format
ppm	parts per million
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
r	Abstandsparameter
$\rho$	spezifischer Widerstand
$\rho_a$	scheinbarer spezifischer Widerstand
$\rho_w$	scheinbarer spezifischer Widerstand von (Meer-)Wasser
s	Sekunde
S, SE, SW	Süden, Süd-Ost, Süd-West
STF	Standardfehler
t	Zeit
T	Totalintensität des magnetischen Feldes

---

TK	Topographische Karte
Tl	Thallium
T <sub>TP</sub>	Abschneideperiode bei Tiefpass-Filter
topo	Topografie
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
V	Volt
V <sub>s</sub>	Voltsekunde
V <sub>M</sub>	Mittelwert der Tagesvariationen
W	Westen, West-Nord-West
WGS	World Geodetic System
z*	Schwerpunktstiefe
ζ, λ	geografische Koordinaten (ζ = Breite, λ = Länge)

## 1. Zusammenfassung

Die Kenntnis des nahen Untergrundes zwischen der Oberfläche und den ersten hundert Metern Tiefe ist eine wesentliche Voraussetzung zur Planung und Arbeit in vielfältigen ökonomischen, ökologischen und geowissenschaftlichen Bereichen. Die Nordseeküste ist unter Aspekten wie Klimawandel, Küstenschutz und Wirtschaftsraum von besonderem Interesse. Nordseeinseln, Wattenmeer und Deichregionen sind durch Sturmfluten und langfristigen Meeresspiegelanstieg besonders gefährdet. Auch wenn diese Gefahren kaum abgewendet werden können, sind ihre Auswirkungen zum Beispiel auf Süßwasservorkommen unter den Nordseeinseln besser einschätzbar, wenn eine umfassende Datengrundlage zur Verfügung steht. Die Küstenregion hinter den Deichen ist durch natürliche Salzwasserintrusionen geprägt. Jede Veränderung wirkt sich auf die Ausbreitung des Salzwassers im Untergrund aus und kann Trinkwasservorkommen gefährden. Aerogeophysikalische Messungen können in diesem Fall insbesondere Hydrogeologen und Wasserversorgern zu einem besseren Verständnis der Verhältnisse im Untergrund verhelfen.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führte daher in den Jahren 2008–2009 gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) im Rahmen des Projektes „Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche“ (D-AERO) flächenhafte Befliegungen an der deutschen Nordseeküste durch. Hierbei standen drei Regionen im Vordergrund: a) die Erweiterung der vorhandenen Datensätze im Raum Bremerhaven-Cuxhaven-Hadelner Bucht nach Westen in den Ems-Jade-Weser Raum, einschließlich der Ostfriesischen Inseln sowie nach Süden bis in den Raum Oldenburg-Bremen; b) das Schließen der Lücke der vorhandenen Datensätze im Raum Bremerhaven-Cuxhaven-Hadelner Bucht und im Raum Hamburg und damit Kartierung bzw. Bestandsaufnahme des Einflussbereiches der Elbe, und c) die Erweiterung der Messflächen nach Norden in den Schleswig-Holsteinischen Küstenraum. Die Festlegung der jeweiligen Befliegungsflächen fand in Absprache mit den staatlichen geologischen Diensten statt.

Die Insel Borkum ist mit etwa 31 km<sup>2</sup> die größte und westlichste der Ostfriesischen Inseln in der Nordsee. Sie ist nach Südwesten begrenzt durch die Wester Ems nahe der Grenze zu den Niederlanden, nach Nordosten durch die Oster Ems und nach Südosten durch die Emsmündung. Die Trinkwasserversorgung der Insel erfolgt zum überwiegenden Teil durch die Brunnen im Ostteil der Insel. Sturmflutereignisse wie die vom Winter 2006/2007, die zu erheblichen Schäden im Bereich der vorgelagerten Dünen führten, können die Süßwasserressourcen gefährden, insbesondere wenn der prognostizierte klimabedingte Meeresspiegelanstieg eintritt. Ziel der Befliegung der Insel Borkum war es daher, Informationen über die Ausdehnung und Beschaffenheit des Grundwasserkörpers zu bekommen.

Das etwa 88 km<sup>2</sup> große Messgebiet Borkum wurde mit 4 Messflügen, die 36 Mess- bzw. 11 Kontrollprofile mit einer Gesamtlänge von etwa 410 Profilkilometer umfassen, vom 3. bis 4. März 2008 vermessen. Der Sollabstand der NW–SE-Profile war 250 m, derjenige der SW–NE-Kontrollprofile 500 m.

Das hierfür eingesetzte Hubschraubermesssystem der BGR umfasst die Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD). Das Messsystem besteht aus einem Hubschrauber als Systemträger, den simultan registrierenden geophysikalischen Messinstrumenten, die sich in einer nachgeschleppten Flugsonde (HEM und HMG) bzw. im Hubschrauber (HRD) befinden, den Navigations- und Positionierungsinstrumenten und einer Bodenstation zur Erfassung der zeitlich variablen Messgrößen (Variation des Magnetfeldes), die zur Korrektur der im Fluge gemessenen Daten benötigt werden.

Während des Fluges wurden die HEM- und HMG-Daten zehnmal pro Sekunde aufgezeichnet, was bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von etwa 134 km/h auf einen Messpunktabstand von 3,7 m führte, der aufgrund heftiger, meist aus nördlicher Richtung kommenden Winde jedoch stark variierte. Aufgrund eines technischen Problems konnten die HRD-Daten nicht korrekt aufgezeichnet werden und fehlen somit in der weiteren Darstellung. Die mittlere Höhe der Flugsonde lag bei etwa 34 m über Gelände.

Die Messdaten und die dazugehörigen Positionsdaten wurden im Flug auf einer CF-Karte gespeichert und unmittelbar nach der Befliegung einer ersten Qualitätskontrolle unterzogen. Die vorläufige Datenverarbeitung im Gelände beschränkte sich auf die flugweise Darstellung der Rohdaten der Magnetik (Totalfeld in nT) und Elektromagnetik (Sekundärfelder in ppm) sowie die Transformation der HEM-Daten in Halbraumparameter (scheinbarer spezifischer Widerstand und Schwerpunkstiefe) für jede der sechs Messfrequenzen. Die Verarbeitung der Daten, die Berechnung vom HEM-Mehrschichtmodelle und die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in der BGR in Hannover.

Der vorliegende „Technische Bericht“ protokolliert die Durchführung der aerogeophysikalischen Vermessung und beschreibt die verwendete Messausrüstung sowie die Bearbeitung der Daten und die Darstellung der Ergebnisse in Form von Schnitten und Karten. Die prozessierten Daten und die thematischen Karten sind auf einer DVD abgelegt, die als Anlage diesem Bericht beigelegt ist. Die Interpretation der Daten erfolgt in einem separaten Bericht.

Folgende Karten, die in Form von farbigen Isolinienplänen mit unterlegter Topografie vorliegen, sind im Maßstab 1:25.000 erstellt worden:

- Fluglinienplan der vermessenen Profile (Ist-Flugwege),
- Digitales Geländemodell,
- Scheinbare spezifische Widerstände (Halbraumwiderstände) und Schwerpunkstiefen für sechs Messfrequenzen 386, 1.823, 5.495, 8.338, 41.430 und 133.300 Hz,
- Spezifische Widerstände in den Tiefen 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 und 60 m unter NN, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen,
- Anomalien des magnetischen Totalfeldes.

Ferner sind für alle Fluglinien Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes erstellt worden.

## 2. Einleitung

Die Kenntnis des nahen Untergrundes ist eine wesentliche Voraussetzung zur Planung und Arbeit in vielfältigen ökonomischen, ökologischen und geowissenschaftlichen Bereichen, wie z. B. Wassernutzungs- und Wasserschutzkonzepte, Bodennutzungsplanung aber auch Industrieplanung, Deponieanlagen, Städteplanung, Verkehrswegebau, Tiefbau, Bergbau, Renaturalisierungsmaßnahmen, Ausweitung von Naturschutzgebieten, Deichneu- und -umbaumaßnahmen, Ausweisung von Überschwemmungsflächen, Land- und Forstwirtschaft.

Flächendeckende Kartierungen der Bodenschichten in den ersten hundert Metern Tiefe sind durch Befliegungen, in denen Methoden der Aerogeophysik zum Einsatz kommen, möglich. Die Daten können für ein Geoinformationssystem für die Oberfläche und den nahen Untergrund wertvolle dreidimensionale Informationen liefern. Eine solche weitgehend flächendeckende Datenbank ist notwendig für alle Arten von länderübergreifenden Raumplanungen und stellt ein grundlegendes Hilfsmittel für die geologischen Landesämter, genehmigende Behörden, Umweltämter, Wasserwirtschaftsämter und viele andere Institutionen dar. Eine zwingende Notwendigkeit räumliche Planungsgrundlagen zu erstellen und vorzuhalten ist z. B. durch die Wasserrahmenrichtlinie und die Grundwasserrichtlinie der EU gegeben, die besondere Schutzmaßnahmen für die Wassernutzung wie für den Umgang mit Brauch- und Industrieabwasser vorsehen. Für die dafür notwendige Definition und Abgrenzung von Wasserkörpern bieten aerogeophysikalische Vermessungen eine optimale Grundlage.

Die Nordseeküste ist unter Aspekten wie Klimawandel und Küstenschutz von besonderem Interesse. Nordseeinseln, Wattenmeer und Deichregionen sind durch Sturmfluten und langfristigen Meeresspiegelanstieg besonders gefährdet. Auch wenn diese Gefahren kaum abgewendet werden können, sind ihre Auswirkungen zum Beispiel auf Süßwasservorkommen unter den Nordseeinseln besser einschätzbar, wenn eine umfassende Datengrundlage zur Verfügung steht. Die Küstenregion hinter den Deichen ist durch natürliche Salzwasserintrusionen geprägt. Jede Veränderung wirkt sich auf die Ausbreitung des Salzwassers im Untergrund aus und kann Trinkwasservorkommen, landwirtschaftliche Anbauflächen etc. gefährden. Aerogeophysikalische Messungen können hier den Hydrogeologen und Wasserversorgern zu einem besseren Verständnis der Verhältnisse im Untergrund verhelfen.

Bei Nordseeinseln, wie beispielsweise Borkum, kann ein potenzieller Meeresspiegelanstieg zu besonders drastischen Konsequenzen führen, da kein Ausweichen in höher gelegene Regionen möglich ist. Ein höherer Meeresspiegel würde somit einerseits die Gefahrenlage bei Sturmfluten erhöhen und insbesondere die Trinkwassergewinnungsgebiete bedrohen, und andererseits das Volumen der Süßwasserlinsen durch Verschiebung der Salz-/Süßwassergrenzen verringern.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führte daher gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) im Rahmen des Projektes „Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche“ (D-AERO) flächenhafte Befliegungen an der deutschen Nordseeküste in den Jahren 2008-2009 durch. Hierbei standen drei Regionen im Vordergrund:

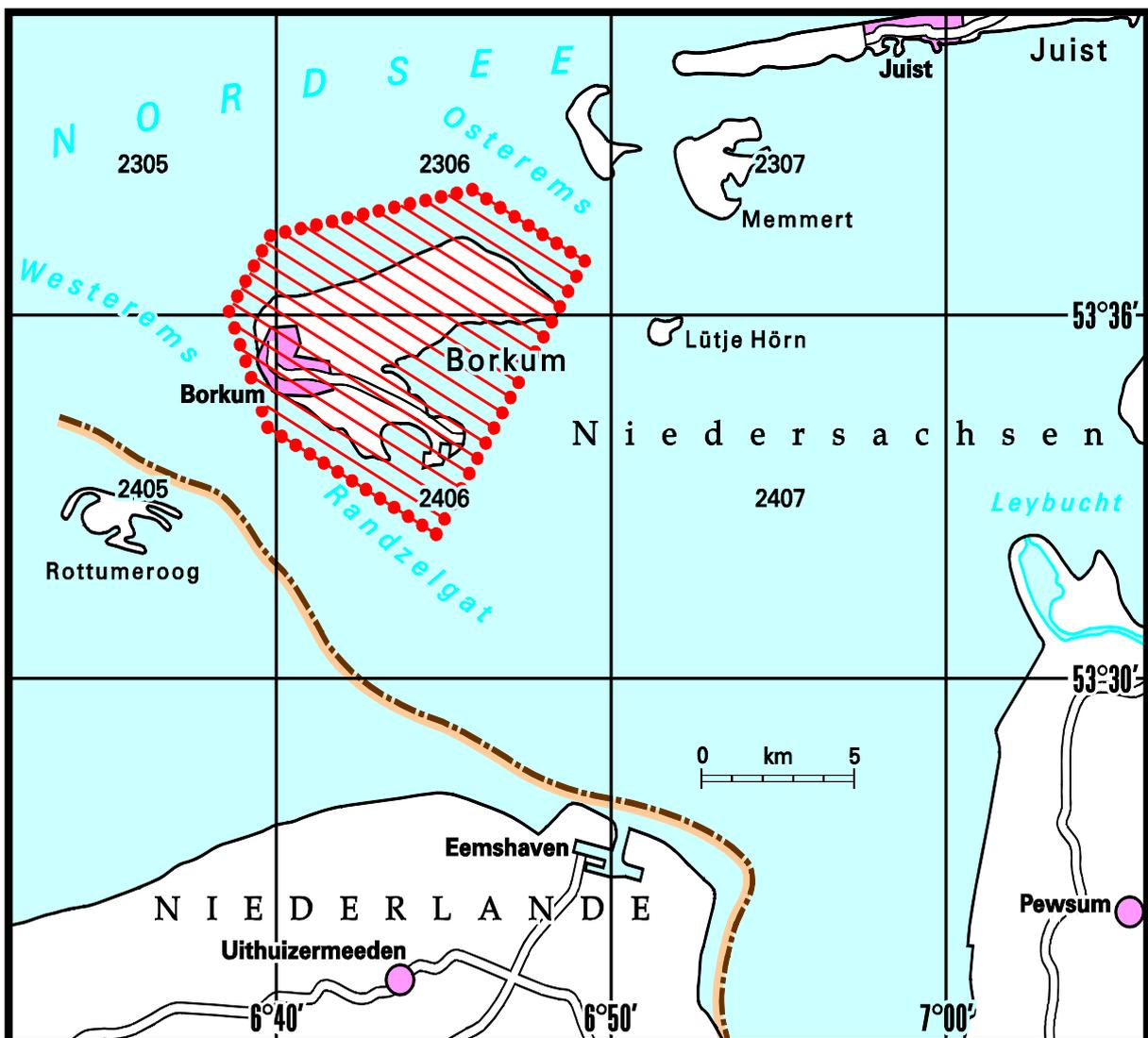
- a) die Erweiterung der vorhandenen Datensätze im Raum Bremerhaven-Cuxhaven-Hadelner Bucht nach Westen in den Ems-Jade-Weser Raum, einschließlich der Ostfriesischen Inseln sowie nach Süden bis in den Raum Oldenburg-Bremen;
- b) das Schließen der Lücke der vorhandenen Datensätze im Raum Bremerhaven-Cuxhaven-Hadelner Bucht und im Raum Hamburg und damit Kartierung bzw. Bestandsaufnahme des Einflussbereiches der Elbe, und
- c) die Erweiterung der Messflächen nach Norden in den Schleswig-Holsteinischen Küstenraum.

Die Festlegung der jeweiligen Befliegungsflächen fand in Absprache mit den staatlichen geologischen Diensten statt.

Das erste Untersuchungsgebiet war die Ostfriesische Insel Borkum, die im März 2008 mit dem Hub-schraubermesssystem der BGR beflogen wurde. Die Trinkwasserversorgung der Insel erfolgt zum überwiegenden Teil durch die Brunnen im Ostteil der Insel. Sturmflutereignisse wie die vom Winter 2006/2007, die zu erheblichen Schäden im Bereich der vorgelagerten Schutzdünen und großflächigen Überflutungen nördlich der Trinkwassergewinnungsanlagen führten, können die Süßwasserressourcen nachhaltig gefährden. Insbesondere wenn der prognostizierte klimabedingte Meeresspiegelanstieg eintritt können zukünftige Sturmflutereignisse von existenzieller Bedeutung sein. Ziel der Befliegung der Insel Borkum war es daher, die bisher vorliegenden Informationen über die Ausdehnung und Beschaffenheit des Grundwasserkörpers zu erweitern und eine flächendeckende Datengrundlage für nachfolgende 3D-Modellierungen zu liefern.

### 3. Das Messgebiet

Die Insel Borkum ist die größte (ca. 31 km<sup>2</sup>) und westlichste der Ostfriesischen Inseln in der Nordsee. Sie ist nach Südwesten begrenzt durch die Wester Ems nahe der Grenze zu den Niederlanden, nach Nordosten durch die Oster Ems und nach Südosten durch die Emsmündung. Das Messgebiet Borkum hat eine planmäßige Ausdehnung von 10 km in SW–NE- und 6–10 km in NW–SE-Richtung. Der Sollabstand der NW–SE-Messprofile beträgt 250 m, derjenige der SW–NE-Kontrollprofile 500 m (**Abb. 1**). Das Messgebiet erstreckt sich von etwa 6°38' bis 6°50' westlicher Länge und 53°32' bis 53°38' nördlicher Breite.



**Abb. 1:** Messgebiet Borkum

Die Befliegung des Messgebietes Borkum mit drei geophysikalischen Verfahren (Elektromagnetik, Magnetik, Radiometrie) wurde von dem Hubschrauberteam der BGR vom 4. bis 5. März 2008 vom Flugplatz Emden aus mit 4 Messflügen und einer Gesamtflugstrecke von 1.035 km durchgeführt. Mit 36 Mess- und 11 Kontrollprofilen mit einer Gesamtlänge von 412 Profilkilometer wurde eine

Fläche von etwa 88 km<sup>2</sup> planmäßig vermessen. Die Messprofile sind durch L\*.1 und die Kontrollprofile durch T\*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L\*.2 gekennzeichnet (**Abb. 2**). Am Ende der Messflüge wurde jeweils ein etwa 5 km langer Abschnitt westlich vom Flughafen Emden („Eichstrecke“) für Kalibrierzwecke überflogen (L20\*.1). Die Überführungsprofile dorthin sowie ein Profil über etwas tieferes Meerwasser wurden auch in Messflughöhe vermessen (L10\*.1). Diese zusätzlichen Profile haben eine Gesamtlänge von 149 km. Einzelheiten zum Messgebiet und den Messflügen können der **Tab. 1** sowie der **Tab. A-1** im **Anhang I** entnommen werden.



**Abb. 2:** Fluglinienkarte für das Messgebiet Borkum

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Borkum keine hohen Ansprüche an den eingesetzten Piloten (M. Schütt) der Fa. Wiking Helikopter Service GmbH, Mariensiel, da das flache Gelände nur durch wenige Hochspannungsleitungen durchzogen, dünn besiedelt und bewaldet ist. Störungen der Messungen z. B. durch Stromleitungen, Straßen oder über Ortschaften waren zwar vorhanden, dennoch konnten die Messungen meist wie geplant durchgeführt werden. Der oft heftige und meist aus nördlichen Richtungen kommende Wind führte jedoch dazu, dass die Fluggeschwindigkeiten über Grund und somit auch die Messpunktabstände variierten.

Bei den Messprofilen nach NW bzw. SE lagen die mittleren Punktabstände bei 3,2 m bzw. 4,4 m und bei den Kontrollprofilen nach NE bzw. SW bei 3,1 m und 4,8 m.

Die Sollflughöhe des Hubschraubers beträgt entlang der Messprofile 70 m über Grund. Über Wald, bebauten Gebieten und Hochspannungsleitungen kann die niedrige Flughöhe aus Sicherheitsgründen nicht immer eingehalten werden. Daher liegt die mittlere Flughöhe der Flugsonde meist oberhalb von 30 m. Bei der Befliegung der Insel Borkum lag sie bei etwa 34 m über Grund. Während eines Messfluges, speziell vor dem ersten und nach dem letzten Profil, aber auch zwischen den Profilen, steigt der Hubschrauber mit dem Messsystem auf eine deutlich größere Höhe (>400 m), um fern von störenden Einflüssen die notwendigen Kalibrierungen des HEM-Systems durchführen zu können.

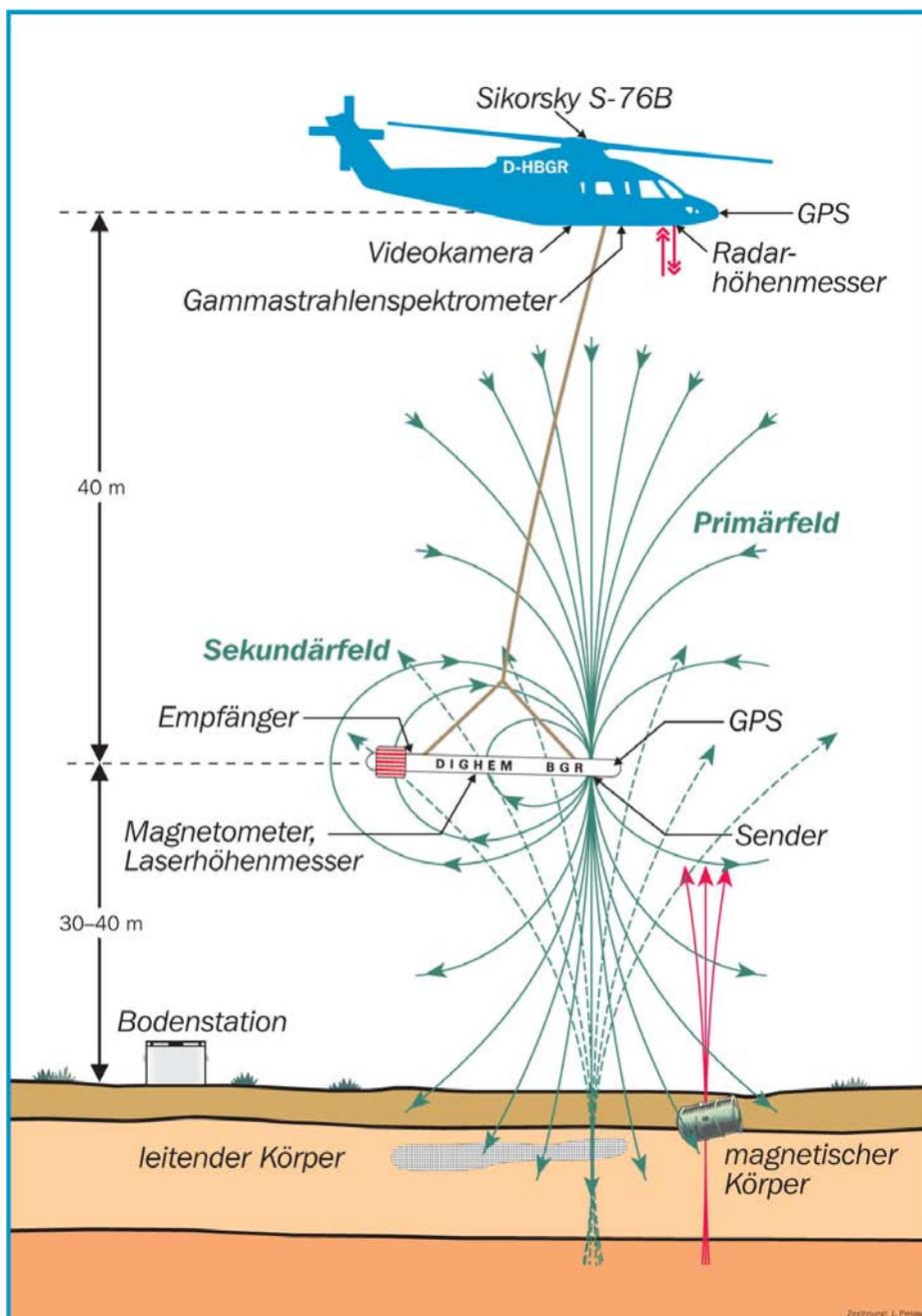
Die Bodenstation zur Aufzeichnung der magnetischen Tagesvariationen wurde auf dem Flughafengelände bei 7°13'52,2" westlicher Länge und 53°23'24,2" nördlicher Breite aufgestellt. Die Daten sind im Ordner „Bodenstation“ auf beiliegender DVD gespeichert (**Anhang III**).

**Tab. 1:** Technische Daten der Befliegung Borkum.

Messgebiet BGR-Gebietsnummer	Borkum 130
Befliegungszeitraum	04.03–05.03.2008
Größe des Messgebietes	88 km <sup>2</sup>
Gesamt-Profilkilometer (Messprofile) (Zusatzprofile)	412 km 149 km
Zahl der Messflüge	4
Bezeichnung der Messflüge	13001–13005 (13003 nicht existent)
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	34 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit	134 km/h
Zahl der Messprofile	36
Länge der Messprofile	6–10 km
Richtung der Messprofile	122° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	250 m
Zahl der Kontrollprofile	11
Länge der Kontrollprofile	8–10 km
Richtung der Kontrollprofile	32° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	500 m
Zahl der Überführungsprofile	6
Zahl der Sonderprofile „Meerwasser“	1
Zahl der Sonderprofile „Eichstrecke“	4

#### 4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR

Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR erfasst Daten für die drei Methoden Elektromagnetik, Magnetik und Radiometrie (Gammastrahlenspektrometrie, Szintillometrie). Die dafür erforderliche Messtechnik ist zusammen mit den zur Durchführung von Messflügen erforderlichen Navigations- und Positionierungssystemen, der digitalen Messwertaufzeichnung sowie den übrigen für die Durchführung der Messungen benötigten Geräten zu einem integrierten Messsystem zusammengefasst, welches sich in einer Flugsonde oder im Hubschrauber bzw. in einer Referenzstation am Boden befindet (**Abb. 3**).



**Abb. 3:** Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR

#### 4.1. Messhubschrauber

Im Jahre 1986 wurde vom Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) der derzeit eingesetzte Hubschrauber vom Typ Sikorsky S-76B (siehe **Tab. 2**) angeschafft und der BGR als Messhubschrauber zur Verfügung gestellt.

**Tab. 2:** Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR

Hubschrauber	
Typ	Sikorsky S-76B (Hersteller: Sikorsky, USA)
Baujahr	1986
Antrieb	2 Turbinen Pratt & Whitney PT6B-36A mit je 1.033 SHP (shaft horse power)
Maximales Abfluggewicht	11.700 pounds (5.363 kg)
Maximales Gewicht der Außenlast	3.300 pounds (1.500 kg)
Maximale Messflugzeit	2:45 Stunden
Kerosinverbrauch pro Stunde	350–400 l

#### 4.2. Messausrüstung

Im Messhubschrauber befinden sich das Gammastrahlenspektrometer, die Navigationsgeräte, der barometrische und der Radarhöhenmesser, die Videokamera sowie die Steuer- und Registriereinheit. Das EM-System, das Magnetometer, der Laserhöhenmesser sowie die Positionserfassung sind in einer Flugsonde eingebaut, die durch ein ca. 45 m langes Kabel mit dem Hubschrauber verbunden ist und in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit etwa 40 m unterhalb des Hubschraubers nachgeschleppt wird (**Abb. 3**). Die Länge des Kabels ist so bemessen, dass die Messungen der hochempfindlichen magnetischen und elektromagnetischen Sensoren (**Tab. 3**) durch den Hubschrauber möglichst wenig gestört werden. Die äußere Hülle der etwa 10 m langen, zigarrenförmigen Flugsonde, die einen Durchmesser von 0,5 m hat, ist aus Kevlar gefertigt, um eine möglichst hohe Biegesteifigkeit zu erhalten. Dieses Material zeichnet sich durch eine extrem hohe mechanische Festigkeit bei gleichzeitig geringer elektrischer Leitfähigkeit aus.

Die geophysikalischen Messgeräte werden zentral durch das HeliDas-System gesteuert, das auch die Datenerfassung und -speicherung sowie die Navigation während des Messfluges unterstützt. Hierzu können sowohl der Operator als auch der Navigator auf den Displays ihrer Tablett-Computer diverse Informationen, wie z. B. den Flugweg oder die jeweiligen Messkanäle, grafisch darstellen lassen.

**Tab. 3:** Geophysikalische Messsysteme

Geophysikalische Messsysteme		
Flugsonde	<b>I. Elektromagnetisches 6-Frequenz-Messsystem (HEM)</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes bis zu Tiefen von etwa 150 m
	<b>Hersteller</b>	Fugro Airborne Surveys (FAS), Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Resolve BGR, BKS36a (intern: Bird 61)
	<b>II. Cäsium-Magnetometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung des erdmagnetischen Totalfeldes
Hubschrauber	<b>Hersteller</b>	Geometrics, USA
	<b>Gerätebezeichnung</b>	G-822A
	<b>III. Gammastrahlenspektrometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
Hubschrauber	<b>Hersteller</b>	Exploranium, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Spektrometer: GR-820; Kristalldetektor: GPX-1024/256

### 4.3. Elektromagnetik

Bei dem elektromagnetischen (EM) Messverfahren werden von den Sendespulen zeitlich variierende magnetische Felder, die Primärfelder, mit diskreten Sendefrequenzen abgestrahlt. Die magnetischen Felder dringen in den Erduntergrund ein und induzieren dort, abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes, elektrische Wirbelströme. Die magnetischen Felder dieser Wirbelströme, die Sekundärfelder, induzieren ihrerseits sehr schwache Spannungen in den zugeordneten Empfängerspulen des EM-Systems (vgl. **Abb. 4**).

Bei dem hier verwendeten HEM-System wird für jede der sechs Messfrequenzen im Bereich von 386 Hz bis 133 kHz (**Tab. 4**) ein eigenes Spulensystem benutzt, das aus horizontal-koplanar bzw. vertikal-koaxial angeordneten Sende-, Empfangs, Kompensations- und Kalibrierspulen besteht.

**Tab. 4:** HEM-Systemparameter

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
386	7,938	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.823	7,931	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
5.495	9,055	vertikal-koaxial	EM_6	3. Frequenz
8.338	7,925	horizontal-koplanar	EM_2	4. Frequenz
41.430	7,912	horizontal-koplanar	EM_1	5. Frequenz
133.300	7,918	horizontal-koplanar	EM_4	6. Frequenz

Die Kompensationsspulen sind so dimensioniert und platziert, dass die durch die Primärfelder in ihnen induzierten Spannungen denen in den Empfangsspulen entsprechen. Durch die gekreuzte Hintereinanderschaltung der Spulen wird die durch das Primärfeld in der Empfangsspule induzierte Spannung nahezu kompensiert.

Mit Hilfe der Kalibrierspulen, die im Zentrum der jeweiligen Empfangsspulen liegen, werden definierte Ausschläge im Messsignal erzeugt und in der Einheit ppm angegeben. Diese relative Einheit wird benutzt, da das Sekundärfeld, das sehr viel kleiner als das Primärfeld ist, auf das Primärfeld am Ort der Empfangsspule normiert wird. Die hierzu notwendigen Umrechnungsfaktoren von der gemessenen Spannung in V in ppm wurden vom Hersteller geliefert.

Die Größe der empfangenen Sekundärfelder sowie ihre zeitliche Verzögerung gegenüber den erzeugenden Primärfeldern werden registriert. Aus diesen beiden Größen, Amplitude und Phasenverschiebung oder Real- und Imaginärteil (Inphase I und Quadrature Q), kann die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes bzw. deren Kehrwert, der spezifische Widerstand, berechnet werden, wobei die verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Eindring- oder Aussagetiefen haben. Je niedriger die Frequenz ist, umso tiefer dringen die elektromagnetischen Felder in den Untergrund ein. Die Eindringtiefe hängt aber auch vom spezifischen Widerstand im Untergrund ab: Je höher er ist, desto größer ist auch das Eindringen der Felder. Mit der niedrigsten Frequenz von 386 Hz lassen sich unter günstigen Voraussetzungen Erkundungstiefen bis zu 150 m erreichen.

Das HEM-Messsystem ist nicht nur gegenüber dem elektrisch leitenden Untergrund empfindlich, sondern auch gegenüber anthropogenen Objekten, wie z. B. Bepflanzungen, metallischen Körpern und elektrischen Installationen, welche sich aufgrund der Frequenzabhängigkeit der HEM-Amplituden insbesondere bei den niedrigen Frequenzen bemerkbar machen können. Da der Hubschrauber auch als ein solches Objekt anzusehen ist, ist das HEM-System in einer Flugsonde eingebaut und wird in genügend großem Abstand (ca. 40 m) unterhalb des Hubschraubers nachgeschleppt.

#### 4.4. Magnetik

Die Totalintensität des erdmagnetischen Feldes wird mit Hilfe eines in der Flugsonde montierten hochempfindlichen Cäsium-Magnetometers (**Tab. 3**) gemessen und in der Einheit Nanotesla (nT) angegeben. Die Funktion eines Cäsium-Magnetometers basiert auf der Messung der sogenannten Larmor-Frequenz, welche sich in einem speziellen optisch gepumpten System einstellt. Diese Frequenz ist direkt proportional zur magnetischen Feldstärke und lässt sich mit hoher Genauigkeit bestimmen. Die Auflösung der magnetischen Registrierungen beträgt 0,01 nT.

Das gemessene Magnetfeld setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen. Das magnetische Normalfeld der Erde hat seine Ursache im Erdinneren und weist eine vom Äquator zu den Polen hin zunehmende Intensität auf. In Deutschland hat es eine Stärke von etwa 48.000 nT. Es wird überlagert vom Krustefeld, dessen Quellen in Gesteinen mit Anteilen an ferromagnetischen Mineralien liegen. Diese bilden Anomalien in einer Größenordnung von wenigen bis zu einigen hundert nT. In besiedelten Gebieten führen zusätzlich anthropogene Quellen wie Gebäude, Stromleitungen oder Industrieanlagen zu Anomalien im gemessenen Magnetfeld. Schließlich unterliegt das geogene Magnetfeld auf Grund von Schwankungen im Zustand der Ionosphäre einem Tagesgang. In Deutschland liegt dieser im Bereich von etwa 10 bis 20 nT.

Während geogene Anomalien im Allgemeinen eine große räumliche Ausdehnung aufweisen, sind anthropogene Störungen des Magnetfeldes meist örtlich begrenzt und lassen sich daher sicher identifizieren. Zur Erfassung des magnetischen Tagesganges wird eine ebenfalls mit einem Cäsium-Magnetometer bestückte Basisstation betrieben (**Tab. 5**). Sie zeichnet an einem magnetisch ruhigen Ort in der Nähe des Messgebietes die tageszeitlichen Variationen auf, welche zur Korrektur der in der Flugsonde aufgenommenen magnetischen Daten verwendet werden. Zur zeitlichen Synchronisation der Messreihen wird an der Basisstation die GPS-Zeit mitregistriert.

**Tab. 5:** Basisstation

Basisstation	
<b>Magnetik-Basisstation</b>	
<b>Aufgabe</b>	Automatische Registrierung des magnetischen Totalfeldes
<b>Hersteller</b>	Basisstation: FAS, Kanada Magnetometer: Cs-Sensor H-8, SCINTREX, Kanada
<b>Gerätebezeichnung</b>	CF1 Data Logger

#### 4.5. Radiometrie

Die von natürlichen und künstlichen Radionukliden ausgehende Gammastrahlung wird mit Hilfe eines Kristalldetektors gemessen (**Tab. 3**). Der Detektor besteht aus insgesamt fünf Natrium-Jodid-Kristallen, die in einer Aluminiumbox zusammengefasst im Hubschrauber montiert sind. Jeder der Kristalle hat ein Volumen von 4 Litern. Vier der Kristalle registrieren die von unten und von den Seiten einfallende Strahlung, der fünfte Kristall dient zur Registrierung der von oben eintreffenden Strahlung. Eintretende Gammastrahlung wird durch die Kristalle absorbiert und dabei in Lichtimpulse umgewandelt. Diese werden über Photovervielfacherröhren in elektrische Impulse gewandelt, wobei die Amplitude der elektrischen Impulse proportional zur Energie der einfallenden Gammastrahlung ist.

Das Gammastrahlenspektrometer besitzt einen Spektralbereich von 0 bis 3 MeV, der in 255 Kanäle aufgeteilt ist. Jeder Impuls des Detektors wird dem entsprechenden Spektralkanal zugeordnet und gezählt. Zusätzlich wird die Intensität der Höhenstrahlung (3 bis 6 MeV) in einem separaten Kanal registriert. Für geowissenschaftliche Untersuchungen sind insbesondere die Zählraten der natürlich vorkommenden Radionuklide (bzw. deren Isotope oder Tochterprodukte) Kalium (K-40), Uran (Bi-214) und Thorium (Tl-208) von Interesse. **Tab. 6** zeigt die Zuordnung der Strahlungsquellen zu den einzelnen Energiefenstern. Der fünfte, nach oben gerichtete Kristall dient zur Messung der Gammastrahlung, die von atmosphärischem Radongas ausgeht und kann zur Korrektur dieses Einflusses auf die Zählraten von Uran und Thorium verwendet werden.

In der Registrierapparatur werden die Spektren über jeweils eine Sekunde aufsummiert und gespeichert. Zusätzlich werden die Zählraten in den interessierenden Energiebereichen (vgl. **Tab. 6**) bestimmt und gespeichert. Das Spektrometer wird laufend für jeden der Kristalle einzeln mit Hilfe der natürlichen Thoriumstrahlung intern stabilisiert: Verschiebungen des Thoriumpeaks (2,62 MeV) gegenüber dem Sollwert werden erkannt und die Verstärkung der Photovervielfacherröhre des entsprechenden Kristalls automatisch korrigiert. Auf Grund eines technischen Defektes konnten in dieser Befliegung die Daten der natürlichen Gammastrahlung nicht erfasst werden und fehlen in der weiteren Darstellung.

**Tab. 6:** Energiebereiche registrierter Strahlungsquellen

Strahlungsquelle	Energiebereich in MeV	Energie Peak in MeV	Kanäle
Gesamtstrahlung	0,41–2,81	—	34–233
Kalium (K-40)	1,37–1,57	1,46	115–131
Uran (Bi-214)	1,66–1,86	1,76	139–155
Thorium (Tl-208)	2,41–2,81	2,62	202–233
Höhenstrahlung	3,0–6,0	—	255

#### 4.6. Navigations- und Positionierungssystem

Aufgabe des Navigationssystems (**Tab. 7**) ist es, dem Piloten alle zur Durchführung eines Messfluges notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen. Hierzu werden zunächst mit dem Programm LiNav von AG-NAV Inc. die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte sämtlicher Mess- bzw. Kontrollprofile aus den Messgebietsgrenzen, der Profilrichtung und dem Abstand der Messprofile berechnet. Diese werden über CF-Card oder USB-Stick in das HeliDas-System importiert und auf dem Display des Tablett-Computers dargestellt, wobei das jeweils aktuelle Messprofil grafisch hervorgehoben wird.

Über eine separate Anzeige erhält der Pilot alle erforderlichen Informationen, um dieses Messprofil so genau wie möglich abzufliegen. Die wichtigste Information ist dabei die jeweilige seitliche Abweichung von dieser Linie, die sowohl digital als Meterangabe als auch linear in Form eines Balkendiagramms erscheint. Die Positionsangaben erhält der Navigationsrechner von einem GPS-Navigationsempfänger, dessen Antenne außen am Hubschrauber angebracht ist. Der Fehler des Navigationssystems beträgt weniger als 1–2 m.

**Tab. 7:** Navigations- und Positionierungssysteme

Systeme zur Navigation und Positionierung		
<b>Hubschrauber</b>	<b>GPS-Navigationssystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Erfassung (on-line) und Anzeige in grafischer und digitaler Form der für den Piloten zur Durchführung von Messflügen notwendigen GPS-Navigationsparameter.
	<b>Hersteller</b>	Navigationscomputer und Anzeige: FAS, Kanada GPS-Empfänger: NovAtel, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Navigationscomputer: HeliDas GPS-Empfänger: NovAtel OEMV-2-L1/L2 GPS-Antenne: NovAtel L1/L2 ANT-532-e
<b>Flugsonde</b>	<b>GPS-Positionierungssystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der geografischen Position und Höhe (über NN) der Flugsonde
	<b>Hersteller</b>	Positionserfassung und Anzeige: FAS, Kanada GPS-Empfänger: CSI Wireless, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Positionserfassung: HeliDas GPS-Empfänger: DGPS MAX

Aufgabe des Positionierungssystems (**Tab. 7**) ist es, zu jeder geophysikalischen Messung die Koordinaten zu liefern. Dafür wird ein zweiter GPS-Navigationsempfänger verwendet, dessen Antenne sich innerhalb der Flugsonde befindet, und der damit die Position der Messsensoren bestimmt. Auch hier liegt der Fehler der Koordinaten in der Regel unterhalb von 1–2 m.

Die Flughöhe des Hubschraubers (**Tab. 8**) über Grund bzw. über Hindernissen (z. B. Wäldern und Gebäuden) wird im Normalfalls zur Auswertung der radiometrischen Daten benötigt. Sie wird über einen im Hubschrauber eingebauten Radarhöhenmesser mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  m bestimmt. Zusätzlich wird mit Hilfe eines GPS-Empfängers die Höhe des Hubschraubers über NN bestimmt, die jedoch ohne Verwendung einer Referenzstation am Boden eine Fehler von einigen Metern aufweisen kann.

Die genaue Höhe der Flugsonde (**Tab. 8**) über Grund wird zur Auswertung der elektromagnetischen Daten und zur Erstellung eines digitalen Geländemodells benötigt. Durch einen in die Flugsonde eingebauten Laserhöhenmesser wird diese Höhe auf  $\pm 0,2$  m genau bestimmt. Ein weiterer Vorteil des Laserhöhenmessers ist neben seiner Genauigkeit der fokussierte Durchmesser des Laserstrahls, der es ermöglicht, über lichten Wäldern häufig die Entfernung bis zum Boden zu erfassen und nicht nur, wie beim Radarhöhenmesser, den Abstand bis zu den Baumkronen.

Aus der absoluten Höhe der Flugsonde, abgeleitet aus GPS-Z-Messungen, minus der Laserhöhe wird die topografische Höhe berechnet, woraus das digitale Geländemodell bestimmt wird. Auch hier kann der Fehler bei einigen Metern liegen, wenn keine weitere Referenz hinzugezogen wird.

**Tab. 8:** Höhenmesser

Höhenmesser		
Hubschrauber	<b>Radarhöhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über Grund
	<b>Hersteller</b>	Sperry, USA
	<b>Gerätebezeichnung</b>	AA-200
	<b>Barometrischer Höhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über NN
	<b>Hersteller</b>	Rosemount, USA
Flugsonde	<b>Gerätebezeichnung</b>	1241A5B
	<b>Laserhöhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Präzise Bestimmung der Höhe der Flugsonde über Grund
	<b>Hersteller</b>	Riegl, Österreich
	<b>Gerätebezeichnung</b>	LD90-3800VHS

#### 4.7. Datenerfassung und -aufzeichnung

Die wichtigsten Informationen zur Flugführung und Datenaufzeichnung werden auf zwei Tablett-Computer grafisch dargestellt, um während des Fluges eine ständige Flug- (Navigator) und Datenkontrolle (Operator) zu ermöglichen. Gleichzeitig werden sämtliche Positions- und Messdaten wäh-

rend eines Messfluges digital auf einer CF-Card gespeichert (**Tab. 9**). Unmittelbar nach Beendigung eines Fluges werden die gespeicherten Daten auf Laptops überspielt, dort überprüft und weiterverarbeitet. Diese digitalen Aufzeichnungen dienen der Kontrolle der Messungen und liefern erste Hinweise auf interessante geophysikalische Ergebnisse, aber auch über evtl. technische Mängel am Messsystem.

**Tab. 9:** Datenerfassung und -aufzeichnung

Datenerfassung / Datenaufzeichnung		
<b>Hubschrauber</b>	<b>Datenerfassungs- und Datenaufzeichnungssystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Digitalisierung analoger Signale; Zwischenspeicherung digitaler Daten; Zusammenstellung ausgewählter Daten und Speicherung der Positions- und Messdaten auf CF-Card
	<b>Hersteller</b>	FAS, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	HeliDas

#### 4.8. Videosystem

Die im Boden des Hubschraubers fest installierte Videokamera (**Tab. 10**) ermöglicht in Verbindung mit den im Cockpit und in der Hubschrauberkabine eingebauten Videomonitoren die Kontrolle der Flugsonde bei Start und Landung sowie während des Fluges.

Die digitale Videoaufzeichnung des Flugweges, die durch Einblendung der GPS-Zeit, der Koordinaten und des Recordzählers in das Videobild direkt mit der digitalen Messdatenaufzeichnung korreliert werden kann, wird für das Auffinden von oberflächennahen Anomalien aus der Luft oder im Falle von Störungen in den Messdaten für deren Ursachenfindung mit herangezogen.

**Tab. 10:** Videosystem

Videosystem		
<b>Hubschrauber</b>	<b>Datenerfassungs- und Datenaufzeichnungssystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Aufzeichnung des Flugweges sowie Kontrolle der Messsonde bei Start und Landung und während des Messfluges über einen Monitor
	<b>Hersteller</b>	Farbkamera: Sony, Japan Videorekorder: AXI, Schweden
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Farbkamera: DC372P Videosever: AXIS 241S

#### 4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber

Die DC-Bordspannung (28 V) des Hubschraubers wird über eine Pufferbatterie (24 Ah) geglättet und anschließend über Sicherungen auf die einzelnen Geräte des Messsystems verteilt (**Tab. 11**). Die Steuerungs- und Aufzeichnungsgeräte des aerogeophysikalischen Messsystems befinden sich in einem 19-Zoll Geräteschrank. Der Geräteschrank ist über Schwingungsdämpfer mit einer Holzplatte verbunden, die fest mit dem Boden des Hubschraubers verschraubt ist.

**Tab. 11:** Sonstige Ausrüstung

Sonstige Ausrüstung		
<b>Hubschrauber</b>	<b>Zentrale Spannungsversorgung</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Pufferung der DC-Bordspannung des Hubschraubers
	<b>Hersteller</b>	Sikorsky, USA
	<b>Geräteschrank</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Aufnahme von Messgeräten des aerogeophysikalischen Messsystems
<b>Hersteller</b>	Sikorsky, USA	

## 5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten

Die Ziele der Datenverarbeitung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Kontrolle der Messdaten;
- Umrechnung der Rohdaten in physikalische Parameter;
- Darstellung der Ergebnisse in Form von Profildaten und Karten.

### 5.1. Prozessabläufe

Die aerogeophysikalischen Daten werden bereits während des Feldbetriebes auf Plausibilität sowie technische und formale Korrektheit überprüft. Hierzu werden die Messdaten direkt nach Beendigung eines Messfluges von der CF-Card auf die Laptops übertragen, mittels Oasis montaj von Geosoft visualisiert und erste Datenverarbeitungsschritte automatisch durchgeführt.

Nach Abschluss der Befliegung erfolgt zunächst eine Prä-Prozessierung, das nur wenige grundlegende Bearbeitungsschritte enthält und die Rohdaten grafisch darstellt.

Die finale Datenbearbeitung beginnt mit der Bearbeitung der Positionsdaten:

- Transformation der geografischen Koordinaten in das Zielkoordinatensystem;
- Korrekturen der gemessenen Höhen des Hubschraubers und der Flugsonde.

Die folgenden Datenverarbeitungsschritte sind für alle Methoden gültig:

- Entfernung von offensichtlichen Ausreißern (Spikes);
- Digitale Filterung um hochfrequentes Rauschen zu unterdrücken;
- Umrechnung der Messdaten in die jeweiligen darzustellenden Parameter;
- Festlegung von Profilabgrenzungen;
- Zusammenführung der Profildaten aller Messflüge zu Gesamtgebietsdateien;
- Korrektur von Niveaufehlern in den Daten;
- Herstellung von thematischen Karten und Schnitten.

Methodenspezifisch sind vor allem die Umrechnungen der jeweiligen Messdaten in die gewünschten geophysikalischen Parameter.

## 5.2. Positionsdaten

### 5.2.1. Koordinaten

Die im Fluge registrierten Koordinaten, die die Positionen des Hubschraubers und der Flugsonde angeben, beziehen sich auf das WGS 84-System. Diese geografischen Koordinaten werden mittels Oasis montaj für die Flugsondenposition in ein lokales, kartesisches Koordinatensystem transformiert, wobei auch fehlende Koordinatenwerte durch lineare Interpolation ergänzt werden.

Alle Ergebnisse für das Messgebiet Borkum sind auf Gauß-Krüger-Koordinaten (Germany Zone 3, DHDN, Bessel 1841 Ellipsoid) bezogen.

### 5.2.2. Radarhöhen

Die Radarhöhenwerte, die vom Hubschrauber aus gemessen werden, liegen zunächst in der Einheit „feet“ vor und müssen in Meter über Gelände (m üG) umgerechnet werden. Zum Vergleich mit der Laserhöhen wird die Radarhöhe der Flugsonde benötigt. Hierzu wird die effektive Kabellänge, d. h. der mittlere Abstand zwischen Hubschrauber und Flugsonde, abgezogen. Um zu gewährleisten, dass Radar- und Laserhöhen im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmen, wird normalerweise die effektive Kabellänge experimentell bestimmt und zur Umrechnung der gemessenen Radarhöhe ( $h_{r_{\text{mess}}}$ ) in die Radarhöhe der Flugsonde ( $h_r$ ) herangezogen:

$$h_r \text{ [m]} = h_{r_{\text{mess}}} \text{ [feet]} \cdot 0,3048 \text{ [m/feet]} \cdot 1,04 - 44 \text{ [m]},$$

wobei fehlende Radarhöhen durch Laserhöhen ersetzt werden.

Bei der Befliegung Borkum traten Probleme bei der Registrierung der Radarhöhen auf. Während bei den Flügen 13001 und 13002 eine Korrektur durch Vergleich (lineare Regression) mit den Laserhöhen möglich war:

$$h_r \text{ [m]} = h_{r_{\text{mess}}} \text{ [feet]} \cdot 0,3048 \text{ [m/feet]} \cdot a - b \text{ [m]}$$

mit  $a = 1,000$  bzw.  $1,097$  und  $b = 73,2$  bzw.  $75,4$ , mussten die Werte für Radarhöhen der Flüge 13004 und 13005 komplett durch die Laserhöhen ersetzt werden.

### 5.2.3. Laserhöhen

Die mit einem Laserhöhenmesser gemessenen Höhen der Flugsonde über Gelände können – wie auch die Radarhöhe – Fehler (Ausreißer, Lücken) enthalten, die linear interpoliert werden. Ferner können zu große Werte (z. B. Neigung der Flugsonde oder in Kurven) oder zu kleine Werte (Bewuchs, Bebauung) auftreten. Die zu großen, durch die Neigung (durchschnittlich etwa  $10^\circ$ ) verursachten, Laserhöhen sind leicht durch Anwendung der Kosinus-Funktion zu korrigieren. Laserhöhenfehler in Kurven können aufgrund der zu großen Abweichung von der zugehörigen Radarhöhe erkannt und eliminiert werden. Die zu kleinen Werte werden standardmäßig durch eine Kombination von Filtern korrigiert.

Hierzu wird zunächst eine reduzierten Laserhöhe, deren Mittelwert bei Null liegt, berechnet, indem eine Basislinie der Laserhöhe bestimmt (Tiefpass-Abschneideperiode = 5 s, d. h. 50 Werte) und von

dieser abgezogen wird. Danach erfolgt die Berechnung der Standardabweichungen und der Maximalwerte der reduzierten Laserhöhe in vorgegebenen Intervallen mit Fensterbreiten von jeweils 7 bzw. 21 Messwerten, wobei einzelne Ausreißer der Standardabweichung durch Anwendung eines schmalen (3 Werte) nicht-linearen Filters eliminiert werden. Anschließend werden die Laserhöhenwerte durch die Maximalwerte ersetzt, falls die Abweichung beider Werte nicht zu groß (2 m) ist und die Standardabweichung über einem vorzugebenden Schwellwert (0,4) liegt. Zur Vermeidung von Sprüngen der gegenüber den reduzierten Laserhöhen stets größeren Maximalwerte werden die Maximalwerte auf das Niveau der angrenzenden reduzierten Laserhöhen bezogen. Abschließend erfolgt eine leichte Glättung (Tiefpass-Abschneideperiode = 3 s, d. h. 30 Werte) der korrigierten reduzierten Laserhöhe und die Addition der Basislinie.

Die automatische Korrektur der Laserhöhe funktioniert für Waldbereiche gut, wenn der Baumbestand nicht zu dicht ist. Bei dichtem Wald dringt der Laserstrahl zu selten bis zum Erdboden vor und die automatisch korrigierten Werte müssen per Hand nachkorrigiert werden.

In hügeligen Messgebieten wirken sich die Schwankungen des Messsystems besonders deutlich aus, da der Laserstrahl auch bei horizontaler Lage der Flugsonde nicht senkrecht auf den Erdboden auftrifft. Folglich können bereits bei geringen Neigungen der Flugsonde erheblich größere Fehler bei der Abstandsmessung zwischen Flugsonde und Erdboden auftreten als in flachem Gelände.

#### **5.2.4. Topografische Höhen**

Die topografische Höhe des Geländes (topo) wird aus der Differenz der GPS-Höhe der Flugsonde ( $h_{GPS}$ ) und der korrigierten Laserhöhe ( $h_{l_{korr}}$ ) berechnet

$$\text{topo [m NN]} = h_{GPS} \text{ [m NN]} - h_{l_{korr}} \text{ [m]}.$$

Sie wird benötigt, um die Geländehöhen (digitale Geländemodelle) in Kartenform oder auch dreidimensional darstellen zu können. Ferner eignen sich die topografische Höhen besser für die manuelle Nachkorrektur der Laserhöhe als die Laserhöhe bzw. die reduzierte Laserhöhe, da z. B. Baumbestände oder Täler und Bergrücken klarer zu erkennen sind. Die Nachkorrektur besteht aus einer Elimination von nicht plausiblen Werten mit nachfolgender linearer Interpolation und einer Neuberechnung der Laserhöhenwerte.

Wie bei den geophysikalischen Daten ist auch bei den topografischen Daten eine Anpassung der Profildaten untereinander notwendig. Die Ursache hierfür ist die Ungenauigkeit der GPS-Höhendaten. Zunächst wurden die topografischen Höhen auf Basis der Messwerte über dem Testprofil flugweise korrigiert. Danach erfolgte ähnlich zu **Abschnitt 5.3.6** ein Microlevelling, das sich aber auf die Messprofile über der Insel beschränkte, da die Höhenwerte über dem Meer bzw. Watt aufgrund der Gezeiten in Regel nicht bei der mittleren Meeresspiegelhöhe lagen. Die Werte außerhalb der Insel wurden dann einheitlich auf 0 m NN gesetzt.

Aus den korrigierten Werten für die Gelände- und Laserhöhen wird auch die Sensorhöhe in m NN neu berechnet und mit den gemessenen GPS-Höhen verglichen. Der langwellige Anteil der Differenz dieser Werte ist als Fehler der GPS-Höhe anzusehen und wird zur Korrektur verwendet. Der kurzwellige Anteil ist dagegen auf die Schwankungen des Messsystems zurückzuführen.

Da diese Fehler über der Insel, insbesondere im Dünenbereich, nicht von korrekten Messungen zu unterscheiden sind, wurden sie nicht korrigiert. Daher weichen über dem Meer die Differenzen aus korrigierter GPS- und Laserhöhe der Flugsonde von den korrigierten (und einheitlich auf 0 gesetzten) topografischen Höhen ab.

Bei der Inversion der HEM-Daten wurde der Abstand der Flugsonde von der Modelloberkante als Ausgabeparameter behandelt, d.h. neu berechnet, sodass die Werte für die topografische und die Laserhöhe in dem Inversionsdatensatz von denen in den anderen Datensätzen abweichen.

Aufgrund der Filterung bei der Laserhöhenkorrektur und des Linienabstandes von 250 bzw. 500 m konnten nicht alle topografischen Details erfasst werden. Die aus den Flugmessungen abgeleiteten Geländehöhen geben daher – insbesondere bei der Kartenproduktion - die wahren Geländehöhen nur in geglätteter Form wider.

### **5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik**

Bei der Registrierung der HEM-Daten werden bereits interne Kalibrierwerte berücksichtigt, mit denen die in den Empfängern gemessenen Spannungen in die Werte des relativen sekundären magnetischen Feldes I [ppm] und Q [ppm] transformiert werden. Diese Werte unterliegen jedoch einer im Wesentlichen temperaturbedingten Drift, die korrigiert werden muss, bevor eine Weiterverarbeitung der HEM-Daten stattfinden kann. Ferner sind korrigierte Kalibrierfaktoren anzubringen.

Neben dem eigentlichen Nutzsignal, das von elektrisch leitfähigem Material an und unter der Erdoberfläche herrührt, treten auch Störsignale in den Messdaten auf, die durch z. B. Bewegung des Systems oder durch externe Felder verursacht werden und im Zuge der Datenverarbeitung eliminiert oder geglättet werden müssen.

Da die HEM-Daten stark und zudem nicht-linear von der Messhöhe abhängen, ist eine Transformation dieser Sekundärfeldwerte in scheinbare spezifische Widerstände und scheinbare Tiefen bzw. Schwerpunktstiefen, die auf dem Modell eines homogenen Halbraums beruhen, sehr hilfreich für die Beurteilung der Qualität der HEM-Daten. Ferner ermöglichen diese so genannten Halbraumparameter einen schnellen Überblick über die lateralen Leitfähigkeitsverteilungen und die maximal zu erwartenden Erkundungstiefen. Für eine genauere Bestimmung der vertikalen Leitfähigkeitsverteilungen sind Inversionen in Schichtmodelle notwendig.

#### **5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems**

Das HEM-System wurde von dem Hersteller Fugro Airborne Surveys mit Hilfe von externen Spulen auf schlecht leitendem Untergrund in Kanada (Mountsborg Conservation Area südwestlich von Toronto) kalibriert. Nach der Optimierung der Phaseneinstellungen mit Hilfe eines Ferrit-Stabes lassen sich mit diesen externen Kalibrierspulen Eichsignale bekannter Größe in den Empfängern erzeugen. Diese Kalibrierwerte werden benutzt, um die Eichausschläge, die durch die internen Kalibrierspulen erzeugt werden, in ppm anzugeben. Da Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht auszuschließen sind, wurden die Kalibrierfaktoren mit einem Flug über die Nordsee vor Helgoland im Juni 2007 überprüft. Dort gibt es eine etwa 50 m tiefe Rinne, die eine ausreichend große Wassertiefe garantiert. Unter der Annahme homogener Leitfähigkeit des Meerwassers wurden die Halbraumwider-

stände des Meerwassers und die Abstände der Wasseroberfläche zum Messsystem aus den HEM-Daten zu jeder Messfrequenz bestimmt und mit den Sollwerten, dem spezifischen Widerstand von Meerwasser  $\rho_w = 0,21 \Omega\text{m}$  (bei einer Wassertemperatur von etwa  $15^\circ\text{C}$ ) und der Laserhöhe, verglichen.

Während der Befliegung der Insel Borkum bestand darüber hinaus die Möglichkeit, bei jedem Messflug auch über Meerwasser zu fliegen und somit aktuelle Vergleichsmessungen durchzuführen. Aufgrund der geringen Wassertiefe konnten aber Korrekturfaktoren nur für die mittleren und höheren Messfrequenzen bestimmt werden, da die Eindringtiefen bei den niedrigen Frequenzen oft zu groß und eine Beeinflussung durch den Meeresboden gegeben war. Aus den Abweichungen wurden die mittleren Korrekturen für die Kalibrierwerte bestimmt (**Tab. 12**). Die Korrekturwerte für die einzelnen Messflüge können der **Tab. A-2** im **Anhang II** entnommen werden.

**Tab. 12:** Kalibrierwerte für das HEM-System

Frequenz in Hz	Kalibrierwerte Fugro		Kalibrierwerte BGR	
	I [ppm]	Q [ppm]	I [ppm]	Q [ppm]
386	-205,3	-205,3	-215,9	-209,3
1.823	-175,4	-174,7	-174,8	-174,5
5.495	76,6	76,8	88,1	94,8
8.338	-144,4	-144,2	-193,0	-186,5
41.430	-667,3	-665,2	-660,1	-667,1
133.300	-1404,2	-1406,4	-1181,7	-1360,7

Zu Beginn eines Messfluges werden in großer Flughöhe die Eichausschläge der internen Kalibrierespulen überprüft und automatisch nachjustiert. Temperaturänderungen während des Fluges haben Einfluss auf die Messelektronik. Daher werden die internen Kalibrierespulen mehrmals während eines Messfluges eingeschaltet, um Phasenlagen und Verstärkungen der Eichausschläge für alle Frequenzen zu kontrollieren. Diese in großer Flughöhe mehrmals aufgezeichneten Eichsignale werden automatisch bei der Datenverarbeitung in den Messdaten erkannt. Aus dem Vergleich der Amplituden und Phasen der Messdaten mit den bekannten Werten der Eichsignale erhält man für jede Messfrequenz kleine Korrekturen, die – über den gesamten Flug stark geglättet – an die Rohdaten angebracht werden.

### 5.3.2. Nullniveaubestimmung

Die Sekundärfelddaten können noch Primärfeldanteile enthalten, die nicht vollständig durch die verwendeten Kompensationsspulen erfasst worden sind. Ferner kann sich dieser Anteil durch temperaturbedingte Drift während des Fluges ändern. Daher ist es notwendig, dieses so genannte Nullniveau mehrmals während eines Fluges zu erfassen. Dies geschieht in der Regel in Flughöhen  $>350$  m, da in diesen Höhen das Sekundärfeld weitgehend abgeklungen ist. In den Bereichen mit großer Flughöhe und möglichst ruhigem Messsignalverlauf werden sogenannte Stützstellen gesetzt, an de-

nen Messwerte erfasst werden, die das Nullniveau repräsentieren. Die Interpolationsgeraden zwischen jeweils benachbarten Stützstellen liefern die Bezugsniveaus, von denen aus die Messamplituden der Sekundärfelder zu bestimmen sind. Die Nullniveaubestimmung wird für jeden Messkanal (I und Q für sechs Frequenzen) durchgeführt.

Mit der oben beschriebenen Vorgehensweise lassen sich die langfristigen, quasi-linearen Driften in den Nullniveaus beseitigen. Kurzfristigere Schwankungen des Nullniveaus, die besonders in der höchsten Messfrequenz und beim koaxialen Spulensystem zu beobachten sind, können damit nicht vollständig erfasst werden. Daher müssen zusätzliche Stützstellen – auch auf dem Profil – bestimmt werden, an denen die Sekundärfelder zwar klein (z. B. beim Überfliegen von Hindernissen wie Wäldern und Hochspannungsleitungen), aber nicht vernachlässigbar sind. An diesen Stellen werden die auf Basis der zu erwartenden Halbraumparametern berechneten Sekundärfelder als Bezugsniveau herangezogen (Siemon, 2009).

Hiermit können nur Fehler der automatischen Nullniveaufassung sowie einige deutliche Nullniveaufehler beseitigt werden. Insbesondere der Einfluss von lokalen und höhenbedingten Temperaturschwankungen resultiert in Niveauunterschieden der Messgrößen zwischen den einzelnen Linien. Dies stellt sich in den Karten als Streifenmuster dar. Um diesen Effekt zu beseitigen, wird eine statistische Niveaueinstellung durchgeführt (siehe **Abschnitt 5.3.6**), die auf aus den relativen Sekundärfeldwerten abgeleiteten Halbraumparametern beruht (siehe **Abschnitt 5.3.4**).

### 5.3.3. Datenkorrektur

Störungen, die durch externe EM-Signale hervorgerufen werden (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen, Sferics, Ortschaften, Bahnlinien), werden durch geeignete Filterung bzw. Elimination unterdrückt. Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen elektrischen Installationen beruhen, werden vor dem Microlevelling manuell aus den Daten entfernt (vgl. **Abschnitt 5.3.5**). Unterschreitet ein Amplitudenwert den relativen Standardfehler (rel. STF = STF/Mittel) der Messamplituden (I und Q) in einem Intervall um diesen Messwert (**Tab. 13**), so wird dieser Wert eliminiert und später auf Basis der in der Fläche interpolierten Halbraumparameter neu berechnet (vgl. **Abschnitt 5.3.7**). Zur Unterdrückung von Ausreißern werden nicht-lineare (NL) Filter benutzt und zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die HEM-Daten anschließend mit symmetrischen Tiefpass-Filtern mit Abschneideperioden  $T_{TP}$  geglättet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität sind unterschiedliche Filterparameter für die Daten der jeweiligen Frequenzen erforderlich (**Tab. 13**).

**Tab. 13:** Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung

Frequenz [Hz]	Mittel / STF [Werte]	Schwellwert für rel. STF	NL-Filter Werte/Toleranz	Tiefpass-Filter $T_{TP}$ [Werte]
386	75 / 25	0,15	20 / 3,0	40
1.823	75 / 25	0,10	20 / 2,0	30
5.495	75 / 15	0,10	10 / 2,0	40
8.340	50 / 25	0,05	15 / 2,0	30
41.430	75 / 15	0,05	5 / 2,0	30
133.300	75 / 15	0,05	10 / 2,0	50

#### 5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter

Zur Kontrolle und Darstellung der HEM-Ergebnisse werden die kalibrierten Sekundärfelder I und Q (in ppm) für jede Frequenz in die Parameter eines homogenen Halbraums,

- scheinbarer spezifischer Widerstand (Halbraumwiderstand)  $\rho_a$  [ $\Omega\text{m}$ ] und
- scheinbarer Abstand  $D_a$  [m] des Sensors von der Oberkante des leitenden Halbraums,

transformiert (Siemon, 2001).

Hierzu wurden reduzierten Amplituden  $A'$  und Komponentenverhältnissen  $\varepsilon$

$$A' = (h/r)^3 A \quad \text{mit} \quad A = (I^2 + Q^2)^{1/2} \quad \text{und} \quad \varepsilon = Q/I$$

für beliebige Halbraummodelle als Funktion von  $\delta = h/p$  für die Höhen h und die Skintiefen

$$p = 503,3 (\rho_a/f)^{1/2}$$

berechnet. Aus den resultierenden Funktionen  $A'(\delta)$  und  $\delta(\varepsilon)$ , an die Polynome angepasst wurden, können die Halbraumparameter für die Messwerte I und Q abgeleitet werden:

$$D_a = r (A'(\delta(\varepsilon)/A))^{1/3} \quad \text{und} \quad \rho_a = 0,4 \pi^2 f (D_a/\delta(\varepsilon))^2.$$

Die berechnete Höhe  $D_a$  (scheinbarer Abstand des HEM-Systems von der Halbraumoberkante) kann von der gemessenen HEM-Sensorhöhe h (in m über Grund) abweichen. Der Abstand zwischen der Halbraumoberfläche und der aus den Höhenmessungen berechneten Erdoberfläche wird als scheinbare Tiefe

$$d_a = D_a - h$$

definiert. Falls  $d_a$  positiv ist, wird über dem Halbraum eine „schlecht leitende“, bei negativem  $d_a$  eine „gut leitende“ Deckschicht angenommen.

Neben dem scheinbaren spezifischen Widerstand  $\rho_a$  und dem scheinbaren Abstand  $D_a$  wird ebenfalls für alle Frequenzen der Parameter Schwerpunkstiefe

$$z^* = d_a + p/2$$

bestimmt (Siemon, 2001). Die Schwerpunkstiefe ist ein Maß für das mittlere Eindringen der induzierten Ströme in den leitenden Erduntergrund und ermöglicht eine Tiefenangabe für den scheinbaren spezifischen Widerstand, die  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven als erste Approximation der vertikalen Widerstandsverteilung.

Abweichend von diesem bei Siemon (2001) beschriebenen Verfahren wurde hier eine genauere Ausbreitung der elektromagnetischen Felder berücksichtigt und für jede Messfrequenz eigene Polynomkoeffizienten für die Funktionen  $A'(\delta)$  und  $\delta(\epsilon)$  bestimmt. Es ergaben sich im Allgemeinen nur geringfügige Änderungen, vor allem bei den beiden höchsten Frequenzen. Über sehr gut leitenden Untergrund (Salzwasser) sind die Abweichungen insbesondere für die Q-Komponente der sekundären Magnetfelder jedoch erheblich, sodass die Neuberechnung der Polynomkoeffizienten notwendig war.

### **5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten**

Die Sekundärfelder enthalten in dicht besiedelten Gebieten neben dem geogenen Anteil oft auch anthropogene Anteile, die von Bebauungen und elektrischen Installationen wie z. B. Elektrokabel, Metallzäunen und Eisenbahnschienen herrühren können. Im Allgemeinen sind diese Einflüsse auf die HEM-Daten gering und können mit der Standarddatenverarbeitung weitgehend eliminiert werden. In einigen Fällen, wie beispielsweise bei Ortschaften oder großen Bauwerken mit einem hohen Metallanteil, ist der anthropogene Anteil in den HEM-Daten nicht mehr vernachlässigbar. In der Nähe von Hochspannungsleitungen, elektrifizierten Eisenbahnlinien oder Ortschaften können außerdem externe elektromagnetische Felder vorkommen, die die HEM-Messungen empfindlich stören können. Dies ist insbesondere bei den niedrigen Messfrequenzen zu beobachten, da dort der geogene Anteil des Sekundärfeldes deutlich kleiner ist als bei den höheren Messfrequenzen, sodass der anthropogene Anteil, der oft nur eine geringe Frequenzabhängigkeit aufweist, überwiegen kann.

Der anthropogene Einfluss wirkt sich durch eine Verringerung des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunkstiefe aus. In den Karten ist daher oft eine Korrelation von niedrigen Halbraumwiderständen bzw. geringeren Schwerpunkstiefen mit Ortschaften oder Straßen zu beobachten, die vor allem in den Karten der niedrigen Frequenzen auftreten.

Die Erkennung von anthropogen beeinflussten HEM-Daten ist durch deren typische Form oder durch Korrelation mit den Magnetikdaten möglich. Die Identifizierung kann durch einen Vergleich mit topografischen Karten, Luftbilder, einer Videofilmauswertung oder einer Ortsbegehung erfolgen. Eine manuelle Nachkorrektur der HEM-Daten erfolgte hier nicht.

### **5.3.6. Statistische Niveauanpassung**

Im Messgebiet Borkum war die herkömmliche Niveauanpassung (nach **Abschnitt 5.3.2**) nicht ausreichend, da aufgrund der Überfliegung von Ortschaften, Hochspannungsleitungen und Wäldern barometrische Höhenänderungen und folglich auch spürbare Temperaturschwankungen auf das Messsystem und somit auf das Nullniveau einwirkten. Die Nivellierung der logarithmierten Halbraumwiderstände und der Differenzen der scheinbaren Tiefen wurde parallel zu den Fluglinien (Microlevelling) mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft vorgenommen. Aus den stark geglä-

teten Differenzen der aus diesen nivellierten Halbraumparametern berechneten HEM-Daten (I und Q) und den originären HEM-Daten wurden anschließend die variablen Korrekturwerte für jedes Mess- und Kontrollprofil abgeleitet (Siemon, 2009).

### 5.3.7. Dateninterpolation und -glättung

Die Lücken in den HEM-Daten, die durch die Eliminierung von Daten, deren relativen Rauschniveaus unterhalb eines Schwellwertes (0,02) lagen, bzw. durch die Berücksichtigung der anthropogenen Effekte entstanden sind, wurden durch flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter mit nachfolgender Neuberechnung der relativen Sekundärfelder geschlossen. Die relativen Rauschniveaus wurden jeweils aus 100 benachbarten Werten bestimmt und auf die (Modell-)Amplituden normiert. Abschließend wurden die korrigierten Daten analog zu Abschnitt 4.3.3 gefiltert, aber mit leicht modifizierten Filterparametern (NL-Filter: 10 Werte mit Toleranz 3,0; TP-Filter mit 20 Werten). Somit liegen die finalen Daten, die in die Inversion (vgl. **Abschnitt 5.3.8**) eingehen, korrigierte (nivellierte, interpolierte und geglättete) Messwerte an jedem Messpunkt und für jede Messfrequenz vor.

In den Karten der scheinbaren spezifischen Widerstände und der Schwerpunktstiefen (vgl. **Abschnitt 5.3.9**) sind alle interpolierten Datenpunkte mit einem kleinen weißen Punkt markiert.

### 5.3.8. 1D-Inversion der HEM-Daten

Die prozessierten HEM-Daten zu allen Messfrequenzen werden in die Parameter eines geschichteten Halbraums, spezifischer Widerstand und Mächtigkeit, invertiert. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig. Dieses Startmodell wird automatisch aus den  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet. Standardmäßig wird das Startmodell aus ebenso vielen Schichten aufgebaut wie Messfrequenzen vorhanden sind, wobei die Schichtwiderstände auf die scheinbaren spezifischen Widerstände und die Schichtgrenzen auf das logarithmische Mittel zweier benachbarter Schwerpunktstiefen gesetzt werden. Alternativ kann das Startmodell auch eine frequenzunabhängige Anzahl von Schichten besitzen. Hierzu wird die interpolierte Sondierungskurve in mit der Tiefe zunehmenden Schichtmächtigkeiten unterteilt und die zugehörigen spezifischen Widerstände in der jeweiligen Schichtmitte aus der Sondierungskurve abgegriffen (Siemon, 2006). Wahlweise kann bei beiden Verfahren eine schlecht leitende Deckschicht hinzugefügt werden, deren Mächtigkeit sich aus der scheinbaren Tiefe  $d_a$  der höchsten Messfrequenz und ggf. zusätzlich einer vorzugebenden Luftschichtmächtigkeit (z. B. 5 m) ergibt, mindestens aber 1 m beträgt. Im Inversionsprozess wird das Startmodell solange iterativ verbessert, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt ist. Dies ist erreicht, wenn die differenzielle Verbesserung der Anpassung der Modelldaten an die Messdaten weniger als z. B. 5% beträgt.

Für die Inversion der HEM-Daten im Messgebiet Borkum wurden nivellierte Daten (vgl. **Abschnitt 5.3.7**) und ein Startmodell mit vier gleich mächtigen Schichten zuzüglich einer schlecht leitenden Deckschicht und einem gut leitenden Halbraum verwendet. Die Deckschicht (Luft) ermöglicht es, nicht ausreichend gut bestimmte Abstandsmessungen auszugleichen. Der Halbraum wurde beginnend in der halben Schwerpunktstiefe der niedrigsten Frequenz auf  $0.5 \Omega\text{m}$  gesetzt, um den

Salzwasserbereich bereits im Startmodell möglichst gut abbilden zu können. Da die Daten der dritten Messfrequenz (5.495 Hz) mit einem vertikal-koaxialen Spulensystem erfasst werden, das empfindlich gegenüber steil stehenden Leitfähigkeitsstrukturen (aber auch gegenüber externen Quellen) ist, während alle anderen horizontal-koplanaren Systeme verwenden, die empfindlich für die lateralen Leitfähigkeitsstrukturen sind, wurden diese Daten für die Inversion nicht benutzt.

### 5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten und Vertikalschnitte präsentiert. Karten (vgl. **Kapitel 6**) im Maßstab von 1:25.000 wurden für die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand  $\rho_a$  (in  $\Omega\text{m}$ ) und Schwerpunkstiefe  $z^*$  (in m unter GOK) für sechs Messfrequenzen und die spezifischen Widerstände  $\rho$  (in  $\Omega\text{m}$ ) in zehn Tiefen (0–60 m unter NN), abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen, produziert.

In den Tiefenschnitten ab 40 m unter NN treten in Bereichen hoher Leitfähigkeit Lücken in den Widerstandskarten auf, da dort aufgrund der geringen Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder keine verlässlichen Informationen über die Höhe des spezifischen Widerstandes abgeleitet werden konnten. Daher sind hier alle verbliebenen Widerstandswert außerhalb des Inselbereichs nicht betrachtet worden.

Die für die Produktion der Karten der Halbraumparameter verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte dargestellt. Die weißen Punkte markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind. Auf den Karten des spezifischen Widerstandes in verschiedenen Tiefen geben die weißen Punkte einen Hinweis auf die Anzahl der interpolierten Datensätze: Existiert kein weißer Punkt, dann sind die Daten aller Messfrequenzen nicht interpoliert worden, und je größer der Punkt, desto mehr interpolierte Daten sind verwendet worden.

Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:25.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:2.000 wurden basierend auf den 1D-Inversionsergebnissen von jedem der regulären 34 Messprofile und der 11 Querprofile sowie der beiden wiederholten Linien und der Sonderprofile hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen Modellen mit fünf Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topografischen Höhe längs eines Profils nebeneinandergestellt werden. Die Modelloberkante liegt in der Regel unterhalb der wahren Geländehöhe, da die oberste Bodenschicht, insbesondere wenn sie dünn oder relativ trocken ist, bei der Inversion der Luftschicht zugeordnet wird. Die Mächtigkeit der untersten Schicht (Substratum) wird in Abhängigkeit vom spezifischen Widerstand dieser Schicht berechnet, beträgt aber mindestens 10 m. Bei geringen Widerstandskontrasten verschwindet die Bedeutung der Schichtgrenzen, sodass Schichtmächtigkeiten auch zu groß oder verschwindend klein werden können. Dies kann dazu führen, dass die dargestellten Widerstandssäulen in relativ homogenen Bereichen stark variieren können. Über den Modellen sind zusätzlich die Höhe der Flugsonde, der Anpassungsfehler der Inversion und die Messdaten dargestellt, die in einer Legende erklärt werden.

## 5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik

### 5.4.1. Magnetisches Totalfeld

Die mit dem Cs-Magnetometer in der Flugsonde gemessene Totalintensität des erdmagnetischen Feldes  $T$  setzt sich an einem Ort  $r$  zum Zeitpunkt  $t$  aus folgenden Anteilen zusammen:

$$T(r,t) = F(r) + \Delta T(r) + \Delta V(t) + \delta(r,t)$$

mit

$F(r)$  = magnetisches Hauptfeld (IGRF = International Geomagnetic Reference Field)

$\Delta T(r)$  = anomaler, lokaler Anteil des erdmagnetischen Feldes im Messgebiet

$\Delta V(t)$  = Tagesvariation des erdmagnetischen Feldes während der Messung

$\delta(r,t)$  = sonstige Anteile (u. a. magnetisches Eigenfeld des Hubschraubers).

Gesucht werden die Anomalien des magnetischen Totalfeldes  $\Delta T(r)$ . Während das IGRF  $F(r)$ , das anhand von Tabellenwerten berechnet werden kann, und die Tagesvariationen  $\Delta V(t)$ , die in der Bodenstation registriert werden, von der gemessenen Totalintensität subtrahiert werden können, sind die sonstigen Anteile  $\delta(r,t)$  nicht isoliert zu erfassen. Sie sind den Anomalien  $\Delta T(r)$  überlagert, d. h. in den abgeleiteten  $\Delta T$ -Werten sind sowohl die gesuchten geogenen als auch die störenden anthropogenen Anteile enthalten, deren Quellen (z. B. Gebäude) sich meist an der Erdoberfläche befinden.

### 5.4.2. Berechnung des IGRF

Für die Bestimmung der Anomalien der Totalintensität des erdmagnetischen Feldes ( $\Delta T$ ) wird das alle fünf Jahre von der IAGA (1992) in Kugelfunktionsdarstellung zur Verfügung gestellte „International Geomagnetic Reference Field“ (IGRF) verwendet, mit dem für jeden Punkt auf und oberhalb der Erdoberfläche und für einen bestimmten Zeitpunkt ein Feldwert berechnet werden kann. Das aktuell gültige Modell IGRF-10 aus dem Jahre 2005 (IAGA, 2005) diente zur Berechnung des magnetischen Hauptfeldes an jedem Messpunkt zur entsprechenden Messzeit.

### 5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen

Die Referenzstation zur Erfassung der magnetischen Tagesvariationen  $\Delta V(t)$  befand sich auf dem Flugplatz Emden.  $\Delta V(t)$  ergibt sich aus dem Messwert der Basisstation abzüglich dem IGRF-Feld am Ort der Basisstation zum Zeitpunkt der Messung. Kurzzeitige Störeinflüsse in den Daten der Basisstation werden durch Anwendung eines Tiefpassfilters beseitigt. Weiterhin werden geringfügige Niveauunterschiede in den Aufzeichnungen verschiedener Messtage (durch leicht unterschiedliche Positionierung des Sensors) ermittelt und korrigiert.

### 5.4.4. Statistische Niveaueinpassung

Zur Synchronisation der gemessenen Magnetikdaten mit den Positionsdaten wird eine Verschiebung der Daten um -1,4 Sekunden angebracht. Aufgrund von nur geringen Niveauunterschieden zwischen den einzelnen Messprofilen konnten die Daten der Messprofile durch ein Microlevelling mit dem

---

Programm Oasis montaj von Geosoft angepasst werden. Zur Vermeidung von Verschmierungseffekten bei der Filterung werden lokale magnetische Anomalien aus dem Datensatz mittels adaptiver Filterung zunächst entfernt und nach dem erfolgtem Microlevelling für die Messprofile, angepasst auf das neue Umgebungsniveau, wieder eingesetzt. Die Niveaueinpassung auf den Kontrollprofilen erfolgt auf Basis der korrigierten Messprofile, indem die geglättete Differenz der Messdaten und der auf die Kontrollprofile projizierten Gitterdaten der korrigierten Messprofile als Niveaufehler deklariert und von den Messdaten abgezogen werden.

#### **5.4.5. Präsentation der Magnetik-Ergebnisse**

Die Ergebnisse Magnetik werden als Karte der Anomalien des magnetischen Feldes präsentiert (vgl. **Kapitel 6**), in der auch die kurzwelligen Anomalien anthropogenen Ursprungs enthalten sind.

#### **5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie**

Aufgrund eines Fehlers bei der Aufzeichnung der radiometrischen Daten war eine Auswertung nicht möglich.

## 6. Kartografische Arbeiten

### 6.1. Topographische Karte 1:25.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurde eine Topographische Karte mit einem Sonderblattschnitt auf Grundlage von Rasterdaten der DTK 25-V (Topographische Karte 1:25.000) hergestellt. Zur Abdeckung des Messgebietes ergab sich ein Blatt mit der Ausdehnung von 14 × 12 Kilometern. **Tab. 14** enthält die Eckpunktkoordinaten des Blattes.

**Tab. 14:** Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Borkum

Karteneckpunkt	Gauß-Krüger-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
SW	3343 000	5935 500
NW	3343 000	5947 500
NE	3357 000	5947 500
SE	3357 000	5935 500

Die Ergebniskarte 1:25.000 basiert auf Rasterdaten der TK 50, Blatt L2406, die auf 1:25.000 vergrößert wurden. Herausgeber ist das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a. M.. Abgedeckt wird der Bereich der Insel Borkum, die zentral im Kartenbild zwischen dem Voorentief im Norden und der Westerems im Süden liegt.

Digital wurde dazu ein Kartenrahmen mit Gauß-Krüger-Eckpunktkoordinaten im 3°-Meridian-Streifen-system mit 9° als Mittelmeridian (Zone 3), basierend auf dem Bessel-Ellipsoid, und ergänzenden geografischen Koordinaten erstellt. Der Grauton der topografischen Darstellung wird durch eine dreißigprozentige Aufrasterung der digitalen Topografie erreicht.

### 6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software

Für jeden Ergebnisparameter werden farbige Isolinienkarten im Maßstab 1:25.000 hergestellt. Als Kartengrundlage dient das oben angeführte vergrößerte Blatt der Topographischen Karte TK 50. Des Weiteren sind die Fluglinien als Datenpunkte ebenfalls auf den Karten der Elektromagnetik enthalten.

Für die Herstellung der geophysikalisch-thematischen Karten und der ihnen zugrunde liegenden Gitter wird das Software-Paket Oasis montaj 7.0 von Geosoft verwendet. **Tab. 15** zeigt die Gitterparameter, die für das Messgebiet Borkum verwendet wurden. Die Zusammenstellung von Geophysik, Topografie und Legendeninformationen erfolgt mit dem Programm ArcGIS 9.3.1 von ESRI. Die Erstellung von PDF-Dokumenten wird mit Adobe Acrobat vorgenommen.

**Tab. 15:** Gitterparameter

Parameter	Wert
Methode zur Flächeninterpolation	minimale Krümmung
Gitterzellengröße [m]	50
Suchradius [m]	500
Zellen außerhalb der Datenpunkte	10
Log-Option	linear, (außer: log $\rho$ )

### 6.3. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Borkum wurden 23 geophysikalische Ergebniskarten sowie ein digitales Höhenmodell jeweils mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:25.000 hergestellt (siehe Kartenverzeichnis und **Anhang III**). Alle Karten sind mit einer ausführlichen Legende versehen, die Auskunft über das Messgebiet, die Kartengrundlagen, die Skalierung, den dargestellten Parameter und die beteiligten Institutionen und Personen gibt.

Ferner wurde eine Fluglinienkarte produziert, die die Lage der Messprofile auf der Grundlage der Topographischen Karte im jeweiligen Maßstab zeigt. Die Profillinien sind mit Liniennummern versehen, die am Anfang eines Profils in Fluglinienrichtung geplottet sind. Die Positionen der Zeitmarken (10 s, d. h. 100 Werte) sind mit einem „x“ gekennzeichnet. Jede zehnte Zeitmarke ist mit der dazugehörigen Zeitmarkennummer (Record) in Fluglinienrichtung beschriftet. Die Fluglinienkarten gestatten eine schnelle Zuordnung der Daten von Profilen und Vertikalsektionen zur Position im Messgebiet.

## 7. Archivierung

Alle Daten und Plots wurden auf DVD gespeichert und im Fachbereich 2.1 – Geophysikalische Erkundung – Ressourcen und Oberflächenprozesse archiviert. Darüber hinaus sind Ergebnisdaten als ASCII-codierte Profildaten im Geosoft XYZ-Format und die Endergebnisse (Bericht, Karten und Vertikalsektionen) als PDF-Dokumente im Originalmaßstab auf einer DVD (**Tab. 16**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Die ArcGIS-Projekte beinhalten die Kartendarstellung als MXD-Daten für ArcGIS 9.3.1 inklusive der Legendeteile (Import als BMP) und der Rasterdaten DTK 50 (Datenformat GRID, Typ Integer, mit Color File, Auflösung 200 Pixel/cm [508 dpi]).

**Tab. 16:** Inhalt der DVD

Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Bericht		Technischer Bericht
\Adobe Reader		Adobe® Acrobat® Reader (auch unter <a href="http://get.adobe.com/de/reader/">http://get.adobe.com/de/reader/</a> )
\Daten...	\HEM	ASCII-Datei der Rohdaten (HEM130_RAW.xyz) ASCII-Datei der bearbeiteten Daten (HEM130_DAT.xyz) ASCII-Datei der abgeleiteten Parameter (HEM130_APP.xyz) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM130_INV.xyz)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, IGRF, Bodenstationsdaten, Tagesvariation etc. (HMG130.xyz)
\Karten...	\Fluglinien	Karte 1:25.000 des tatsächlich zurückgelegten Flugweges mit Topografie
	\DEM	Karte 1:25.000 des Digitalen Höhenmodells
	\HEM	Karten 1:25.000 der Halbraumwiderstände und Schwerpunktstiefen für die Frequenzen 386, 1.823, 8.338, 5.495, 41.430 und 133.300 Hz Karten 1:25.000 der spezifischen Widerstände bei 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 und 60 m unter NN
	\HMG	Karte 1:25.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes
	\ArcGIS	Kartenprojekte für ArcGIS 9.3.1 (*.mxd) inklusive Legenden (*.bmp) und Rasterdaten TK 50 (GRID)
\VRS		Vertikalschnitte des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnisse mit vier Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:25.000 und Vertikalmaßstab 1:2.000

---

## 8. Literatur

- IAGA, 1992: International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group 8: Analysis of the main field and secular variation. *Geophys. J. Int.*, 108, 945–946.
- IAGA, 2005: International Geomagnetic Reference Field, 2005, 10<sup>th</sup> generation. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group V-MOD.  
<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 2000. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 65, 1983-1992.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 2005. Aerogeophysik. In: Knödel, K., Krummel, H. & Lange, G. (Hrsg.), *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 771-810.
- Siemon, B., 2001: Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 46, 65-76.
- Siemon, B., 2006. Electromagnetic methods – frequency domain: Airborne techniques. In: Kirsch, R. (ed.), *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 155-170.
- Siemon, B. 2009. Levelling of frequency-domain helicopter-borne electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 67 (3), 206-218.
- Siemon, B., Eberle, D.G. & Binot, F., 2004. Helicopter-borne electromagnetic investigation of coastal aquifers in North-West Germany. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 32 (5/6), 385-395.

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE**

**BGR, HANNOVER**

Abteilungsleiter



(Dr. M. Kosinowski)

Leiter der Abteilung  
„Grundwasser und Boden“

Fachbereichsleiter



(Dr. U. Meyer)

Leiter des Fachbereichs  
„Geophysikalische  
Erkundung – Ressourcen  
und Oberflächenprozesse“

Sachbearbeiter



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs  
„Aerogeophysik und  
Luftfahrttechnischer  
Betrieb“

## Anhang I

### Messgebiet 130 – Borkum

<b>Basis:</b>	Flugplatz Emden Flugplatzhöhe: 0 ft / 0 m	
<b>Basisstation:</b>	7°13'52,2" westlicher Länge und 53°23'24,2" nördlicher Breite:	
<b>Messgebiet:</b>		
<b>Profilabstand:</b>	Messprofile – 250 m	Querprofile – 500 m
<b>Profilrichtung:</b>	Messprofile – 145° /325°	Querprofile – 55° /235°
<b>Profilkilometer:</b>	307 Messprofile–km	105 Querprofile–km
<b>Größe des Messgebietes:</b>	ca. 88 km <sup>2</sup>	

#### Allgemeine Anmerkungen:

- 1) Die Messprofile sind durch L\*.1 und die Kontrollprofile durch T\*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L\*.2 gekennzeichnet.
- 2) Die Linien L10\*.1 kennzeichnen Überführungsflüge vom Festland nach Borkum und zurück.
- 3) Die Linien L20\*.1 kennzeichnen die Testlinie, die am Ende jedes Messfluges nahe dem Flugplatz Emden überflogen wurde.
- 4) Bei den Flügen 13004 und 13005 fielen die analogen Höhenkanäle aus. Sie wurden bei der Bearbeitung ersetzt durch die entsprechenden digitalen Kanäle (H\_Laser → H\_Radar, ZHG\_HELI → H\_BARO; ZHG\_BIRD → H\_KPA).
- 5) Die Radiometriedatenaufzeichnung war fehlerhaft. Daher war keine Auswertung möglich.

## Messgebiet 130 – Borkum

**Tab. A-1:** *Flugprotokoll*

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
13001	04.03.08	08:20 – 10:34	T3.9 T4.9 T5.9 T6.9 T7.9 T8.9 T9.9 T10.9 T11.9 T12.9 T13.9 L101.1 L201.1	Kontrollprofile  Wetter: bewölkt, kalt, stark windig
13002	04.03.08	12:27 – 14:21	L103.1 L3.1 L6.1 L9.1 L12.1 L15.1 L18.1 L21.1 L24.1 L102.1 L202.1	Messprofile Wetter: sonnig, windig
13003	05.03.08			Bodentest

13004	05.03.08	08:37 – 11:07	L105.1 L27.1 L30.1 L33.1 L36.1 L35.1 L32.1 L29.1 L26.1 L23.1 L20.1 L17.1 L14.1 L11.1 L8.1 L104.1 L203.1	Messprofile Wetter: sonnig, sehr kalt, windig
13005	05.03.08	13:36 – 15:48	L107.1 L5.1 L4.1 L7.1 L10.1 L13.1 L16.1 L19.1 L22.1 L25.1 L28.1 L31.1 L34.1 L33.2 L36.2 L106.1 L204.1	Messprofile Wetter: sonnig, kalt, windig

## Anhang II

### Korrekturwerte für HEM-Daten

**Tab. A-2:** Korrekturwerte der HEM-Eichanomalien, notwendig vor allem für die mittleren und hohen Messfrequenzen

Frequenz [Hz]	Flug	Korrekturen für Eichanomalie		Eichanomalie	
		Amplitude	Phase	Inphase	Quadratur
386	Soll			-215,9	-209,3
	13001-5	1,00	0,00	-215,9	-209,3
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-215,9</b>	<b>-209,3</b>
1823	Soll			-175,6	-173,7
	13001	1,00	1,00	-172,5	-176,7
	13002-5	1,00	0,00	-175,5	-173,7
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,00</b>	<b>1,93</b>	<b>-174,8</b>	<b>-174,5</b>
5495	Soll			91,2	91,8
	13001	1,00	2,00	87,9	94,9
	13002	1,00	2,50	87,1	95,7
	13004	1,00	1,20	89,3	93,7
	13005	1,00	2,00	87,9	94,9
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,00</b>	<b>1,93</b>	<b>88,1</b>	<b>94,8</b>
8340	Soll			-188,2	-180,2
	13001	1,03	0,00	-193,9	-185,6
	13002	1,03	0,50	-192,2	-187,3
	13004	1,03	0,00	-193,9	-185,3
	13005	1,03	0,50	-192,2	-187,3
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,03</b>	<b>0,25</b>	<b>-193,0</b>	<b>-186,5</b>
41430	Soll			-667,7	-664,6
	13001	1,00	0,50	-661,9	-670,4
	13002	1,00	0,50	-661,9	-670,4
	13004	1,00	0,90	-659,5	-672,7
	13005	1,00	0,70	-657,2	-675,0
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,00</b>	<b>0,65</b>	<b>-660,1</b>	<b>-672,1</b>
133200	Soll			-1.249,2	-1.363,2
	13001	0,95	3,75	-1.099,5	-1.369,9
	13002	0,95	0,00	-1.186,7	-1.295,0
	13004	1,00	1,70	-1.208,2	-1.399,7
	13005	1,00	0,70	-1.232,5	-1.378,4
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,98</b>	<b>1,54</b>	<b>-1.181,7</b>	<b>-1.360,7</b>

## Anhang III

### Beschreibung der Datenformate

#### A) Elektromagnetik

Beschreibung der drei ASCII-Dateien mit den Ergebnissen der Hubschrauberelektromagnetik (HEM).

##### Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/BORKUM  
/AREACODE  
/130  
/C_MERIDIAN, ZONE and GEOID  
/ 9 3 BESSEL  
/BIRD  
/61  
/NUMFREQ  
/ 6  
/FREQUENCY  
/ 386.00 1823.00 5495.00 8338.00 41430.00 133300.00  
/COILGEOMETRY  
/ 1.00 1.00 4.00 1.00 1.00 1.00  
/COILSEPERATION  
/ 7.94 7.93 9.06 7.93 7.91 7.92  
/TOWCABLE  
/ 40.00  
/DUMMY  
/ 9999.990  
/DECIMATIONVALUE  
/ 1  
/PRIVTEXT  
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```

**1) Rohdaten: HEM130\_RAW.XYZ**

Beispiel:

/Unprocessed data

/XYZ EXPORT [12/10/2009]

/DATABASE [.\HEM\_130\_FIN\_split.gdb]

/ X Y LON\_BIRD\_RAW LAT\_BIRD\_RAW RECORD UTC\_TIME ALTR ALTL\_FP ZHG\_BIRD\_RAW ZHG\_HELI\_RAW ALTB EM1I EM1Q ... EM6I EM6Q EM1\_FREQ ... EM6\_FREQ CPPL CPSP

//Flight 13001

//Date 2008/03/04

Random 0

```
3377620 5925359 7.1569783 53.4456638 0 82657.0 1533.36 421.61 413.80 456.08 -1.22 -0.53 -0.22 ... 28.40 123.79 0 ... 0 0.0018 0.0070
3377617 5925360 7.1569319 53.4456760 1 82657.1 1534.27 421.86 413.72 456.04 -1.53 -0.61 -0.34 ... 28.07 23.58 4141 ... 0 0.0019 0.0028
3377614 5925362 7.1568856 53.4456881 2 82657.2 1536.71 421.60 413.64 456.00 -1.37 -0.66 -0.43 ... 27.77 123.19 8282 ... 0 0.0019 0.0023
```

In diesem Datenfile sind alle Rohdaten in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 3500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALTR	ft	Messwert des Radarhöhenmessers, teilweise defekt
ALTL_FP	m	Messwert des Laserhöhenmessers
ZHG_BIRD_RAW	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
ZHG_HELI_RAW	m	GPS-Höhe über NN des Hubschraubers, Bezugssystem WGS-84
ALTB	ft	barometrische Höhe des Hubschraubers (nach x8 - 1000), teilweise defekt
EM1I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41430 Hz
EM1Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41430 Hz
EM2I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8338 Hz
EM2Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8338 Hz
EM3I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
EM3Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
EM4I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=133300 Hz
EM4Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=133300 Hz
EM5I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1823 Hz
EM5Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1823 Hz
EM6I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5495 Hz
EM6Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5495 Hz
EM1_FREQ	Hz	Frequenz für EM1-Kanäle (etwa f=41430 Hz)
EM2_FREQ	Hz	Frequenz für EM2-Kanäle (etwa f=8338 Hz)
EM3_FREQ	Hz	Frequenz für EM3-Kanäle (etwa f=386 Hz)
EM4_FREQ	Hz	Frequenz für EM4-Kanäle (etwa f=133300 Hz)
EM5_FREQ	Hz	Frequenz für EM5-Kanäle (etwa f=1823 Hz), nicht aufgezeichnet
EM6_FREQ	Hz	Frequenz für EM6-Kanäle (etwa f=5495 Hz), nicht aufgezeichnet
CPPL		Powerline-Detektor
CPSP		Sperics-Detektor

Anmerkungen:

- Zeilen, die mit "/" beginnen, sind Kommentarzeilen.
- Zeilen, die mit "//" beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.
- Zeilen, die mit "Random" beginnen, kennzeichnen die Flüge.

Im Header steht abweichend -0.25 statt 4.00 zur Kennzeichnung von nicht-transformierten vertikal-koaxialen Daten:

/COILGEOMETRY

/ 1.00 1.00 -0.25 1.00 1.00 1.00

**2) Daten: HEM130\_DAT.XYZ**

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using Oasis montaj

/Levelled data

```

/   X      Y      LON      LAT      RECORD UTC      TOPO H_RADAR H_LASER BIRD_NN H_BARO REAL_1 QUAD_1  ...  REAL_6 QUAD_6
LINE 3.1
3350922 5936803 6.750026 53.541546 11830 125303.0 0.00 22.67 24.32 23.97 26.55 1898.54 2202.87 ... 7973.21 438.37
3350920 5936805 6.749986 53.541557 11831 125303.1 0.00 22.77 24.39 24.06 26.56 1890.09 2185.61 ... 7898.66 433.38
3350917 5936806 6.749946 53.541569 11832 125303.2 0.00 23.00 24.46 24.15 26.57 1882.07 2168.89 ... 7826.18 428.62

```

In diesem Datenfile sind alle relativen Sekundärfelder in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 3500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	korrigierte topografische Höhe über NN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe des Hubschraubers abzüglich der korrigierten Laserhöhe, über der Nordsee auf 0 gesetzt
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	korrigierter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
REAL_1	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
QUAD_1	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
REAL_2	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1823 Hz
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1823 Hz
REAL_3	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5495 Hz auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
QUAD_3	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5495 Hz auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
REAL_4	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8338 Hz
QUAD_4	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8338 Hz
REAL_5	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41530 Hz
QUAD_5	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41530 Hz
REAL_6	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=133300 Hz
QUAD_6	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=133300 Hz

**3) Halbraumparameter: HEM130\_APP.XYZ**

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using Oasis montaj

/Levelled data

/	X	Y	LON	LAT	RECORD	UTC	TOPO	H_RADAR	H_LASER	BIRD_NN	H_BARO	RHOA_1	KDA_1	ZST_1	...	RHOA_6	KDA_6	ZST_6
LINE	3.1																	
	3350922	5936803	6.750026	53.541546	11830	125303.0	0.00	22.67	24.32	23.97	26.55	0.93	-3.33	9.03	...	0.50	-0.47	0.17
	3350920	5936805	6.749986	53.541557	11831	125303.1	0.00	22.77	24.39	24.06	26.56	0.93	-3.32	9.04	...	0.50	-0.46	0.17
	3350917	5936806	6.749946	53.541569	11832	125303.2	0.00	23.00	24.46	24.15	26.57	0.93	-3.31	9.04	...	0.50	-0.45	0.17

In diesem Datenfile sind alle notwendigen gemessenen Parameter sowie die berechneten Größen  $\rho_a$ ,  $d_a$  und  $z^*$  in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 3500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	korrigierte topografische Höhe über NN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe des Hubschraubers abzüglich der korrigierten Laserhöhe, über der Nordsee auf 0 gesetzt
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	korrigierter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHOA_1	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=386 Hz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=386 Hz
ZST_1	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=386 Hz
RHOA_2	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=1823 Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=1823 Hz
ZST_2	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=1823 Hz
RHOA_3	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=5495 Hz
KDA_3	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=5495 Hz
ZST_3	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=5495 Hz
RHOA_4	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=8338 Hz
KDA_4	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=8338 Hz
ZST_4	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=8338 Hz
RHOA_5	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=41530 Hz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=41530 Hz
ZST_5	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=41530 Hz
RHOA_6	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=133300 Hz
KDA_6	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=133300 Hz
ZST_6	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=133300 Hz

#### 4) Inversionsdaten HEM130\_INV.XYZ

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using Oasis montaj

/Levelled data

/MODELL-HALBRAUM-PARAMETER

/INVERSIONSMODELLE, STEUERPARAMETER VON AUTOINV.DAT

/UEBERTRAGEN AM 03-DEC-09 12:47:25

```

/   X       Y       LON       LAT       RECORD UTC       TOPO   H_RADAR H_LASER  BIRD_NN  H_BARO  RHO_I_1 D_I_1  ...  RHO_I_4 D_I_4  RHO_I_5  QALL
LINE 3.1
3350922 5936803 6.750026 53.541546 11830 125303.0 0.00 22.67 24.32 23.97 26.55 0.53 3.01 ... 1.97 3.00 2.27 4.42
3350920 5936805 6.749986 53.541557 11831 125303.1 0.00 22.77 24.39 24.06 26.56 0.53 3.01 ... 1.97 3.00 2.26 4.43
3350917 5936806 6.749946 53.541569 11832 125303.2 0.00 23.00 24.46 24.15 26.57 0.53 3.02 ... 2.01 3.00 2.35 4.33

```

In diesem Datenfile sind alle notwendigen gemessenen Parameter sowie die Ergebnisse  $\rho$ ,  $d$  und  $q_{all}$  einer 1D-Inversion in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 3500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe des Hubschraubers abzüglich der berechneten Laserhöhe
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	berechneter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde über dem Modellraum
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHO_I_1	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der ersten (oberen) Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
D_I_1	m	Mächtigkeit der ersten (oberen) Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_2	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der zweiten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
D_I_2	m	Mächtigkeit der zweiten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_3	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der dritten Schicht des 4-Schicht-Inversionsmodells
D_I_3	m	Mächtigkeit der dritten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_4	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der vierten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
D_I_4	m	Mächtigkeit der vierten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_5	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der fünften Schicht (Substratum) des 5-Schicht-Inversionsmodells
QALL	%	Anpassungsfehler der Inversion (L1-Norm)

Anmerkung: Im Header steht zusätzlich:

/NUMLAYER

/ 5

/MUELAYER

/ 0

## B) Magnetik

Beschreibung der ASCII-Datei mit den niveaukorrigierten (gelevelten) Ergebnissen der Hubschraubermagnetik.

### HMG130.XYZ

```

Beispiel:
/ XYZ EXPORT [12/18/2009]
/ DATABASE [.\130_mag.gdb]
/ -----
/
/ X Y LON LAT RECORD UTC_TIME ALT_BIRD MAG_BASE_RAW MAG_BASE_F MAG_RAW MAG_COR MAG_LEV
//Flight 13002
//Date 2008/03/04
Line 3.1
3350922 5936803 6.750026 53.541544 11830 125303.0 17.2 49134.66 49135.01 49286.43 130.40 129.63
3350920 5936805 6.749986 53.541556 11831 125303.1 17.3 49134.83 49135.01 49286.42 130.40 129.63
3350917 5936806 6.749946 53.541568 11832 125303.2 17.4 49135.00 49135.01 49286.41 130.41 129.64

```

In diesem Datenfile sind alle notwendigen gemessenen Parameter sowie die Ergebnisse der Magnetik in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 3500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
MAG_BASE_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
MAG_BASE_F	nT	bereinigte Daten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
MAG_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Flugsonde
MAG_COR	nT	Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes nach Abzug des IGRF und der Tagesvariation sowie Korrektur des richtungsabhängigen Fehlers (heading error)
MAG_LEV	nT	niveaukorrigierte Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes

#### Anmerkungen:

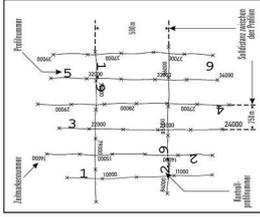
Zeilen, die mit "/" beginnen, sind Kommentarzeilen.  
 Zeilen, die mit "//" beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.  
 Zeilen, die mit "Line" beginnen, kennzeichnen Messprofilinien.  
 Zeilen, die mit "Tie" beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.

## **Anhang III**

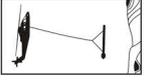
### **Karten**

(Originalkarten verkleinert auf 1:75.000)

**AEROGEOPHYSIKALISCHE  
MESSUNGEN IM GEBIET BORKUM**



Die Messungen wurden im Sommer 2008 durchgeführt. Die Messungen wurden im Sommer 2008 durchgeführt. Die Messungen wurden im Sommer 2008 durchgeführt.

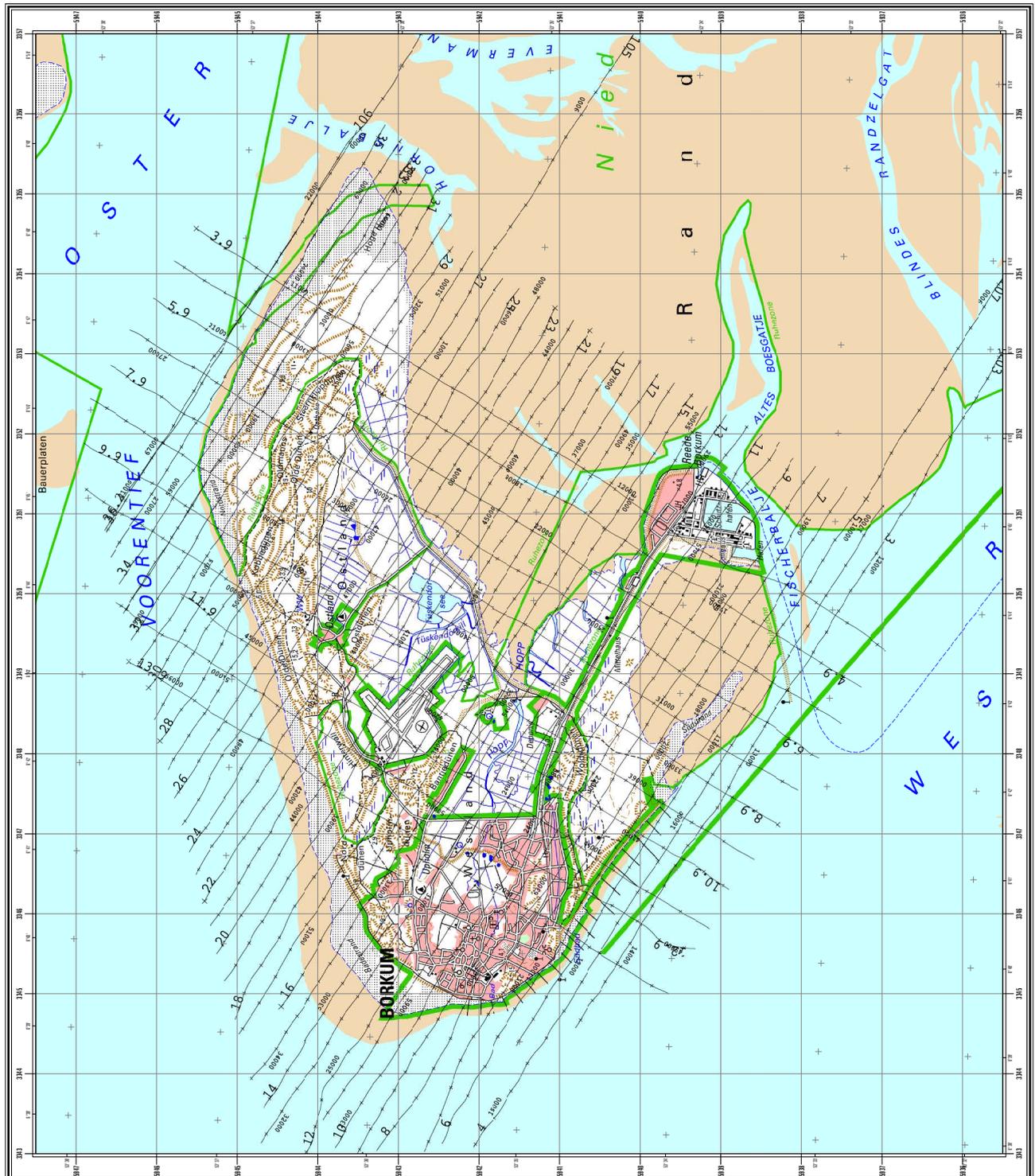


Maßstab 1:25 000 (4 cm ≙ 1 km)

**BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Hammer, Bundesrepublik Deutschland  
**LAG** Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LAG)  
Hammer, Bundesrepublik Deutschland

Gebiet: **Borkum**  
Parameter: **Topografie und Fluglinien**

Befliegung: März 2008  
Bearbeitung: März 2008  
B 2.1 Geophysikalische Erkundung, Ressourcen  
Hammer 2008 - www.bgr.bund.de - hefl@bgr.de



Alle anderen Karten und Vertikal-  
sektionen sind in dieser Web-Fassung  
des Berichtes nicht enthalten.

All other maps and vertical  
resistivity sections are not included  
in this web edition of the report.