

B. Siemon, W. Voß, M. Ibs-von Seht,  
J. Pielawa

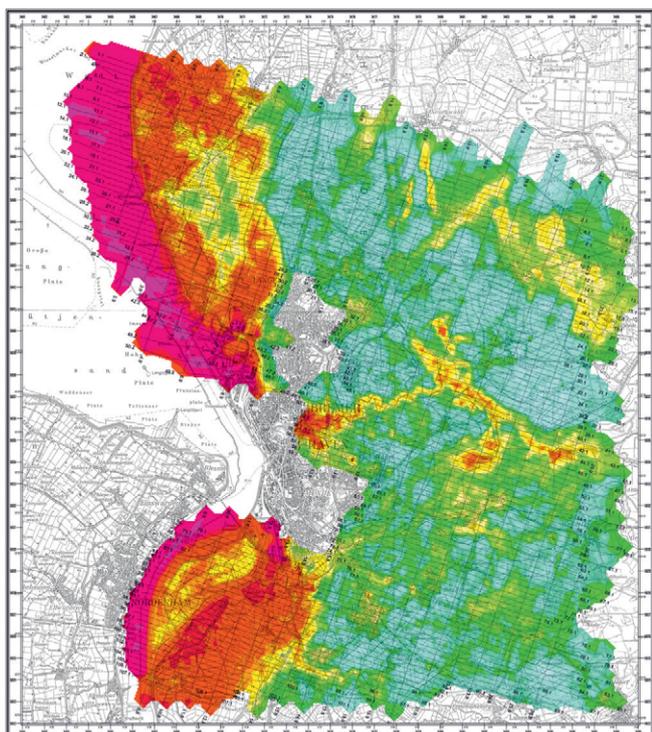


Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

# Technischer Bericht Hubschrauber-Geophysik Bremerhaven

**Juni 2001**

(Revision 2011)





**Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe**

**Technischer Bericht  
Hubschrauber-Geophysik  
Bremerhaven**

**Juni 2001**

(Revision 2011)



Autoren: B. Siemon  
W. Voß  
M. Ibs-von Seht  
J. Pielawa

Datum: 20.09.2011

---

## 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>VII</b>
<b>1. Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Aerogeophysikalische Vermessung</b> .....	<b>5</b>
3.1. Das Messgebiet .....	5
3.2. Durchführung der aerogeophysikalischen Messungen.....	6
3.3. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR.....	8
3.3.1. Messhubschrauber .....	8
3.3.2. Messausrüstung.....	9
3.4. Funktionsweise des aerogeophysikalischen Messsystems .....	15
3.4.1. Elektromagnetik .....	17
3.4.2. Magnetik .....	18
3.4.3. Radiometrie .....	18
3.4.4. Navigations- und Positionierungssystem .....	19
3.4.5. Datenaufzeichnung .....	20
3.4.6. Videosystem.....	20
<b>4. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten</b> .....	<b>21</b>
4.1. Prozessabläufe .....	21
4.2. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik .....	21
4.2.1. Datenkorrektur.....	22
4.2.2. Phasenüberprüfung.....	22
4.2.3. Nullniveaubestimmung.....	22
4.2.4. Kalibrierung des HEM-Systems.....	23
4.2.5. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter .....	24
4.2.6. 1D-Inversion der HEM-Daten .....	24
4.2.7. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten.....	25
4.2.8. Statistische Niveaueinpassung .....	25
4.2.9. Präsentation der Ergebnisse .....	27
4.3. Datenverarbeitung in der Magnetik .....	27
4.3.1. Magnetisches Totalfeld .....	27

---

4.3.2. Berechnung des IGRF .....	28
4.3.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen .....	28
4.3.4. Statistische Niveauanpassung .....	28
4.3.5. Präsentation der Ergebnisse .....	29
4.4. Datenverarbeitung in der Radiometrie.....	29
4.4.1. Energiekalibrierung.....	30
4.4.2. Verminderung des Rauschens.....	30
4.4.3. Detektorhöhe über Grund und effektive Höhe.....	30
4.4.4. Registrierzeitkorrektur .....	31
4.4.5. Hintergrundstrahlung.....	32
4.4.6. Compton-Korrektur .....	32
4.4.7. Zählraten in Standardflughöhe .....	33
4.4.8. Berechnung von Radioelement-Konzentrationen und Strahlungsrate .....	34
4.4.9. Statistische Niveauanpassung und Glättung .....	36
4.4.10. Präsentation der Ergebnisse .....	36
4.5. Kartenherstellung mit GEOSOFT-Software.....	36
<b>5. Kartographische Arbeiten .....</b>	<b>37</b>
5.1. Topographische Karten 1:50.000.....	37
5.2. Ergebniskarten.....	37
<b>6. Archivierung .....</b>	<b>38</b>
<b>7. Literatur .....</b>	<b>39</b>
<b>Unterschriften .....</b>	<b>40</b>
<b>Anhang I: Befliegungsdaten Messgebiet Bremerhaven.....</b>	<b>41</b>
<b>Anhang II: Beschreibung der Datenformate .....</b>	<b>47</b>
<b>Anhang III: DVD-Inhalt.....</b>	<b>56</b>
<b>Anhang IV: Karten .....</b>	<b>59</b>
<b>Anhang V: Vertikalsektionen.....</b>	<b>86</b>
<b>Anlage: DVD</b>	

## **Personal:**

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

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

Bernd **Röttger**<sup>†</sup>, Mineraloge, Management und Datenauswertung, 2001: B3.14, BGR

Dr. Bernhard **Siemon**, Arbeitsbereichsleiter, HEM-Datenauswertung, B2.1 (2001: B3.14), BGR

Dr. Malte **Ibs-von Seht**, Geologe, HMG- und HRD-Datenauswertung, B2.1 (2001: B3.14), BGR

Jens **Pielawa**, Kartograf, B2.1 (2001: B3.14), BGR

### **Messgruppe**

Hans-Joachim **Rehli**, Elektrotechnikingenieur, Messgruppenleiter, 2001: B3.14, BGR

Wolfgang **Voß**, Vermessungsingenieur, B2.1 (2001: B3.14), BGR

Karl-Heinz **Meinhardt**, Operator, Systembetreuer, B2.1 (2001: B3.14), BGR

Josef **Scheiwein**, Hubschrauberingenieur, B2.1 (2001: B3.14), BGR

Helmut **Walther**, Pilot, Wiking Helikopter Service GmbH

### **Danksagung**

Dank gebührt Moritz Warnecke von der Albert-Einstein-Schule in Laatzen, der während seines Schülerpraktikums vom 29.08.–09.09.2011 im Fachbereich B2.1 bei der Berichtslegung und Kartenproduktion mitgeholfen hat.

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

Fachbereich B2.1

„Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie“

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. Messhubschrauber der BGR und Messgruppe im Jahr 2001
2. Lageskizze des Messgebietes Bremerhaven
3. Der Messhubschrauber vor dem BGR-Gebäude in Hannover-Buchholz
4. Prinzipskizze des Hubschrauber-Messsystems
5. Vereinfachtes Blockdiagramm des Hubschrauber-Messsystems
6. Beispiel für eine Vertikalsektion

### **Tabellenverzeichnis:**

1. Technische Daten der Befliegung Bremerhaven
  2. Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
  3. Komponenten des Hubschrauber-Messsystems
  4. Messfrequenzen und Spulenabstände der 5-Frequenz-HEM-Sonde BKS 48
  5. Energiebereiche registrierter Strahlungsquellen
  6. Kalibrierfaktoren für Inphase R und Quadrature Q des 5-Frequenz-HEM-Systems
  7. Korrekturfaktoren Hintergrundstrahlung
  8. Koeffizienten der Einstreuratzen
  9. Absorptionskonstanten
  10. Sensitivitäten
  11. Linearere Abschwächungskoeffizienten  $\mu_V$  von Vegetation
  12. Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Bremerhaven
  13. Inhalt der DVD im Überblick
- A-1:** Flugprotokoll

---

### **Kartenverzeichnis (1:50.000):**

1. Topografie und Fluglinien
2. Digitales Höhenmodell in m NN
3. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 192.500 Hz ( $\rho_{oa5}$ ) in  $\Omega\text{m}$
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 41.330 Hz ( $\rho_{oa4}$ ) in  $\Omega\text{m}$
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8.630 Hz ( $\rho_{oa3}$ ) in  $\Omega\text{m}$
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1.832 Hz ( $\rho_{oa2}$ ) in  $\Omega\text{m}$
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 383 Hz ( $\rho_{oa1}$ ) in  $\Omega\text{m}$
8. Schwerpunktstiefe bei 192.500 Hz ( $z_{st5}$ ) in m unter GOK
9. Schwerpunktstiefe bei 41.330 Hz ( $z_{st4}$ ) in m unter GOK
10. Schwerpunktstiefe bei 8.630 Hz ( $z_{st3}$ ) in m unter GOK
11. Schwerpunktstiefe bei 1.832 Hz ( $z_{st2}$ ) in m unter GOK
12. Schwerpunktstiefe bei 383 Hz ( $z_{st1}$ ) in m unter GOK
13. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter NN
14. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter NN
15. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter NN
16. Spezifischer Widerstand bei 20 m unter NN
17. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter NN
18. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter NN
19. Spezifischer Widerstand bei 50 m unter NN
20. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter NN
21. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
22. Gehalte von Kalium im Boden in %
23. Äquivalentkonzentration von Thorium im Boden in ppm
24. Äquivalentkonzentration von Uran im Boden in ppm
25. Gesamtstrahlung in cps
26. Strahlungsrate am Boden in  $\mu\text{R/h}$

**Liste der Vertikalsektionen:**

Messprofile:

1. VRS 1.1
2. VRS 2.1
3. VRS 3.1
4. VRS 4.1
5. VRS 5.1
6. VRS 6.1
7. VRS 7.1
8. VRS 8.1
9. VRS 9.1
10. VRS 10.1
11. VRS 11.1
12. VRS 12.1
13. VRS 13.1
14. VRS 14.1
15. VRS 15.1
16. VRS 16.1
17. VRS 17.1
18. VRS 18.1
19. VRS 19.1
20. VRS 20.1
21. VRS 21.1
22. VRS 22.1
23. VRS 23.1
24. VRS 24.1
25. VRS 25.1
26. VRS 26.1
27. VRS 27.1
28. VRS 28.1
29. VRS 28.2
30. VRS 29.1
31. VRS 29.2
32. VRS 30.1
33. VRS 30.2

34. VRS 31.1
35. VRS 31.2
36. VRS 32.1
37. VRS 32.2
38. VRS 33.1
39. VRS 33.2
40. VRS 34.1
41. VRS 34.2
42. VRS 35.1
43. VRS 35.2
44. VRS 36.1
45. VRS 36.2
46. VRS 37.1
47. VRS 38.1
48. VRS 39.1
49. VRS 40.1
50. VRS 41.1
51. VRS 41.2
52. VRS 42.1
53. VRS 42.2
54. VRS 43.1
55. VRS 43.2
56. VRS 44.1
57. VRS 44.2
58. VRS 45.1
59. VRS 46.1
60. VRS 47.1
61. VRS 47.2
62. VRS 48.1
63. VRS 48.2
64. VRS 49.1
65. VRS 49.2
66. VRS 50.1

67. VRS 50.2
68. VRS 51.1
69. VRS 52.1
70. VRS 53.1
71. VRS 54.1
72. VRS 55.1
73. VRS 56.1
74. VRS 57.1
75. VRS 58.1
76. VRS 59.1
77. VRS 60.1
78. VRS 61.1
79. VRS 62.1
80. VRS 63.1
81. VRS 64.1
82. VRS 65.1
83. VRS 66.1
84. VRS 67.1
85. VRS 68.1
86. VRS 69.1
87. VRS 70.1
88. VRS 71.1
89. VRS 72.1
90. VRS 73.1
91. VRS 74.1
92. VRS 75.1
93. VRS 76.1
94. VRS 77.1
95. VRS 78.1
96. VRS 79.1
97. VRS 80.1
98. VRS 81.1
99. VRS 82.1

100. VRS 83.1
101. VRS 84.1
102. VRS 85.1
103. VRS 86.1
104. VRS 87.1
105. VRS 88.1
106. VRS 89.1
107. VRS 90.1
108. VRS 91.1
109. VRS 92.1
110. VRS 93.1
111. VRS 94.1
112. VRS 95.1
113. VRS 96.1
114. VRS 97.1
115. VRS 98.1
116. VRS 99.1
117. VRS 100.1
118. VRS 101.1
119. VRS 102.1
120. VRS 103.1
121. VRS 104.1
122. VRS 105.1
123. VRS 106.1
124. VRS 107.1

Kontrollprofile:

125. VRS 1.9
126. VRS 2.9
127. VRS 3.9
128. VRS 4.9
129. VRS 5.9
130. VRS 6.9
131. VRS 7.9
132. VRS 8.9
133. VRS 9.8
134. VRS 9.9
135. VRS 10.8
136. VRS 10.9
137. VRS 11.8
138. VRS 11.9
139. VRS 12.8
140. VRS 12.9
141. VRS 13.8
142. VRS 13.9
143. VRS 14.8
144. VRS 14.9
145. VRS 15.8
146. VRS 15.9
147. VRS 16.9
148. VRS 17.9
149. VRS 18.9
150. VRS 19.9
151. VRS 20.9
152. VRS 21.9
153. VRS 22.9
154. VRS 23.9
155. VRS 24.9
156. VRS 25.9
157. VRS 26.9

## Abkürzungen

°	Grad
°C	Grad Celsius
%	Prozent
1D	eindimensional
$\alpha, \beta, \gamma, a$	Einstreuratzen
a	Hintergrundstrahlung vom Hubschrauber
A, A'	Amplituden
Abb.	Abbildung
b	kosmische Einstreuung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bi	Wismut
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
C	Konzentrationen
C <sub>H</sub>	Zählrate für Höhenstrahlung
cps	counts per second
Cs	Cäsium
$\Delta T$	Anomalien des magnetischen Feldes
$\Delta V$	(magnetische) Tagesvariationen
$\delta_T$	Residual (Magnetik)
d <sub>a</sub>	scheinbare Tiefe
D <sub>a</sub>	scheinbarer Abstand
DAGLA	Pilotstudie zu einer detaillierten aerogeophysikalischen Landesaufnahme
DVD	Digital Versatile Disc
ESE	Ostsüdost
EM	Elektromagnetik
eTh	Äquivalentkonzentration von Thorium am Boden
eU	Äquivalentkonzentration von Uran am Boden
f	Frequenz
F	Magnetisches Hauptfeld
FAS	Fugro Airborne Surveys
Fid	Zeitmarke (fiducial), entspricht 10 s bzw. 100 Werte (Records)
FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik
GGA	Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
h	Höhe des EM-Systems über Grund (Birdhöhe)
h <sub>e</sub>	effektive Höhe des Hubschraubers
HEM	Hubschrauber-Elektromagnetik

---

HMG	Hubschrauber-Magnetik
HRD	Hubschrauber-Radiometrie
Hz	Hertz
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
K	Grad Kelvin
K	Kalium
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kPa	Kilopascal
l	Liter
LEBG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
log	Logarithmus
m	Meter
MB	Megabyte
m NN	Meter über Normalnull
MeV	Megaelektronenvolt
ms	Millisekunde
mV	Millivolt
μ	Absorptionskonstante
μR/h	Mikroröntgen pro Stunde
N <sub>c</sub>	Hintergrundstrahlung
n, N	Zählrate
N, NE, NW	Norden, Nord-Ost, Nord-West
NL	nicht-linear
NLFB	Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung
NN	Normalnull
nT	Nanotesla
Ωm	Ohmmeter (Ohm*m)
p	Skintiefe
P, P <sub>0</sub>	barometrischer Druck
PDF	Portable Document Format
ppm	parts per million
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
R	Inphase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten

---

r	Abstandsparameter
$\rho$	spezifischer Widerstand
$\rho_a$	scheinbarer spezifischer Widerstand (Halbraumwiderstand)
S	Sensitivität
s	Sekunde
S, SO, SW	Süden, Südost, Südwest
STD	Standardtemperatur und -druck
t	Zeit
T	Totalintensität des magnetischen Feldes
T, T <sub>0</sub>	Temperaturen
Tab.	Tabelle
TC	Gesamtstrahlung
Th	Thorium
TK	Topographische Karte
Tl	Thallium
t <sub>L</sub>	Lebenszeit
topo	Topografie
U	Uran
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
V	Volt
W	Westen
z*	Schwerpunktstiefe

## 1. Zusammenfassung

In dem gemeinsamen Forschungsvorhaben „Bremerhavener Rinne“ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und des ehemaligen Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (NLfB), heute Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), sollten in einem für die Trinkwasserversorgung bedeutsamen Raum mit tiefen quartären Rinnensystemen und Kontakt zum im Untergrund eingedrungenen Meerwasser auf andere Gebiete übertragbare Untersuchungsverfahren und Beurteilungsgrundlagen erarbeitet werden. Hierzu führte die BGR, in 2001 Referat B 3.14, heute Fachabteilung B 2.1, im Rahmen ihres Forschungsvorhabens „Pilotstudie zu einer detaillierten aerogeophysikalischen Landesaufnahme“ (DAGLA) im Juni 2001 eine aerogeophysikalische Vermessung im Raum Bremerhaven durch. Das Messgebiet stellt die südliche Fortsetzung des Messgebietes Cuxhaven dar, das ein Jahr zuvor befliegen worden war. Jene Befliegung stand im Zusammenhang mit einem Forschungsvorhaben des Instituts für Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben (GGA), heute Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), zur Untersuchung von Transport- und Reaktionsprozessen im Küstennahbereich zwischen Cuxhaven und Bremerhaven. In beiden Gebieten zählten die Erprobung neuer geophysikalischer Untersuchungs-, Mess- und Interpretationstechniken zur Erfassung von Salzwasserintrusionen und Ablagerungen von tonigem Material zu den primären Zielen des Forschungsvorhabens.

Das Hubschrauber-Messsystem der BGR umfasst die Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD). Die Elektromagnetik liefert die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bis in maximal 150 m Tiefe, die Magnetik zeigt die Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes, deren Quellen sowohl oberflächennah als auch aus großer Tiefe stammen können, und in der Radiometrie werden die Verteilungen der Elemente Kalium, Uran und Thorium sowie die Gesamtstrahlung und die Strahlungsrate, die in der Regel aus dem oberflächennahen Bereich des Untergrundes herrühren, bestimmt.

Das Messsystem bestand in 2001 aus einem Hubschrauber als Systemträger, den simultan registrierenden geophysikalischen Messinstrumenten, die sich in einer nachgeschleppten Flugsonde (HEM und HMG) bzw. im Hubschrauber (HRD) befanden, den Navigations- und Positionierungsinstrumenten und einer Bodenstation zur Erfassung der zeitlich variablen Messgrößen (barometrischer Luftdruck, Variation des Magnetfeldes), die zur Korrektur der während des Fluges gemessenen Daten benötigt wurden.

Die mittlere Flughöhe der Messsensoren betrug 35 m für Elektromagnetik und Magnetik und 75 m für die Radiometrie. Während des Fluges wurden die Daten der HEM und HMG zehnmal pro Sekunde und die Daten der HRD einmal pro Sekunde aufgezeichnet, was bei einer Fluggeschwindigkeit von etwa 150 km/h auf einen mittleren Messpunktabstand von 4 m bzw. 40 m führte.

Die Messdaten und die dazugehörigen Positionsdaten wurden im Flug auf einer ZIP-Diskette (100 MB) gespeichert und unmittelbar nach der Befliegung einer ersten Kontrolle unterzogen. Eine weiterführende Bearbeitung aller Messdaten sowie der Daten der parallel registrierenden Bodenstation erfolgte im Feld bzw. nach Abschluss der Befliegung in der BGR in Hannover.

Das Messgebiet Bremerhaven hat eine maximale Ausdehnung von 30 km in N–S- und 25 km in W–O-Richtung. Das Befliegungsgebiet wird durch die Ortschaften Dorum und Neuenwalde im Norden, Bederkesa und Wehdel im Osten, Lunestedt und Stotel im Süden sowie durch die Weser und die Nordsee im Westen begrenzt. Die Stadt Bremerhaven liegt mitten im Messgebiet und wurde bei der Befliegung weitgehend ausgespart.

Mit 13 Messflügen, die 107 Mess- bzw. 26 Kontrollprofile mit einer Gesamtlänge von ca. 2200 Profilkilometer umfassen, wurde vom 12. bis 21. Juni 2001 eine Fläche von etwa 550 km<sup>2</sup> vermessen. Der Sollabstand der WNW–OSO-Profile betrug 250 m, derjenige der NNO–SSW-Kontrollprofile 1000 m. Im Bereich der mittelalterlichen Ringwallanlagen östlich von Sievern wurden einige Ergänzungsprofile mit einem Abstand von etwa 200 m geflogen.

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 Karten und Schnitten. Während die HEM-Daten bereits in 2002 prozessiert wurden, sind die HMG- und HRD-Daten in 2011 abschließend bearbeitet worden. Die prozessierten Daten und die thematischen Karten sind auf einer DVD abgelegt, die als **Anlage** diesem Bericht beigelegt ist.

Folgende Karten, die in Form von farbigen Isolinienplänen mit unterlegter Topographie und Fluglinien vorliegen, sind im Maßstab 1:50.000 erstellt worden:

- Fluglinienplan der vermessenen Profile (Ist-Flugwege),
- Digitales Höhenmodell,
- Scheinbare spezifische Widerstände (Halbraumwiderstände) und Schwerpunktstiefen für die fünf Messfrequenzen 383, 1832, 8630, 41.330 und 192.500 Hz,
- Horizontale Verteilung des spezifischen Widerstandes in verschiedenen Tiefen (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 und 80 m unter NN),
- Anomalien der magnetischen Totalintensität,
- Totalstrahlung, die Gehalte von Kalium, die Äquivalentkonzentrationen von Uran und Thorium sowie die Strahlungsrate am Boden.

Ferner sind für alle Messprofile die Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes basierend auf den 1D-Inversionsmodellen für im Horizontalmaßstab von 1:50.000 produziert worden.

## 2. Einleitung

Initiiert vom ehemaligen Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB), heute Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), sollte in einem für die Trinkwasserversorgung bedeutsamen Raum mit tiefen quartären Rinnensystemen und Kontakt zum im Untergrund eingedrungenen Meerwasser auf andere Gebiete übertragbare Untersuchungsverfahren und Beurteilungsgrundlagen erarbeitet werden. Hierzu führte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), in 2001 Referat B 3.14, heute Fachabteilung B 2.1, in dem gemeinsamen Forschungsvorhaben „Bremerhavener Rinne“ im Juni 2001 eine aerogeophysikalische Vermessung im Raum Bremerhaven durch.

Das Messgebiet stellt die südliche Fortsetzung des Messgebietes Cuxhaven dar, das ein Jahr zuvor im Rahmen des BGR-Forschungsvorhabens „Pilotstudie zu einer detaillierten aerogeophysikalischen Landesaufnahme“ (DAGLA) befliegen worden war (Siemon et al., 2001). Jene Befliegung stand im Zusammenhang mit einem Forschungsvorhaben des Instituts für Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben (GGA), heute Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), zur Untersuchung von Transport- und Reaktionsprozessen im Küstennahbereich zwischen Cuxhaven und Bremerhaven (Kessels et al., 2000). In beiden Gebieten zählten die Erprobung neuer geophysikalischer Untersuchungs-, Mess- und Interpretationstechniken zur Erfassung von Salzwasserintrusionen und Ablagerungen von tonigem Material zu den primären Zielen des Forschungsvorhabens.

In den Jahren 2008–2009 wurden im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben im Projekt „D-AERO“ der BGR bzw. im Projekt „Flächenhafte Befliegungen“ des LIAG Hubschrauber-Befliegungen an der deutschen Nordseeküste durchgeführt (Wiederhold et al., 2010). Die Ergebnisse dieser sowie älterer Befliegungen in Deutschland sollen in ein Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des LIAG ([https://www.fis-gp-appl.liag-hannover.de/app/fis\\_gp/start\\_language\\_select.htm](https://www.fis-gp-appl.liag-hannover.de/app/fis_gp/start_language_select.htm)) eingestellt werden. Ferner ist eine zusammenfassende Darstellung aller Befliegungsgebiete an der Nordseeküste geplant.

Das Hubschrauber-Messsystem der BGR (**Abb. 1**) umfasst die Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HMG), auch als Gammastrahlenspektrometrie bzw. Szintillometrie bezeichnet. Die Elektromagnetik liefert die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit, die Magnetik zeigt die Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes und in der Radiometrie werden die Verteilungen der Elemente Kalium, Uran und Thorium sowie die Gesamtstrahlung und die Strahlungsrate bestimmt.



**Abb. 1a:** Messhubschrauber der BGR während eines Messfluges

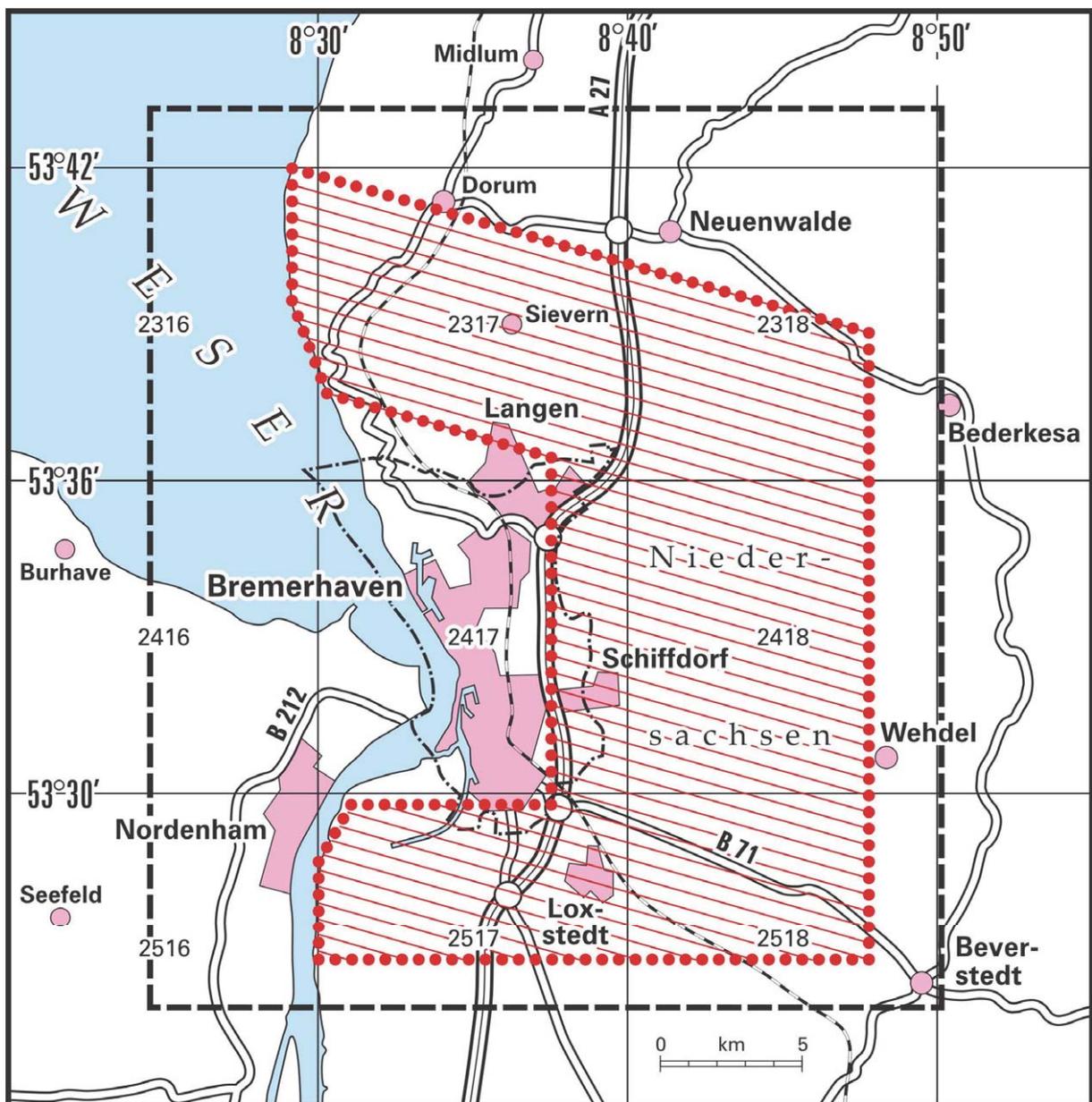
**b:** Start zum Messflug

**c:** Messgruppe Aerogeophysik der BGR im Jahr 2001

### 3. Aerogeophysikalische Vermessung

#### 3.1. Das Messgebiet

Das Messgebiet Bremerhaven hat eine maximale Ausdehnung von 30 km in N-S- und 25 km in W-O-Richtung. Das Befliegungsgebiet wird durch die Ortschaften Dorum und Neuenwalde im Norden, Bederkesa und Wehdel im Osten, Lunestedt und Stotel im Süden sowie durch die Weser und die Nordsee im Westen begrenzt. Die Stadt Bremerhaven liegt mitten im Messgebiet. **Tab. 1** enthält die Kenndaten für das Messgebiet und **Abb. 2** zeigt einen Lageplan des Messgebietes (mit roter Linie umrandete Fläche) sowie die Blattsnitte der Topographischen Karten im Maßstab 1:50.000 zur Darstellung der Ergebnisse (schwarz gestrichelt eingerahmte Fläche). Das Messgebiet erstreckt sich über die TK25-Kartenblätter 2316 bis 2518 (siehe **Abb. 2**).



**Abb. 2:** Lageskizze des Messgebietes Bremerhaven

### 3.2. Durchführung der aerogeophysikalischen Messungen

Die geophysikalische Befliegung des Messgebietes Bremerhaven wurde vom 12. bis 21. Juni 2001 vom Flugplatz Bremerhaven Luneort aus durchgeführt. Mit 13 Messflügen, die 133 Mess- bzw. Kontrollprofile mit einer Gesamtlänge von ca. 2200 Profilkilometer umfassen, wurde eine Fläche von etwa 550 km<sup>2</sup> vermessen.

Die Befliegung fand auf 107 parallelen Messprofilen bei einem vorgegebenen Profilabstand von 250 m und senkrecht hierzu auf 26 Kontrollprofilen mit deutlich größerem Profilabstand von 1000 m statt. Zusätzlich wurde ein kleines Gebiet um die mittelalterlichen Ringwallanlagen Pipinsburg und Heidenschanze östlich von Sievern auf weiteren 4 Mess- und 9 Kontrollprofilen (200er Profilnummern) mit einem Profilabstand etwa 200 m dichter befliegen. Drei weitere kurze Sonderprofile (300er Profilnummern) führten über den Wollingster See, der 4 km nordöstlich von Beverstedt liegt. Des Weiteren fand ein Sonderflug über der Nordsee (500er Profilnummern) statt, um die Kalibrierung des Messsystems zu überprüfen. In diesem Technischen Bericht werden nur die Ergebnisse der Hauptbefliegung dargestellt.

Die Messprofilrichtung im Messgebiet Bremerhaven war WNW–OSO (108,5° von N über O), die der Kontrollprofile NNO–SSW. Die nach Norden bzw. Osten geflogenen Profile werden mit geraden, die in entgegengesetzter Richtung geflogenen Profile mit ungeraden Profilnummern gekennzeichnet. Üblicherweise erhalten die Messprofile die Kennzeichnung „1“ nach der Profilnummer, die Kontrollprofile werden am Ende ihrer Beschriftung mit einer „9“ bezeichnet. Da 17 Mess- und 7 Kontrollprofile über die Stadt Bremerhaven führten, wurden diese bei der Auswertung so geteilt, dass das Stadtgebiet ausgespart werden konnte. Zur Unterscheidung erhielten die Profilschnitte im Bereich der Messprofile 28 bis 50 westlich von Bremerhaven die Kennzeichnung „2“ und die Profilschnitte im Bereich der Kontrollprofile 8 bis 15 südlich von Bremerhaven die Kennzeichnung „8“.

Die Flughöhe des Hubschraubers beträgt während der Messflüge in der Regel etwa 80 m über Grund. Über Wald, bebauten Gebieten und Hochspannungsleitungen kann die niedrige Flughöhe aus Sicherheitsgründen nicht immer eingehalten werden. Während eines Messfluges, insbesondere vor dem ersten und nach dem letzten Profil, aber auch zwischen den Profilen, steigt der Hubschrauber mit dem Messsystem von etwa 80 m über Grund auf eine deutlich größere Höhe (>350 m), um fern von störenden Einflüssen die notwendigen Kalibrierungen des HEM-Systems durchführen zu können.

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Bremerhaven hohe Ansprüche an den Piloten der Fa. Wiking Helikopter Service GmbH dar, da das Gelände zwar insgesamt recht eben, aber durch zahlreiche Hochspannungsleitungen, Straßen und Eisenbahnlinien durchzogen ist. Hier wie auch über Ortschaften und insbesondere bei der Stadt Bremerhaven ist ein Sicherheitsabstand des Messsystems über Grund einzuhalten, sodass häufige Höhenänderungen notwendig waren. Störungen der Messungen z. B. durch Starkstromleitungen oder über Ortschaften waren vorhanden, dennoch konnten die Messungen wie geplant durchgeführt werden.

Einzelheiten zum Messgebiet und den Messflügen können **Tab. 1** und dem **Anhang** entnommen werden.

Messgebiet Bremerhaven: BGR-Gebietsnummer:	Bremerhaven 87
Befliegungszeitraum	12.-21.06.2001
Größe des Messgebietes	550 km <sup>2</sup>
Gesamt-Profilkilometer	2227 km
Zahl der Messflüge	13
Bezeichnung der Messflüge	87000–87010, 87012–870013
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	35 m
Messfluggeschwindigkeit	100–150 km/h
Zahl der Messprofilflüge	9 + 1
Zahl der Messprofile	107 + 7
Länge der Messprofile	3–26 km
Richtung der Messprofile	108,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	250 m
Zahl der Querprofilflüge	3
Zahl der Kontrollprofile	26 + 9
Länge der Kontrollprofile	3–27 km
Richtung der Kontrollprofile	18,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	1.000 bzw. 200 m
Spektrometer-Steigflüge	—
Sonderflüge (Kalibrierflug EM)	1 (87011)

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

### 3.3. 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 analogen und digitalen Messwertaufzeichnung sowie den übrigen für die Durchführung der Messungen benötigten Geräten zu einem integrierten Messsystem zusammengefasst (**Tab. 3**), welches sich in einer Flugsonde oder im Hubschrauber (**Abb. 3**) bzw. in einer Referenzstation am Boden befindet.

#### 3.3.1. Messhubschrauber

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

Typ	Sikorsky S-76B (Hersteller: Sikorsky, USA)
Baujahr	1986
Antrieb	2 Turbinen Pratt & Whitney PT6B-36A mit je 1033 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 h 45
Kerosinverbrauch pro Stunde	350–400 l

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



**Abb. 3:** Der Messhubschrauber vor dem BGR-Gebäude in Hannover-Buchholz

### 3.3.2. Messausrüstung

**Tab. 3:** Komponenten des Hubschrauber-Messsystems

Geophysikalische Messsysteme	
<b>I. Elektromagnetisches 5-Frequenz-Messsystem (HEM)</b>	
<i>Flugsonde</i> ▶	
Aufgabe	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes bis zu Tiefen von etwa 150 m
Kurzbeschreibung	Analoges elektromagnetisches Messsystem mit fünf diskreten Frequenzen; die Messdaten werden zehnmal pro Sekunde erfasst. Die Spulensysteme sind in eine aus Kevlar gefertigte, ca. 10 m lange Flugsonde eingebaut.
Abstand Sende- Empfangsspulen	6,6–6,9 m (für jede Frequenz verschieden)
Sendefrequenzen	383 Hz; 1832 Hz; 8630 Hz; 41.330 Hz; 192.500 Hz
Spulenkongfiguration	Horizontal-koplanar für alle Frequenzen
Hersteller	Geotrex-Dighem, Kanada (heute: Fugro Airborne Surveys, FAS), in Zusammenarbeit mit der BGR
Gerätebezeichnung	DIGHEM V (BGR), BKS 48
<b>II. Magnetometer</b>	
Aufgabe	Messung des magnetischen Totalfeldes
Kurzbeschreibung	Mit einem optisch gepumpten Cs-Magnetometer werden die Messdaten zehnmal pro Sekunde erfasst.
Einbauort des Sensors	Im hinteren Teil der Flugsonde
Hersteller	Sensor: Geometrics, USA;      Konsole: Scintrex, Kanada
Gerätebezeichnung	Sensor: G-822A;                      Konsole: MEP 410
<b>III. Gammastrahlen-Spektrometer</b>	
Aufgabe	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
Kurzbeschreibung	Spektrometer mit 256 Kanälen und 16,8 l Kristallvolumen; die Stabilisierung erfolgt über die natürliche Thoriumstrahlung; die Messdaten werden einmal pro Sekunde erfasst.
Hersteller	Exploranium, Kanada
Gerätebezeichnung	Spektrometer: GR-820;              Kristalldetektor: GPX-1024

Flugsonde

Hubschrauber

Höhenmesser		
Hubschrauber	<b>Radarhöhenmesser</b>	
	Aufgabe	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über Grund
	Kurzbeschreibung	Über eine im Boden des Hubschraubers fest installierte Antenne werden Radarimpulse ausgesandt. Durch Messung (zehnmal pro Sekunde) der Laufzeit der Reflexionen dieser Impulse wird die Höhe bestimmt. Der Radarhöhenmesser reagiert auf die als erste eintreffenden Reflexionen, d. h. auch über einem lichten Wald wird der Abstand zu den Baumkronen gemessen und nicht die Entfernung bis zum Boden.
	Hersteller	Sperry, USA
	Gerätebezeichnung	AA-200
Flugsonde	<b>Barometrischer Höhenmesser</b>	
	Aufgabe	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über NN
	Kurzbeschreibung	Der Luftdruck wird zehnmal pro Sekunde gemessen und in Höheneinheiten (Fuß) umgerechnet.
	Hersteller	Rosemount, USA
	Gerätebezeichnung	1241A5B
Flugsonde	<b>Laserhöhenmesser</b>	
	Aufgabe	Präzise Bestimmung der Flughöhe der Messsonde über Grund
	Kurzbeschreibung	Der in der Flugsonde eingebaute Laserhöhenmesser sendet Impulse in Richtung Erdboden aus und bestimmt zehnmal pro Sekunde aus der Laufzeit der Reflexionen die Entfernung. Aufgrund des geringen Durchmessers des Laserstrahls ist dieser in der Lage, über lichten Wäldern häufig bis zum Erdboden durchzudringen und damit die Höhe der Sonde über Grund zu bestimmen.
	Hersteller	Riegl, Österreich
	Gerätebezeichnung	LD90-31K

<b>Systeme zur Navigation und Positionierung</b>	
<b>GPS/GLONASS-Navigationssystem zur Durchführung von Messflügen</b>	
Aufgabe	Anzeige der für den Piloten zur Durchführung von Messflügen wichtigen Informationen in grafischer und digitaler Form (Position, Abweichung von der Sollfluglinie, Entfernung bis zum nächsten Fixpunkt)
Kurzbeschreibung	Ein 24-Kanal-Satellitennavigationsempfänger zum gleichzeitigen Empfang von GPS- und GLONASS-Satelliten berechnet fünfmal pro Sekunde die genaue Position des Hubschraubers. Diese Position wird mit Hilfe eines Navigationsrechners zusammen mit den Messfluglinien auf einem Display angezeigt. Auf einer zweiten, kleineren Anzeige erhält der Pilot in grafischer und digitaler Form die augenblickliche seitliche Abweichung von der eingestellten Sollfluglinie sowie weitere, für den Messflug wichtige Informationen.
Hersteller	Picodas, Kanada
Gerätebezeichnung	PNAV 2100
<b>GPS-Navigationssystem</b>	
Aufgabe	Redundantes Navigationssystem, überwiegend bei Überführungsflügen eingesetzt
Kurzbeschreibung	12-Kanal-GPS-Navigationssystem älterer Bauart
Hersteller	SEL, Deutschland
Gerätebezeichnung	GLOBOS 2000
<b>GPS/GLONASS-Positionierungssystem</b>	
Aufgabe	Bestimmung der Position der EM-Sonde bzw. – bei Flügen ohne Messsonde – der Position des Hubschraubers
Kurzbeschreibung	Ein 24-Kanal-Satellitennavigationsempfänger zum gleichzeitigen Empfang von GPS- und GLONASS-Satelliten errechnet fünfmal pro Sekunde die genaue Position der Messsonde oder des Hubschraubers (abhängig davon, welche Antenne angeschlossen ist). Diese Position wird zusammen mit den Messdaten digital aufgezeichnet.
Hersteller	MAN, Deutschland
Gerätebezeichnung	NR-STA 124

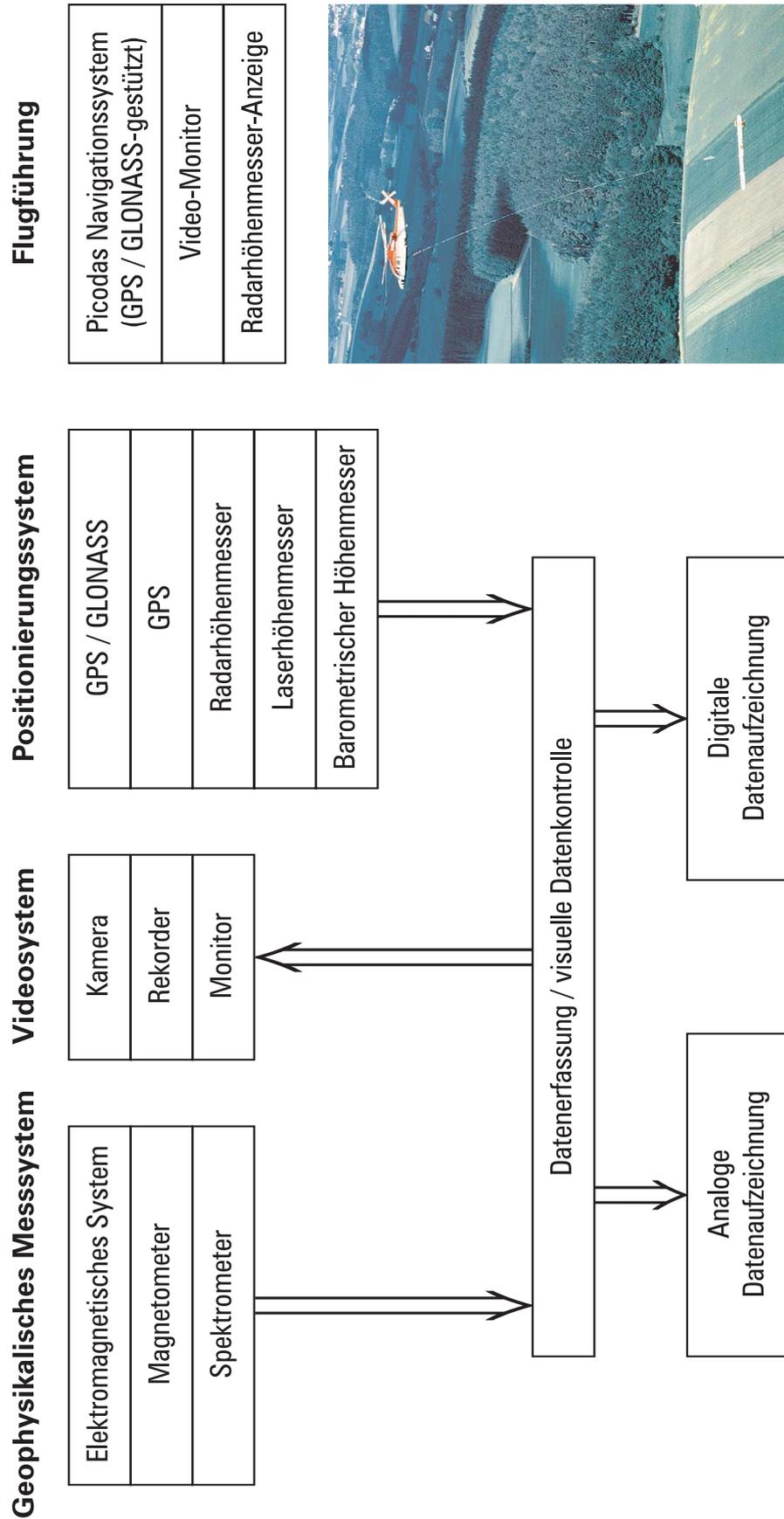
Datenerfassung / Datenaufzeichnung		
Hubschrauber	<b>Datenerfassungssystem</b>	
	Aufgabe	Digitalisierung analoger Signale; Zwischenspeicherung digitaler Daten; Zusammenstellung ausgewählter Daten zu Datenblöcken; Übertragung von Datenblöcken zum digitalen Datenrekorder sowie zum Analogrekorder
	Kurzbeschreibung	Sämtliche zu registrierenden Daten sind auf das Datenerfassungssystem geschaltet. Per Programm werden die Reihenfolge und der zeitliche Zyklus festgelegt, in welchem die Daten abgefragt werden. Danach werden diese zu Datenblöcken zusammengefasst, wobei für jeden Datenausgang ein eigener Datenblock definiert werden kann. In festgelegten Intervallen werden diese Datenblöcke zum digitalen Datenrekorder (ZIP-Drive), zum Analogrekorder sowie zu einer digitalen Datenanzeige übertragen.
	Hersteller	RMS, Kanada
	Gerätebezeichnung	DAS 8
	<b>Digitaler Datenrekorder</b>	
	Aufgabe	Speicherung der Messdaten auf einem digitalen Datenträger
	Kurzbeschreibung	Die Datenblöcke, die sowohl Daten im ASCII-Format als auch im binären Format enthalten, werden einmal pro Sekunde auf einer ZIP-Diskette gespeichert.
	Hersteller	RMS, modifiziert durch BGR
	Gerätebezeichnung	—
<b>Analogrekorder</b>		
Aufgabe	Analoge Aufzeichnung aller wichtigen Daten während des Messfluges	
Kurzbeschreibung	Bis zu 32 analoge und digitale Datenkanäle werden von einem hochauflösenden Thermodrucker in Form von Signalkurven auf 321 mm breitem Endlospapier ausgedruckt und beschriftet.	
Hersteller	RMS, Kanada	
Gerätebezeichnung	GR33A	

Sonstige Ausrüstung	
<b>Videosystem</b>	
Aufgabe	Aufzeichnung des Flugweges sowie über einen Monitor, Kontrolle der Messsonde bei Start und Landung und während des Messfluges
Kurzbeschreibung	Durch eine im Boden des Hubschraubers fest installierte Videokamera wird der Flugweg aufgenommen und über Videorekorder auf Band aufgezeichnet. Über zwei Monitore, von denen der eine im Cockpit und der zweite im Geräteschrank installiert ist, kann sowohl der Pilot als auch der Flugmessingenieur jederzeit das Flugverhalten der Messsonde beobachten.
Hersteller	Farbkamera: Grundig, Deutschland Videorekorder: Panasonic, Japan
Gerätebezeichnung	Farbkamera: FA 76; Videorekorder: VS 120
<b>Zentrale Spannungsversorgung</b>	
Kurzbeschreibung	Die 28 V DC Bordspannung des Hubschraubers wird über eine Pufferbatterie geglättet und anschließend über Sicherungen auf die einzelnen Geräte des Messsystems verteilt.
<b>Zentrale Signalverteilung</b>	
Kurzbeschreibung	Schaltung der Analogsignale auf die digitalen und analogen Aufzeichnungssysteme; digitale Anzeige wichtiger Messwerte
<b>Geräteschrank</b>	
<i>Messgeräteschrank und Box mit Spektrometerkristallen (rot).</i>	
Kurzbeschreibung	19-Zoll Geräteschrank zur Aufnahme von Steuerungs- und Aufzeichnungsgeräten des aerogeophysikalischen Messsystems. Der Geräteschrank ist über Stoßdämpfer mit einer Holzplatte verbunden, die fest mit dem Boden des Hubschraubers verschraubt ist.

Sonstige Ausrüstung	
<b>Magnetik- und Luftdruck-Bodenstation</b>	
<p><i>Bodenstation zur Messung magnetischer und barometrischer Tagesvariationen.</i></p> <p style="text-align: right;">▶</p>	
<p><b>Bodenstation</b></p> <p>Aufgabe</p>	<p>Automatische Registrierung des magnetischen Totalfeldes sowie des barometrischen Drucks zwecks späterer Korrektur der im Hubschrauber aufgezeichneten Daten</p>
<p>Kurzbeschreibung</p>	<p>Die Bodenstation ist ein mobiles, wetterfestes System mit eigener Stromversorgung zur automatischen Erfassung und Speicherung der Daten des magnetischen Totalfeldes sowie des barometrischen Drucks. Die Messfrequenz beträgt normalerweise zehn Messungen pro Sekunde. Zwecks Korrelation dieser Messungen mit den Hubschrauber-Messwerten wird zu jeder Messung die GPS-Uhrzeit aufgezeichnet.</p>
<p>Hersteller</p>	<p>Bodenstation: Eigenentwicklung der BGR</p> <p>Magnetometer: Sensor – Cs-Sensor H-8 der Fa. Scintrex, Kanada</p> <p>Zähler: CM-201 der Fa. Geometrics, USA</p> <p>Barom. Druckmesser: 1241A5B der Fa. Rosemount, USA</p>
<p>Gerätebezeichnung</p>	<p>BOKI</p>



# Blockdiagramm des aerogeophysikalischen Messsystems



**Abb. 5:** Vereinfachtes Blockdiagramm des Hubschrauber-Messsystems

### 3.4.1. Elektromagnetik

Bei dem elektromagnetischen (EM) Messverfahren werden von den Sendespulen sinusförmig 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 fünf Messfrequenzen im Bereich von 383 Hz bis 192 kHz (**Tab. 4**) ein eigenes Spulensystem benutzt, das aus horizontal-koplanar angeordneten Sende-, Empfangs-, Kompensations- und Kalibrierspulen besteht.

**Tab. 4:** Messfrequenzen und Spulenabstände der 5-Frequenz-HEM-Sonde BKS 48

Parameter	BKS 48				
	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>
Mittlere Frequenz [Hz]	383	1832	8630	41.330	192.500
Spulenabstand [m]	6,87	6,73	6,59	6,68	6,64
Spulenkongfiguration	Horizontal koplanar				

Die Kompensationsspulen sind so dimensioniert und platziert, dass die durch die Primärfelder in ihnen induzierten Spannungen denen in den Empfangsspulen entsprechen. Durch die Hintereinanderschaltung der Spulen wird die durch das Primärfeld in der Empfangsspule induzierte Spannung nahezu kompensiert. Mit Hilfe der Kalibrierspulen werden definierte Ausschläge im Messsignal erzeugt und daraus die Umrechnungsfaktoren von mV in ppm bestimmt. Die Einheit ppm wird benutzt, da das Sekundärfeld sehr viel kleiner ist als das direkt vom Sender abgestrahlte Primärfeld.

Die Größe der empfangenen Sekundärfelder sowie ihre zeitliche Verzögerung gegenüber den erzeugenden Primärfeldern werden bestimmt und aufgezeichnet. Aus diesen beiden Größen, Amplitude und Phasenverschiebung oder Real- und Imaginärteil, 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 383 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. Bebauungen, metallischen Körpern und elektrischen Installationen, welche sich 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 (>40 m) unterhalb des Hubschraubers nachgeschleppt.

### 3.4.2. 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 Bodenstation betrieben. 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.

### 3.4.3. Radiometrie

Die von natürlichen und künstlichen Radionukliden ausgehende Gammastrahlung wird mit Hilfe eines Kristalldetektors gemessen (**Tab. 3**). Der Detektor besteht aus insgesamt vier Natrium-Jodid-Kristallen, die in einer Aluminiumbox zusammengefasst im Hubschrauber montiert sind. Jeder der Kristalle hat ein Volumen von vier Litern und registriert die einfallende 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. 5** zeigt die Zuordnung der Strahlungsquellen zu den einzelnen Energiefenstern.

In der Registrierapparatur werden die Spektren über jeweils eine Sekunde aufsummiert und gespeichert. Zusätzlich werden die Zählraten in den interessierenden Energiebereichen (vgl. **Tab. 5**) 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.

**Tab. 5:** *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

#### 3.4.4. Navigations- und Positionierungssystem

Aufgabe des Navigationssystems ist es, dem Piloten alle zur Durchführung eines Messfluges notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen. Ein Navigationsrechner berechnet aus den Eckpunktkoordinaten des Messgebietes, der Profilrichtung und dem Abstand der Messprofile die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte sämtlicher Messprofile. Diese werden auf einem Display 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/GLONASS-Navigationsempfänger, dessen Antenne außen am Hubschrauber angebracht ist. Der Fehler des Navigationssystems bei der Bestimmung der geographischen Koordinaten beträgt in 95 % aller Fälle weniger als 10 m.

Aufgabe des Positionierungssystems ist es, zu jeder geophysikalischen Messung die Koordinaten zu liefern. Dafür wird ein zweiter GPS/GLONASS-Navigationsempfänger verwendet, dessen Antenne an der Flugsonde angebracht ist, und der damit die Position der Messsensoren bestimmt. Auch hier liegt der Fehler der Koordinaten in der Regel unterhalb von 10 m.

Die Flughöhe des Hubschraubers über Grund bzw. über Hindernissen (z. B. Wäldern und Gebäuden) wird 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 barometrischen Höhenmessers die Höhe des Hubschraubers über NN gemessen.

Die genaue Höhe der Messsonde 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.

#### **3.4.5. Datenaufzeichnung**

Sämtliche Daten werden während eines Messfluges digital auf einer ZIP-Diskette gespeichert. Gleichzeitig werden die wichtigsten Informationen auch analog aufgezeichnet, um während des Fluges eine ständige Datenkontrolle zu ermöglichen. Unmittelbar nach Beendigung eines Fluges dienen diese analogen Aufzeichnungen der Kontrolle der Messungen und liefern erste Hinweise auf interessante geophysikalische Ergebnisse, aber auch über technische Mängel am Messsystem. Im Anschluss an den Messflug werden die gespeicherten Daten auf einen PC überspielt, dort überprüft und weiterverarbeitet.

#### **3.4.6. Videosystem**

Die im Boden des Hubschraubers fest installierte Videokamera 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 Videoaufzeichnung des Flugweges, die durch Einblendung der GPS-Zeit und eines Recordzählers in das Videobild direkt mit der analogen und digitalen Messdatenaufzeichnung korreliert werden kann, wird für das Auffinden von oberflächennahen Anomalien direkt aus der Luft oder im Falle von Störungen in den Messdaten für deren Überprüfung mit herangezogen.

## 4. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten

Die Ziele der Datenverarbeitung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Entfernung von Störungen aus den Messdaten;
- Umrechnung der Rohdaten in physikalische Parameter;
- Darstellung der Ergebnisse in Form von Karten und Schnitten.

### 4.1. Prozessabläufe

Die aerogeophysikalischen Daten des Messgebietes wurden bereits während des Feldbetriebes und anschließend noch einmal in der BGR auf Plausibilität sowie technische und formale Korrektheit überprüft. Danach waren im Wesentlichen die folgenden Datenverarbeitungsschritte anzuwenden, die für alle Methoden gelten:

- Festlegung von Profilabgrenzungen;
- Entfernung von offensichtlichen Ausreißern (Spikes);
- Digitale Filterung um hochfrequentes Rauschen zu unterdrücken;
- Umrechnung der Messdaten in die jeweiligen darzustellenden Parameter;
- Zusammenführung der Profildaten aller Messflüge zu einem Gesamtgebietsdatei;
- Kreuzungspunktstatistik für die Daten der Mess- und Kontrollprofile zur Bestimmung und Korrektur möglicher Niveaufehler in den Daten;
- Herstellung von Isolinienplänen und thematischen Karten und Schnitten.

Methodenspezifisch sind vor allem die Umrechnungen der jeweiligen Messdaten in die gewünschten geophysikalischen Parameter, die im Folgenden ausführlicher beschrieben werden.

### 4.2. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik

Die Aufbereitung und Transformation der Messwerte R (mV) und Q (mV), d. h. des Realteils (Inphase oder 0°-Phase) und des Imaginärteils (Quadrature oder 90°-Phase), in Werte des sekundären magnetischen Feldes R (ppm) und Q (ppm) erfolgt in vier Schritten, die nacheinander für beide Komponenten aller Frequenzen durchzuführen sind:

- Korrektur von fehlerhaften Messdaten;
- Überprüfung der Phaseneinstellung und evtl. Korrektur;
- Nullniveaubestimmung und Korrektur;
- Kalibrierung und Transformation der Daten.

Anschließend werden aus den Sekundärfeld Datensatz die scheinbaren spezifischen Widerstände und Schwerpunktstiefen bzw. die 1D-Inversionsmodelle abgeleitet.

#### **4.2.1. Datenkorrektur**

Zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die HEM-Daten geglättet, zunächst durch Einsatz eines gleitenden gewichteten Mittelwertes, was auch zur Spike-Eliminierung dient, und bei Bedarf noch mit einem symmetrischen Tiefpassfilter behandelt. Störungen, die durch externe EM-Signale hervorgerufen werden (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen), werden durch geeignete Filterung bzw. Interpolation unterdrückt, wobei Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen elektrischen Installationen beruhen (vgl. 4.2.7), in der Regel in den Daten belassen werden.

#### **4.2.2. Phasenüberprüfung**

Zu Beginn jedes Messfluges erfolgt eine Überprüfung der Phaseeinstellung für alle fünf Frequenzen durch Einschalten der jeweiligen Eichspule. Bei korrekt eingestellter Phase bleibt der angezeigte Inphase-Wert der betreffenden Frequenz unverändert, während sich für den Quadrature-Wert ein Maximum ergeben muss. Ist dies nicht der Fall, wird die Phaseeinstellung des Systems so verändert, dass der angezeigte Inphase-Wert sich bei Ein- oder Ausschalten der Eichspule nicht weiter verändert.

Temperaturbedingt ändern sich die Messfrequenzen während des Messfluges geringfügig, was wiederum eine Phasenverschiebung zur Folge hat. Mit den Mittelwerten der mehrmals während des Fluges protokollierten Messfrequenzen werden die Phasenlagen für alle fünf Frequenzen bei der Datenverarbeitung überprüft und korrigiert.

#### **4.2.3. Nullniveaubestimmung**

Das Nullniveau der HEM-Daten wird in der Regel in Flughöhen  $>350$  m bestimmt, da in diesen Höhen das Sekundärfeld weitgehend abgeklungen ist. In den Bereichen mit großer Flughöhe und möglichst ruhigem Messsignalverlauf werden sogenannte Stützstellen markiert. An diesen Stellen werden die Messwerte erfasst, die noch die nicht-kompensierten Primärfeldanteile enthalten. Die Interpolationsgeraden zwischen jeweils benachbarten Stützstellen liefern die Bezugsniveaus (Nullniveaus), von denen aus die Messamplituden der Sekundärfelder zu bestimmen sind. Diese Prozedur erfolgt für jeden Messkanal mehrmals pro Flug, da das Nullniveau sich mit der Zeit ändert.

Mit der oben beschriebenen Vorgehensweise lassen sich die langfristigen, quasi-linearen Driften in den Nullniveaus beseitigen. Kurzfristige Schwankungen des Nullniveaus, die besonders in der höchsten Messfrequenz 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 Halbraumparameter (scheinbarer spezifischer Widerstand und scheinbare Tiefe, vgl. 4.2.5) berechneten Sekundärfelder als Bezugsniveau herangezogen.

#### 4.2.4. Kalibrierung des HEM-Systems

Mit großen, rechteckigen Eichspulen in der Flugsonde lassen sich während des Messfluges Eichsignale bekannter Größe am Empfänger erzeugen. Die in großer Flughöhe mehrmals aufgezeichneten Eichsignale werden automatisch bei der Datenverarbeitung in den Messdaten erkannt und ihre relativen Amplituden (in mV) mit statistischen Verfahren bestimmt. Aus den gemessenen Amplituden und den aus den Spulenparametern berechneten ppm-Werten der Eichsignale erhält man für jeden Messkanal einen über den gesamten Flug gemittelten Eichfaktor (in ppm/mV), mit dem die Rohdaten (in mV) in ppm-Werte transformiert werden (vgl. **Tab. 6**).

Die Eichfaktoren können unter Messflugbedingungen überprüft werden, wenn der spezifische Widerstand des Untergrundes bekannt ist. Dies ist beispielsweise bei Meerwasser möglich. Daher wurde ein Flug entlang der Weserfahrrinne im Wattenmeer durchgeführt. Die Auswertung ergab in Bereichen mit mehr als 10 m Wassertiefe für das Salzwasser vernünftige Widerstandswerte um  $0,3 \Omega\text{m}$  für die erste bis dritte Frequenz (383 – 8630 Hz). Bei den hohen Frequenzen lagen die Werte jedoch deutlich höher. Während die  $0,5 \Omega\text{m}$  bei der vierten Frequenz (41,3 kHz) noch durch die Vermischung mit Weserwasser zu erklären ist, gab es für die sehr hohen Werte der fünften Frequenz (192,5 kHz) keine plausiblen Erklärungen. Daher sind die Korrekturfaktoren nur für die drei niedrigen Frequenzen aus der Vorgabe eines einheitlichen spezifischen Widerstandes abgeleitet worden. Die Korrekturfaktoren für die vierte Frequenz sind aus der letzten Überprüfung während der Befliegung des Messgebietes Cuxhaven beibehalten worden. Für die höchste Messfrequenz sind die vorhandenen Korrekturfaktoren durch Plausibilitätsbetrachtungen von Messflügen über Land, bei denen die Messamplituden der höchsten Frequenz aus den der übrigen vorhergesagt wurde, überprüft und korrigiert worden. Da die gemessenen Eichsignale von Flug zu Flug variieren, sind die Eichfaktoren für jeden Messflug bestimmt worden. **Tab. 6** enthält aber die aus allen Flügen gemittelten Eichfaktoren.

**Tab. 6:** Kalibrierfaktoren für Inphase R und Quadrature Q des 5-Frequenz-HEM-Systems

Parameter	Kalibrierfaktoren									
	R <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	Q <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	Q <sub>5</sub>
Mittlere Eichsignale [mV]	334	335	830	926	735	722	541	542	500	569
Berechnete Eichsignale [ppm]	196	199	263	277	266	267	349	344	713	721
Eichfaktoren [ppm/mV]	0,58	0,59	0,32	0,30	0,36	0,37	0,64	0,63	1,43	1,27
Korrekturfaktoren	0,97	0,93	0,91	0,84	1,02	1,03	1,05	0,98	2,06	1,47
Korrigierte Eichfaktoren [ppm/mV]	0,57	0,55	0,29	0,25	0,37	0,38	0,68	0,62	2,94	1,27

#### 4.2.5. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter

Die kalibrierten Werte des Sekundärfeldes  $R$  und  $Q$  (in ppm) werden in einem ersten Schritt für alle Frequenzen 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). Die berechnete Höhe  $D_a$  kann von der gemessenen HEM-Sensorhöhe  $h$  (in m über Grund) abweichen. Der Abstand zwischen der Halbraumoberfläche und der aus den Laser- bzw. Radarhöhenmessungen abestimmten 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 Schwerpunktstiefe  $z_p^*$  (Siemon, 2001) bestimmt. Die Schwerpunktstiefe ist ein Maß für das Eindringen der induzierten Ströme in den leitenden Erduntergrund. Damit ist es möglich,  $\rho_a(z_p^*)$ -Sondierungskurven für eine erste Approximation der vertikalen Widerstandsverteilung zu berechnen.

#### 4.2.6. 1D-Inversion der HEM-Daten

Die HEM-Daten zu allen Messfrequenzen können auch in die Parameter eines geschichteten Halbraums, spezifischer Widerstand und Mächtigkeit, invertiert werden. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig, das iterativ verbessert wird, bis die Anpassung der Modelldaten an die Messdaten ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt. Das Startmodell wird automatisch aus den  $\rho_a(z_p^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet, wobei standardmäßig die Schichtgrenzen zwischen die jeweiligen (logarithmierten) Schwerpunktstiefen  $z_p^*$  gelegt und die zugehörigen Halbraumwiderstände  $\rho_a$  als Schichtwiderstände herangezogen werden. Daraus ergeben sich ebensoviel Modellschichten wie verwendete Messfrequenzen. Zusätzlich wird eine Deckschicht vorgegeben, deren Widerstand sehr hoch angesetzt wird und deren Mächtigkeit sich aus der scheinbaren Tiefe  $d_a$  der höchsten Frequenz ergibt. Mit diesem Ansatz ist es möglich, auch die nahezu nicht leitenden Bereiche mit Bewuchs (Wald, Felder, etc.) zu erfassen. Dies ist notwendig, da die (scheinbare) Erdoberfläche aus den Laser- bzw. Radarhöhenmessungen abgeleitet wird, die den Abstand zum ersten Reflektor (z. B. Baumkronen) erfassen (vgl. 3.4.4). Abweichend von diesem Standardstartmodell wurden hier die Schichtgrenzen tiefer gelegt, wobei die kleinste Schwerpunktstiefe nicht und die größte um den Faktor 1,5 bzw. die übrigen anteilig erhöht wurden.

Die Inversionen sind zunächst analog zu dem benachbarten Messgebiet Cuxhaven für vier Frequenzen, d. h. ohne die höchste Messfrequenz, durchgeführt worden. Die Ergebnisse hierzu sind auf beiliegender DVD enthalten. Des Weiteren liegen auch Inversionsergebnisse zu dem Standardstartmodell, zu einem extremen Startmodell (schärferes Abbruchkriterium und größere Tiefen, vgl. Siemon, 2000) sowie für fünf Messfrequenzen vor. Diese Ergebnisse sind nicht auf der DVD abgelegt, können aber im Fachbereich 2.1 eingesehen werden.

#### **4.2.7. 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. 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 bei den Halbraumparametern durch eine Verringerung des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunktstiefe aus. In den Karten ist daher oft eine Korrelation von niedrigen Halbraumwiderständen bzw. geringeren Schwerpunktstiefen mit Ortschaften oder Straßen zu beobachten, die wegen der Zunahme des anthropogenen Einflusses mit abnehmender Frequenz vor allem in den Karten der niedrigen Frequenzen auftreten.

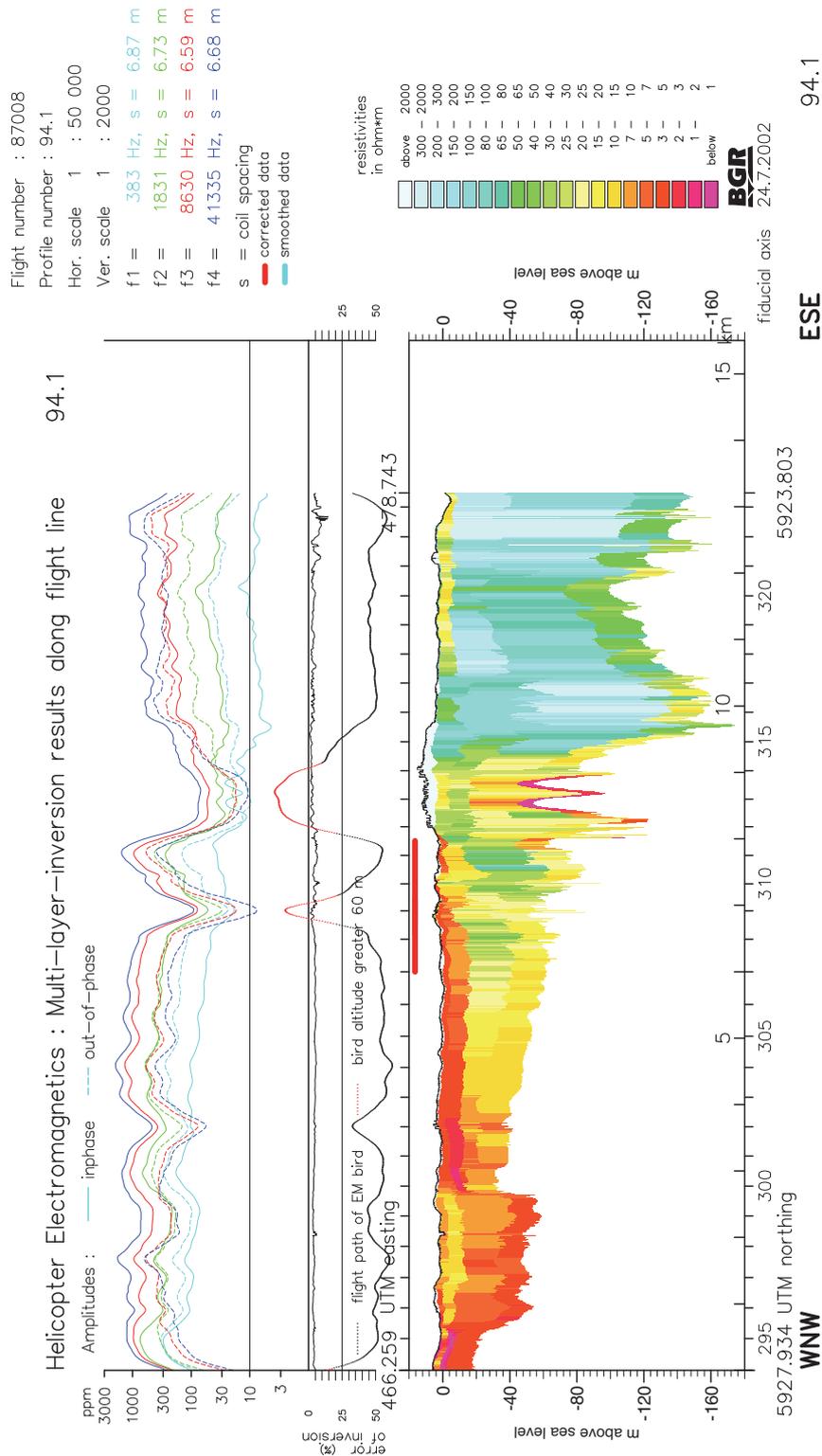
Auch bei der 1D-Inversion treten anthropogenen Effekte auf, da mit dem verwendeten Modell (geschichteter Halbraum) diese dreidimensionalen Effekte nicht ausreichend erklärt werden können (Sengpiel & Siemon, 1998). In den Vertikalschnitten (siehe 4.2.9) äußern sich diese Effekte aufgrund der begrenzten Ausdehnung und der Zunahme des anthropogenen Einflusses mit abnehmender Frequenz meist als seitlich abtauchende Bereiche (siehe **Abb. 6** zwischen den Zeitmarken 312 und 314) mit sehr niedrigen spezifischen Widerständen. Die anthropogenen Quellen, die sich im Allgemeinen nahe der Erdoberfläche befinden, erscheinen daher in die Tiefe projiziert.

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 topographischen Karten, einer Videofilmauswertung oder einer Ortsbegehung erfolgen.

#### **4.2.8. Statistische Niveaueinpassung**

Zur Erkennung von möglichen Niveaufehlern in den Daten der verschiedenen Messflüge können die Differenzen der Halbraumparameter (hier: logarithmierte Halbraumwiderstände und scheinbare Tiefen) sowie der topographischen Höhen an den Schnittpunkten der Messprofile mit den Kontrollprofilen bestimmt und statistisch bearbeitet werden. Durch Anbringung der Korrekturwerte wird eine Niveaueinpassung der Daten eines Messfluges oder von einzelnen Profilen erreicht.

Im Messgebiet Bremerhaven war eine statistische Niveaueinpassung der Halbraumparameter nicht notwendig. Es musste nur eine statistische Niveaueinpassung für die topographischen Höhen durchgeführt werden, wobei die Korrekturen profilweise erfolgte. Darüber hinaus war aufgrund eines Vergleichs mit den Höhenwerten der topographischen Karten eine Anhebung aller topographischen Höhen um 2 m erforderlich. Verbliebene kleinräumige Niveaueinpassungen der Linien ohne Kontrollprofile wurden mit einem Micro-Levelling (wie 4.3.4 beschrieben) behoben.



**Abb. 6:** Beispiel für eine Vertikalsektion. Dargestellt sind oben die HEM-Daten für vier Messfrequenzen (f1 bis f4) und unten 1D-Inversionsmodelle für jeden der etwa 1500 Messpunkte des mehr als 13 km langen Profils 94.1. Die Zuordnung der Farben zu den spezifischen Widerständen ist der nebenstehenden Legende zu entnehmen. Die Inversionsmodelle sind bezüglich ihrer topographischen Höhe von W nach O angeordnet. Über den Modellen ist der Flugweg des HEM-Sensors und darüber der Anpassungsfehler der Inversion aufgetragen.

#### 4.2.9. Präsentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der HEM werden als Karten und Vertikalschnitte präsentiert. Die Kartenproduktion ist in **Kapitel 5** beschrieben. Je zwei Karten der Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand und Schwerpunkstiefe sind für jede der fünf Messfrequenzen erstellt worden. Die Karten der spezifischen Widerstände für acht Tiefen unter NN sind aus den Inversionsergebnissen abgeleitet worden.

Die Inversionsmodelle sind auch entlang der Fluglinien als Vertikalschnitte dargestellt. Hierzu wurden von jedem der regulären, z. T. geteilten 107 Messprofile und 26 Querprofile Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:50.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:2000 hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen Modellen mit fünf Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topographischen Höhe längs eines Profils nebeneinander gestellt werden. Die topographische Höhe ergibt sich aus der barometrischen Höhe des Messhubschraubers abzüglich der Summe aus der mittleren effektiven Kabellänge und der Laserhöhe des EM-Sensors über Grund bzw. abzüglich der Radarhöhe des Hubschraubers über Grund, falls die Laserhöhenmessung gestört sein sollte. Über den Modellen sind zusätzlich der Flugweg des EM-Sensors, Informationen zur Datenbearbeitung, der Anpassungsfehler der Inversion und die Messdaten dargestellt, die in einer Legende erklärt werden (**Abb. 6**).

### 4.3. Datenverarbeitung in der Magnetik

#### 4.3.1. 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:

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

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

$\delta_T(r,t)$  = anthropogener Anteil des magnetischen Feldes.

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 anthropogenen Anteile  $\delta_T(r,t)$  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, Stromleitungen, Industrieanlagen) sich meist an der Erdoberfläche befinden.

#### **4.3.2. 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 entsprechen Messzeit.

#### **4.3.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen**

Die Referenzstation zur Erfassung der magnetischen Tagesvariationen  $\Delta V(t)$  befand sich 16 km südlich des Flugplatzes Bremerhaven Luneort in einem Waldgebiet nordöstlich der Ortschaft Hagen.  $\Delta V(t)$  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 (Filterbreite 20).

#### **4.3.4. Statistische Niveauanpassung**

Nach Abzug des Hauptfeldes und der Tagesvariationen von den gemessenen magnetischen Werten wird eine statistische Niveauanpassung vorgenommen. Dazu werden die Differenzen an den Kreuzungspunkten zwischen Fluglinien und Kontrolllinien berechnet und flugweise gemittelt. Die gemittelten Werte werden zur Korrektur von Niveauunterschieden verwendet. Solche können auftreten wenn sich während der Kampagne Änderungen in der Konfiguration der Sensoren von Basisstation oder der Flugsonde ergeben haben.

Verbleibende, meist geringe Niveauunterschiede können, abhängig von der Flugrichtung, durch das Eigenfeld des Hubschraubers auftreten (heading error). Diese werden durch ein nachfolgendes Micro-Levelling eliminiert. Das Micro-Levelling basiert auf dem Gitter der Fluglinien-Daten, in welchem Niveaufehler durch Anwendung eines Butterworth-Hochpassfilters (Wellenlänge 500 m, Grad 4) und eines direktionalen Kosinusfilters (Azimuth 90°, Grad 1) identifiziert werden. Ergebnis der Filterung ist ein Fehler-Gitter, welches entlang der Fluglinien abgetastet wird. Die abgetasteten Fehlerwerte werden mit einem Spline-Filter (Glätte 1,05, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den Originaldaten abgezogen. Das resultierende  $\Delta T$ -Gitter aus den niveukorrigierten Daten weist praktisch keine Niveaufehler mehr auf. Schließlich werden die Daten der Kontrollprofile an das Gitter der niveukorrigierten Fluglinien-Daten angepasst. Hierzu werden Fehlerwerte über ein Polynom ersten Grades angenähert und von den Kontrollprofil-Daten abgezogen.

In (teilweise) besiedelten Gebieten sind Karten der magnetischen Anomalien oft durch anthropogene Anomalien großer Amplitude dominiert. Diese starken Anomalien wirken störend während des Micro-Levellings und bei der Identifizierung schwacher geogener Anomalien. Daher wird vor dem Micro-Levelling ein halbautomatischer Filterprozess zur Identifizierung anomaler Daten im  $\Delta T$ -Gitter angewendet. Anomalien werden detektiert wenn die Differenz zwischen Median-gefiltertem Gitter und Original-Gitter einen bestimmten Schwellwert überschreitet, wobei ein manuelles Eingreifen in den Prozess möglich ist. Das resultierende Gitter ist weitgehend von anthropogenen Anomalien befreit und dient als Ausgangsbasis für den Micro-Levelling Prozess. Bereiche, die während

der Filterung entfernt wurden, können nach dem Micro-Levelling wieder eingefügt werden, indem aus umliegenden Bereichen interpolierte Fehlerwerte auf sie angewendet werden.

Aus den niveauekorrigierten Daten werden zwei finale  $\Delta T$ -Gitter erstellt. Ein Gitter basiert auf sämtlichen Daten einschließlich der anthropogenen Anomalien. Ein zweites Gitter basiert auf den von anthropogenen Anomalien befreiten Daten und ist zusätzlich Hochpass-gefiltert. Die Hochpass-Filterung (Wellenlänge 5 km) wird zur Eliminierung größerer regionale Trends im Magnetfeld angewendet, welche schwache und kleinräumige geogene magnetische Anomalien maskieren können. Das Gitter wird schließlich durch Anwendung eines Medianfilters (Radius 2 Gitterzellen) leicht geglättet.

#### **4.3.5. Präsentation der Ergebnisse**

Die Kartendarstellungen der Magnetfeldanomalien sind in **Kapitel 5** beschrieben. Die für die Produktion der Karte verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte (Fluglinie) dargestellt. Die weißen Punkte markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind.

#### **4.4. Datenverarbeitung in der Radiometrie**

Die natürliche Gammastrahlung der Gesteine und Böden beruht im Wesentlichen auf den Radioelementen Kalium (K), Uran (U) und Thorium (Th). Entsprechend den Empfehlungen der IAEA (1991) sind die mit dem Gammastrahlenspektrometer im Hubschrauber gemessenen Zählraten in Konzentrationen von K, U und Th im oberen Erdreich umzurechnen. Die Radioisotope U und Th selbst emittieren keine Gammastrahlen. Um eine Abschätzung der Konzentrationen für U und Th zu erhalten, wird mit dem Gammastrahlenspektrometer die abgegebene Gammastrahlung ihrer radioaktiven Tochterprodukte Bi-214 (Uran) und Tl-208 (Thorium) gemessen. Da diese Abschätzung unter der Annahme vorgenommen wird, dass zwischen den Elementen U bzw. Th und ihren Tochterprodukten ein Gleichgewicht vorhanden ist, werden die berechneten Konzentrationen als Äquivalentgehalte von Uran (eU) und Thorium (eTh) bezeichnet. Für die Ermittlung der Konzentrationen aus den Rohzählraten sind eine Reihe von Arbeiten zur Kalibrierung des Spektrometers sowie in der Datenverarbeitung erforderlich:

Spektrometerkalibrierung:

- Bestimmung der Hintergrundzählraten durch Flüge über ausgedehnten Wasserflächen
- Bestimmung von Einstreuratzen zur Compton-Korrektur mit Hilfe von Kalibrierkörpern
- Bestimmung von Absorptionskoeffizienten und Detektor-Empfindlichkeiten mit Hilfe von Flügen über Kalibrierstrecken
- Bestimmung von Vegetations-Abschwächungskoeffizienten

Datenverarbeitung:

- Energiekalibrierung
- Verminderung des Rauschens
- Bestimmung der Detektorhöhe über Grund und der effektiven Höhe
- Registrierzeitkorrektur
- Korrektur der Hintergrundstrahlung

- Compton (Stripping) Korrektur
- Reduktion auf Standardflughöhe
- Berechnung von Radioelement-Konzentrationen und Strahlungsrate

#### **4.4.1. Energiekalibrierung**

Die spektrale Stabilität von Gammaskpektrometern ist nicht perfekt. Auf Grund von Temperatureffekten kann die Energie-Kanal-Zuordnung während eines Fluges leicht driften. Es wird daher in der Datenverarbeitung eine Energiekalibrierung der aufgezeichneten Spektren vorgenommen. Die Energie-Kanal-Zuordnung eines Spektrometers wird folgendermaßen ausgedrückt:

$$ch = E / G + \text{offs},$$

mit

- ch = Kanalnummer,
- E = Energie in keV,
- G = Verstärkungskonstante des Spektrometers in keV/Kanal,
- offs = Kanal-Offset.

Ein 256-Kanal-Spektrometer besitzt eine nominelle Verstärkung von 12 keV/Kanal und einen Offset von 0 Kanälen. Um die aktuelle Verstärkung und den aktuellen Offset des Spektrometers zu ermitteln, wird für jede Fluglinie ein mittleres Spektrum berechnet. Die Kanal-Positionen der bekannten Energiemaxima im gemittelten Spektrum (K, U, Th) können dann zur Berechnung von aktueller Verstärkung und Offset des Instrumentes für das analysierte Zeitfenster (Fluglinie) verwendet werden. Auf diesen Werten basierend werden die Spektren auf ein nominelles 12 keV/Kanal-Raster abgebildet.

#### **4.4.2. Verminderung des Rauschens**

Auf Grund des relativ großen Abstandes zwischen den Quellen der radioaktiven Strahlung an der Erdoberfläche und dem Strahlungsdetektor im Hubschrauber sind die Zählraten in der Aerogamma-spektrometrie allgemein gering. Dies führt dazu, dass die aufgenommenen Gammaskpektren, und damit auch die daraus ermittelten Radionuklidgehalte entlang der Profillinien, starkes statistisches Rauschen aufweisen. In der Datenaufbereitung kommt daher ein von Hovgaard & Grasty (1997) entwickeltes Verfahren zur Reduktion des Rauschens zur Anwendung. Das NASVD-Verfahren (noise adjusted singular value decomposition) basiert auf einer statistischen Analyse sämtlicher Spektren eines Messgebietes und einer Rekonstruktion von Spektren mit vermindertem Rauschen über Hauptkomponentenanalyse. Als Ergebnis erhält man geglättete Spektren, aus denen die Zählraten der drei interessierenden Energiefenster (vgl. **Tab. 6**) neu bestimmt werden. Weiterhin kommt ein von Mathis (1987) vorgestellter adaptiver Filter zur Glättung der Zählraten-Kanäle zur Anwendung.

#### **4.4.3. Detektorhöhe über Grund und effektive Höhe**

Für die korrekte Bestimmung von Radioelement-Konzentrationen aus Hubschrauber-Radiometrie-messungen ist die Kenntnis des Abstandes zwischen der Strahlungsquelle am Boden und dem Detektor im Hubschrauber von entscheidender Bedeutung. Das von der BGR verwendete Hubschrauber-Messsystem ist mit zwei Höhenmessern ausgestattet: einem Radarhöhenmesser im Hubschrauber und einem Laserhöhenmesser in der Flugsonde. Grundsätzlich werden die Daten des Radarhöhen-

messers zur Bestimmung der Detektorhöhe über Grund verwendet, da dieser sich auf der gleichen Plattform wie der Detektor befindet. Allerdings sind die Daten des Laserhöhenmessers genauer und enthalten auch Informationen über das Vorhandensein und ggf. die Dicke von Vegetationsschichten (meist Wald) am Boden unterhalb des Systems. Während der Radarhöhenmesser in bewaldeten Gebieten die Höhe der Baumkronen anzeigt und den Abstand zum Boden unterschätzt, erlaubt der Laserhöhenmesser sowohl eine Bestimmung des wahren Abstandes zum Boden als auch eine Abschätzung der Vegetationsdicke. Diese Informationen sind für die Anwendung einer Vegetationskorrektur auf die gemessenen Zählraten erforderlich. In der Datenverarbeitung erfolgt daher eine Zusammenführung der Daten von Radar- und Laserhöhenmesser, wodurch eine genauere Bestimmung der Detektorhöhe über Grund und der Vegetationsdicke ermöglicht wird.

Für die Anwendung der Datenanalysetechniken der Radiometrie ist es notwendig, die gemessenen Daten an Standardbedingungen anzupassen. Dies schließt die Anpassung der gemessenen Höhe des Hubschraubers, und damit des Detektors, über Grund an Standardtemperatur und -druck (STD) ein. Die Höhenkorrektur wird nach der Empfehlungen der IAEA (2003) durchgeführt:

$$h_e = (h_r \cdot P \cdot T_0) / (P_0 \cdot (T + T_0)),$$

mit:

- $h_e$  = effektive Höhe über Grund (in m) unter STD-Bedingungen,
- $h_r$  = Höhe des Hubschraubers über Grund (in m),
- $T_0$  = 273,15 K, Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala,
- $T$  = Lufttemperatur (in °C),
- $P_0$  = 101,325 kPa; mittlerer Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe,
- $P$  = im Hubschrauber gemessener barometrischer Druck (in kPa).

#### 4.4.4. Registrierzeitkorrektur

Ein Spektrometer benötigt eine bestimmte Zeit, um einen Impuls vom Detektor zu verarbeiten. Während dessen werden eingehende Impulse zurückgewiesen. Die als „Live-time“ bezeichnete Zeit, in der das Spektrometer für eingehende Impulse empfangsbereit ist, wird durch das System mitregistriert und dient zur Korrektur der aufgenommenen Zählraten. Die Korrektur ist gewöhnlich klein, kann aber bedeutend in Gebieten mit hoher Radioaktivität sein. Die Registrierzeitkorrektur wird durchgeführt, indem die gemessenen Zählraten auf den Messzyklus von einer Sekunde hochgerechnet werden (IAEA, 2003):

$$N = n \cdot 10^3 / t_L$$

mit:

- $N$  = korrigierte Zählrate,
- $n$  = registrierte Roh-Zählrate,
- $t_L$  = Live-Time (in ms)

#### 4.4.5. Hintergrundstrahlung

Die kosmische Strahlung (Höhenstrahlung) ist eine hochenergetische (>3 MeV) Partikelstrahlung aus dem Weltall, die auf die äußere Erdatmosphäre auftrifft und dort durch Wechselwirkung mit Gasmolekülen Partikelschauer mit einer hohen Anzahl von Sekundärteilchen auslöst. Die Strahlung dieser Teilchen streut in das gemessene Gammaskpektrum ein. Weiterhin geht vom Hubschrauber und vom Messsystem eine geringe, als konstant angenommene radioaktive Strahlung aus. Die Summe der Strahlung dieser beiden Komponenten bezeichnet man als Hintergrundstrahlung. Sie verfälscht die Messung der vom Erdboden ausgehenden Gammastrahlung und muss korrigiert werden. Die erforderlichen Korrekturfaktoren werden durch Messflüge in unterschiedlichen Höhen zwischen etwa 100 und 3500 m über ausgedehnten Wasserflächen ermittelt. Die Korrektur der Hintergrundstrahlung erfolgt nach:

$$N_c = a + b \cdot C_H$$

mit:

- $N_c$  = kosmische und Messsystem-Hintergrundstrahlung für jeden Messkanal,
- $a$  = Hintergrundstrahlung des Hubschraubers inkl. des Messsystems für jeden Messkanal,
- $b$  = kosmische Einstreuung für jeden Messkanal,
- $C_H$  = Zählrate im Höhenstrahlungskanal.

Zur Bestimmung der Werte  $a$  und  $b$  wurde im Jahre 2008 Messflüge in verschiedenen Höhen über der Nordsee durchgeführt (Tab. 7). Mit den Messdaten wurden die Korrekturgrößen für die Kanäle K, U, Th und TC (Gesamtstrahlung) mittels linearer Regression der Zählraten dieser Kanäle gegen die Zählraten der kosmischen Strahlung bestimmt.

**Tab. 7:** Korrekturfaktoren Hintergrundstrahlung

Kanal	Messsystem a [cps]	kosmische Einstreuung b
TC	31,09	0,722
K	5,51	0,041
U	0,48	0,033
Th	0,33	0,041

#### 4.4.6. Compton-Korrektur

Die Streuung von Gammaquanten beim Durchgang von Materie wird als Compton-Effekt bezeichnet. Praktisch hat dies zur Folge, dass ein bestimmter Anteil z. B. von der Thorium-Strahlung in die niedrigeren Energiebereiche des Uran- und Kalium-Fensters einstreut. Ebenso streuen Uran-Anteile in den Kalium-Kanal. Der umgekehrte Effekt, d. h. die Einstreuung in höhere Energiekanäle existiert auch, ist aber deutlich geringer. Die Koeffizienten der Einstreuratzen (stripping ratios) wurden im Jahre 2008 über Kalibrierkörper der BGR (Grasty et al., 1991) bestimmt und entsprechend den Empfehlungen der IAEA (2003) angebracht. Die Werte sind in Tab. 8 aufgelistet.

**Tab. 8:** Koeffizienten der Einstreuratzen

	<b>Einstreurate</b>	<b>Wert</b>
Th → U	$\alpha$	0,2485
Th → K	$\beta$	0,3852
U → K	$\gamma$	0,6599
U → Th	a	0,0395

Die Werte von  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  steigen mit der Höhe des Hubschraubers über Grund an und müssen daher unter STD-Bedingungen korrigiert werden:

$$\alpha_e = \alpha + 0,00049 \cdot h_e$$

$$\beta_e = \beta + 0,00065 \cdot h_e$$

$$\gamma_e = \gamma + 0,00069 \cdot h_e$$

wobei  $h_e$  die äquivalente Höhe über Grund (in m) unter STD-Bedingungen ist. Um die Netto-Zählraten der jeweiligen Kanäle zu erhalten, muss von den gemessenen Werten der eingestreute Anteil abgezogen werden:

$$N_{Th(corr)} = (N_{Th} - aN_U) / (1 - a\alpha)$$

$$N_{U(corr)} = (N_U - \alpha N_{Th}) / (1 - a\alpha)$$

$$N_{K(corr)} = N_K - \beta N_{Th(corr)} - \gamma N_{U(corr)}$$

Dabei repräsentieren  $N_{Th}$ ,  $N_K$  und  $N_U$  die bezüglich der Hintergrundstrahlung unter STD-Bedingungen korrigierten Netto-Zählraten,  $N_{Th(corr)}$ ,  $N_{U(corr)}$  und  $N_{K(corr)}$  die bezüglich der Einstreuratzen korrigierten Zählraten und  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  und a die Einstreuratzen unter STD-Bedingungen. Für die Gesamtstrahlung wird keine Compton-Korrektur durchgeführt (vgl. IAEA, 2003).

#### 4.4.7. Zählraten in Standardflughöhe

Die Intensität der vom Boden stammenden Gammastrahlung nimmt durch Absorption in der Luft mit der Höhe über Grund ab. Die energieabhängige Absorptionskonstante  $\mu$  der Luft wird bestimmt wie in IAEA (1991) beschrieben. Die Absorption hängt hauptsächlich von der Dichte und Feuchtigkeit der Luft ab. Im Uran-Kanal ist sie zusätzlich von veränderlichen Radon-Konzentrationen in Luft beeinflusst.

Mit den Absorptionskonstanten  $\mu$  werden die in einer Höhe h gemessenen Zählraten  $N_m$  (nach Berücksichtigung der Hintergrundstrahlung und der der Einstreuratzen) umgewandelt in Strahlungsintensitäten bei einer Normhöhe von  $h_0 = 80$  m:

$$N_s = N_m \cdot e^{-\mu(h_0 - h_e)}$$

mit:

$\mu$  = Absorptionskoeffizient für das jeweilige spektrale Fenster,

$N_m$  = beobachtete Zählrate bei effektiver Höhe  $h_e$ .

$N_s$  = korrigierte Zählrate bezogen auf die Standardhöhe  $h_0$ .

Die Absorptionskoeffizienten  $\mu$  (**Tab. 9**) wurden über einer Teststrecke in Allensteig, Österreich, im Jahre 2003 mit Hilfe von Testflügen in unterschiedlichen Höhen bestimmt.

**Tab. 9:** Absorptionskoeffizienten

Spektralfenster	Absorptionskoeffizienten $\mu$ (in 1/m bei STP)
K	0,007733
U	0,008132
Th	0,005784
TC	0,006468

#### 4.4.8. Berechnung von Radioelement-Konzentrationen und Strahlungsrate

IAEA (2003) empfiehlt die Umrechnung der Zählraten der drei Gammastrahler in Äquivalentkonzentrationen am Boden sowie die Angabe der Strahlungsrate (Exposure Rate) am Boden. Dies hat den Vorteil, dass die Ergebnisse von Messungen verschiedener Instrumente (z. B. mit unterschiedlichem Kristallvolumen) untereinander vergleichbar sind. Als Ergebnis erhält man den Gehalt des Radioelementes K (in %) und die Äquivalentgehalte der beiden Radioelemente eU (in ppm) und eTh (in ppm) in den oberflächennahen Bodenschichten. Die Umwandlung der Zählraten in Konzentrationen am Boden erfolgt nach folgender Beziehung:

$$C = N_s/S$$

mit:

- C = Konzentrationen der Elemente (K in %, eU in ppm, eTh in ppm)
- $N_s$  = korrigierte Zählrate im jeweiligen Energiefenster
- S = Sensitivität der Strahlungsquelle im Energiefenster (vgl. **Tab. 6**)

Die erforderlichen Eichfaktoren (Sensitivitäten S, **Tab. 10**) wurden mit Hilfe von Testmessungen über einer Eichstrecke in Allensteig, Österreich ermittelt.

**Tab. 10:** Sensitivitäten

Sensitivität	
1 % K	= 28,42 cps
1 ppm eU	= 2,92 cps
1 ppm eTh	= 1,96 cps

Die so ermittelten Äquivalentgehalte beziehen sich auf eine unendlich ausgedehnte, gleichmäßig strahlende Ebene. Sie können sich von den wahren Konzentrationen der Elemente im Boden unterscheiden, insbesondere wenn die strahlenden Flächen unregelmäßig verteilt sind oder durch Einfluss von Bodenfeuchte. Weiterhin kann der Radongehalt der Luft während einer Messung stark schwan-

ken. Radon wirkt störend bei radiometrischen Messungen, insbesondere bei der Bestimmung von Urangelhalten, da Radon-Strahlung im Uran-Energiefenster registriert wird. Aktuell ist in der Datenverarbeitung keine Korrektur der Radonstrahlung implementiert, in den Karten der Urangelhalte angegebene Absolutwerte sind daher unter Vorbehalt zu betrachten.

Fehler in den errechneten Radionuklidkonzentrationen ergeben sich auch in Gebieten wo eine Vegetationsbedeckung (meist in Form von Bäumen in bewaldeten Gebieten) einen Teil der vom Boden stammenden Strahlung absorbiert. Eine Korrektur des Vegetationseinflusses ist möglich unter der Annahme, dass die Absorption exponentiell mit der Dicke der Vegetation zunimmt und Vegetationsdicken bekannt sind:

$$C_D = C_0 \cdot e^{-\mu_V D}$$

mit:

- $C_0$  = Element-Konzentration am Boden,
- $C_D$  = Element-Konzentration bestimmt in Anwesenheit von Vegetation,
- $D$  = Vegetationsdicke,
- $\mu_V$  = linearer Abschwächungskoeffizient der Vegetation.

Werte für  $\mu_V$  (Tab. 11) wurden empirisch bestimmt unter Verwendung umfangreicher Datensätze aus Norddeutschland. Die Vegetationsdicken wurden aus Daten des Laserhöhenmessers ermittelt. Zusätzlich zu den drei Radionukliden wurde ein Abschwächungskoeffizient für die Totalstrahlung empirisch ermittelt.

**Tab. 11:** Lineare Abschwächungskoeffizienten  $\mu_V$  von Vegetation

Element	$\mu_V$
K	0,012
U	0,008
Th	0,011
TC	0,006

Die Strahlungsrate am Erdboden wird berechnet als Funktion der K-, U-, and Th-Konzentrationen:

$$E = 1,505 \cdot K + 0,653 \cdot eU + 0,287 \cdot eTh$$

E = Strahlungsrate am Erdboden [ $\mu\text{R/h}$ ]

mit:

- 1 % K = 1,505  $\mu\text{R/h}$ ,
- 1 ppm eU = 0,653  $\mu\text{R/h}$ ,
- 1 ppm eTh = 0,287  $\mu\text{R/h}$ .

#### **4.4.9. Statistische Niveauanpassung und Glättung**

Vor der Vegetationskorrektur wird eine statistische Niveauanpassung der Konzentrations- und Totalstrahlungs-Daten vorgenommen. Dazu werden die Differenzen an den Kreuzungspunkten zwischen Fluglinien und Kontrolllinien berechnet und flugweise gemittelt. Die gemittelten Werte werden zur Korrektur von Niveauunterschieden verwendet. Solche können auftreten, wenn sich während der Kampagne Änderungen in den Umweltbedingungen (z.B. Boden-, Luftfeuchte, Radongehalt der Luft) ergeben haben.

Verbleibende, meist geringe Niveauunterschiede werden durch ein nachfolgendes Micro-Levelling eliminiert. Das Micro-Levelling basiert auf dem Gitter der Flugliniendaten, in welchem Niveaufehler durch Anwendung eines Butterworth-Hochpassfilters (Wellenlänge 300 m, Grad 8) und eines direktionalen Kosinusfilters (Azimuth 90°, Grad 1) identifiziert werden. Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches entlang der Fluglinien abgetastet wird. Die abgetasteten Fehlerwerte werden mit einem Spline-Filter (Glätte 0,65 / 0,5, Spannung 0,5 / 0,5 für Fluglinien / Kontrollprofile) stark geglättet und dann von den Originaldaten abgezogen. Die resultierenden Gitter aus den niveaukorrigierten Daten weisen praktisch keine Niveaufehler mehr auf. Schließlich werden die Daten der Kontrollprofile an das Gitter der niveaukorrigierten Flugliniendaten angepasst. Hierzu werden Fehlerwerte über einen Spline angenähert und von den Kontrollprofil-Daten abgezogen.

Die aus den niveaukorrigierten Daten erzeugten Gitter werden schließlich durch Anwendung eines zweidimensionalen Medianfilters mit Radius 1 (für Kalium, Thorium und Totalstrahlung), bzw. 2 (für Uran) leicht geglättet. Die gefilterten Gitter werden entlang des Flugweges abgetastet und die abgetasteten Daten als Grundlage für die Vegetationskorrektur und die Berechnung der Strahlungsrate verwendet.

#### **4.4.10. Präsentation der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der radiometrischen Messungen werden in Form von Karten der Äquivalentkonzentrationen der Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie der Gesamtstrahlung und der Strahlungsrate am Erdboden (vgl. **Kapitel 5**) dargestellt. Die für die Produktion der Karte verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Fluglinie dargestellt. Die weißen Punkte auf den Fluglinien markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind.

### **4.5. Kartenherstellung mit GEOSOFT-Software**

Für jeden Ergebnisparameter sind farbige Isolinienkarten im Maßstab 1:50.000 hergestellt worden, wobei eine Gitterzellengröße (Grid) von 50 und ein Suchradius von 250 m gewählt wurde. Als Kartengrundlage dienten die in Kapitel 5 angeführten Blätter der vergrößerten Topographischen Karte DTK 100-V. Des Weiteren sind die Fluglinien ebenfalls auf allen Karten enthalten.

Die Zusammenstellung von Geophysik, Topografie und Legendeninformationen erfolgt mit dem Programm ArcGIS 10 von ESRI. Zum Import und zur Darstellung der Geosoft-Raster-Dateien als Rasterlayer in ArcMap wird ein Zusatzmodul von Geosoft für ArcGIS als Erweiterung benötigt (<http://www.geosoft.com/resources/releasenotes/plugins/arcGISplugin.asp>, auch beiliegend auf DVD). Die Erstellung von PDF-Dokumenten wird mit Adobe Acrobat X vorgenommen.

## 5. Kartographische Arbeiten

### 5.1. Topographische Karten 1:50.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurde eine Topographische Karte mit einem Sonderblattschnitt auf Grundlage von Rasterdaten der DTK 100-V (Topographische Karte 1:100.000) hergestellt. Zur Abdeckung des Messgebietes ergab sich ein Blatt mit der Ausdehnung von 28 km × 32 km. **Tab. 12** enthält die Eckpunktkoordinaten des Blattes.

**Tab. 12:** Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Bremerhaven (2011)

Karteneckpunkt	Gauß-Krüger-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
SW	3461 000	5922 000
NW	3461 000	5954 000
NO	3489 000	5954 000
SO	3489 000	5922 000

Die Ergebniskarten 1:50.000 basieren auf Rasterdaten der DTK 100-V, Blätter C 2314 Langen ('97), C 2318 Cuxhaven ('97), C 2714 Bremerhaven ('00), C 2718 Bremervörde ('00), und sind digital auf 1:50.000 vergrößert worden. Herausgeber ist das LGN – Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen, 30659 Hannover. Abgedeckt wird der Bereich, der im Kartenbild ca. zwischen Esenshamm im Südwesten, dem Wurster Watt im Nordwesten, Flögeln im Nordosten und Lunestedt im Südosten liegt.

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

### 5.2. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Bremerhaven wurden 24 geophysikalische Ergebniskarten jeweils mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:50.000 hergestellt (siehe Kartenverzeichnis und **Anhang III**). Alle Karten sind mit einer ausführlichen Legende versehen, die Auskunft über das Messgebiet, die Kartengrundlagen, den dargestellten Parameter und die beteiligten Institutionen und Personen gibt.

Ferner wurden eine topografische Höhenkarte und eine Fluglinienkarte produziert, die die Lage der Messprofile auf der Grundlage der Topographischen Karte im jeweiligen Maßstab zeigt. Die Profile sind an ihrem Anfang in Flugrichtung mit Liniennummern versehen. Die Positionen der Zeitmarken (kurzer „|“ 1 s, d. h. 10 Werte, langer „|“ 10 s, d. h. 100 Werte) sind gekennzeichnet. Jede fünfte Zeitmarke (10 s) 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.

## 6. Archivierung

Alle Daten und Produkte sind auf DVD gespeichert und im Fachbereich B2.1 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. 14) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt.

**Tab. 14:** Inhalt der DVD im Überblick

Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Acrobat Reader		Adobe® Acrobat Reader in div. Versionen für gängige Betriebssysteme
\Bericht		Technischer Bericht des Projektes im PDF-Format
\Daten...	\HEM	ASCII-Datei aller gemessenen Rohdaten (*.raw) ASCII-Datei aller prozessierter Daten (*.dat) ASCII-Datei aller abgeleiteten Halbraumparameter (*.app) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1-D-Inversion (*.inv)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, IGRF, Bodenstationsdaten, Tagesvariation etc.
	\HRD	ASCII-Datei der Gehalte bzw. Äquivalentkonzentrationen für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Totalstrahlung und die Strahlungsrate
\Karten...	\HEM	Karten 1:50.000 des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunkstiefe für die Frequenzen 383 Hz, 1832 Hz, 8630 Hz, 41.330 Hz, 192.500 Hz im PDF-Format  Karten 1:50.000 des spezifischen Widerstandes als Ergebnis der 1D-Inversion in den Tiefen 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 60 m unter NN im PDF-Format
	\HMG	Karte 1:50.000 der Anomalien der magnetischen Totalintensität in nT im PDF-Format
	\HRD	Karten 1:50.000 der Gehalte bzw. Äquivalentkonzentrationen für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Totalstrahlung und die Strahlungsrate im PDF-Format
	\Fluglinien	Karten 1:50.000 des tatsächlich zurückgelegten Flugweges mit Topographie im PDF-Format
	\ArcGIS	Kartenprojekte für ArcGIS 10 (*.mxd) inklusive Legendenteile (*.bmp), Rasterdaten (*.tif), Geosoft Oasis-Daten und Geosoft-Plugin für ArcGIS
\Vertikalsektionen		Vertikale Widerstandsverteilung nach 1D-Inversion für alle Profile im Messgebiet, horizontaler Maßstab 1:50.000, vertikaler Maßstab 1:2.000, im PDF-Format

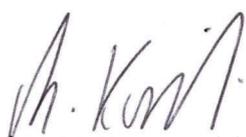
## 7. Literatur

- Grasty, R.L., Holman, P.B. & Blanchard, Y.B., 1991. Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers. Geological survey of Canada, Paper 90-23, 25p.
- Hovgaard, J., & Grasty, R.L., 1997. Reducing statistical noise in airborne gamma ray data through spectral component analysis. In "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration" edited by A.G. Gubins, 753–764.
- IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1363AEA, Vienna.
- Mathis, G.L., 1987. Smoothing spectral gamma logs: A simple but effective technique. *Geophysics*, 52, 363–367.
- IAGA, 1992. International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) 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>.
- Kessels, W., Dörhöfer, G., Fritz, J. & Fulda, C., 2000: Das Forschungsprojekt „Bremerhavener-Cuxhavener Rinne“ zur Beurteilung von Grundwasservorkommen in Rinnensystemen. *Arbeitshefte Wasser 2000/1*, NLfB, Hannover, 189-203.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 1998: Examples of 1-D inversion of multifrequency AEM data from 3-D resistivity distributions. *Exploration Geophysics*, 29, 133-141.
- Siemon, B., 2000: Pilotstudie zu einer aerogeophysikalischen Landesaufnahme - Befliegungen 2000, Gebiet: Cuxhaven. Bericht der Geophysik GGD, Archiv-Nr. 0121359, Hannover.
- Siemon, B., Voß, W., Röttger, B., Rehli, H.-J. & Pielawa, J., 2001: Forschungsvorhaben „Detaillierte aerogeophysikalische Landesaufnahme“ (DAGLA), Messgebiet Cuxhaven, Mai 2000. *Technischer Bericht, BGR-Bericht*, Archiv-Nr. 0121236, Hannover.
- Siemon, B., 2001: Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. *J. Appl. Geophys.*, 46, 65-76.
- Wiederhold, H., Siemon, B., Steuer, A., Schaumann, G., Meyer, U., Binot, F. & Kühne, K., 2010. Coastal aquifers and saltwater intrusions in focus of airborne electromagnetic surveys in Northern Germany. In: *Proceedings of 21<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting 2010*, Azores, Portugal.

---

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE**  
**BGR, HANNOVER**

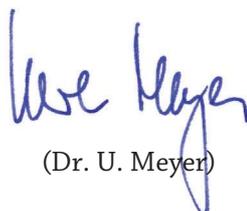
Abteilungsleiter



(Dr. M. Kosinowski)

Leiter der Abteilung  
„Grundwasser und Boden“

Fachbereichsleiter



(Dr. U. Meyer)

Leiter des Fachbereichs  
„Geophysikalische Erkundung  
– Technische Mineralogie“

Sachbearbeiter



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs  
„Aerogeophysik und  
Luftfahrttechnischer  
Betrieb“

## Anhang I

### Messgebiet Bremerhaven

**Tab. A-1:** Flugprotokoll

Messflug	Datum	Uhrzeit (UTC) Anfang–Ende	Profil	Bemerkungen
<b>87000</b>	12.06.0 1	08:00 – 10:35	1.1 W 2.1 O 3.1 W 4.1 O 5.1 W 6.1 O 7.1 W 8.1 O 9.1 W	<p>Flugplatzhöhe: 10 Fuß (3 m)</p> <p><b>Profilflug</b></p> <p>Wetter: bewölkt, kühl, Wind aus 320° mit 17 Knoten</p> <p>Ab Profil 7 keine Videoaufzeichnung</p> <p>Spikes im Mag</p> <p>GPS auf Bird-Antenne geschaltet (gilt für sämtliche Messflüge)</p> <p>Änderungen am Bird:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- DC/DC-Wandler für T4 und T5</li> <li>- DC/DC-Wandler auf der Empfängerseite</li> <li>- Masse und Kabelverbindungen sendeseitig geändert</li> </ul> <p>Repariertes MCM für DAS 8 eingebaut</p>
<b>87001</b>	12.06.0 1	12:30 – 15:15	10.1 O 11.1 W 12.1 O 13.1 W 14.1 O 15.1 W 16.1 O 17.1 W 18.1 O 19.1 W	<p><b>Profilflug</b></p> <p>Wetter: sonnig, Wind aus 310° mit 12 Knoten.</p> <p>Spikes im Mag</p>

<b>87002</b>	13.06.0 1	06:55 – 09:51	20.1 O 21.1 W 22.1 O 23.1 W 24.1 O 25.1 W 26.1 O 27.1 W 28.1 O 29.1 W	<b>Profilflug</b>  Wetter: sonnig, Wind aus 270° mit 1 Knoten.  Mag-Bandbreite auf 0,25 eingestellt; es treten keine Spikes mehr auf
<b>87003</b>	13.06.0 1	11:30 – 14:06	30.1 O 31.1 W 32.1 O 33.1 W 34.1 O 35.1 W 36.1 O 37.1 W 38.1 O 39.1 W 40.1 O 41.1 W	<b>Profilflug</b>  Wetter: sonnig; Wind aus 320° mit 8 Knoten
<b>87004</b>	14.06.0 1	07:22 – 10:07	42.1 O 43.1 W 44.1 O 45.1 W 46.1 O 47.1 W 48.1 O 49.1 W 50.1 O 51.1 W 52.1 O 53.1 W	<b>Profilflug</b>  Wetter: sonnig; Wind aus 30° mit 9 Knoten  Linie 48.1: leichte Störungen in EM5I westlich von Bramel (Fid 501 – 505)  Linie 50.1: Störungen in EM5I (Fid 639 – 649)  Linie 51.1: Störungen in EM5I (Fid 743 – 753)

<p><b>87005</b></p>	<p>14.06.0 1</p>	<p>12:00 – 14:32</p>	<p>54.1 O 55.1 W 56.1 O 57.1 W 58.1 O 59.1 W 60.1 O 61.1 W 62.1 O 63.1 W 64.1 O 65.1 W 66.1 O  301.1 O 302.1 W 303.1 O</p>	<p><b>Profilflug</b></p> <p>Wetter: sonnig; Wind aus 330° mit 11 Knoten</p> <p>Störungen in EM5I, teilweise auch in EM5Q:</p> <p>Linie 54.1: Fid 78 – 88 Linie 56.1: Fid 198 – 202 Linie 57.1: Fid 260 – 267; 278 – 281 Linie 58.1: Fid 301 – 315 Linie 59.1: Fid 372 – 377 Linie 60.1: Fid 404 – 420 Linie 61.1: Fid 494 – 505 Linie 62.1: Anfang - Fid 540 Linie 63.1: Fid 602 – Ende Linie 64.1: Anfang – Fid 630 Linie 65.1: Fid 702 – Ende Linie 66.1: Fid 738</p> <p><b>Sonderprofile über dem Wollingster See</b></p>
<p><b>87006</b></p>	<p>15.06.0 1</p>	<p>07:40 – 10:03</p>	<p>67.1 W 68.1 O 69.1 W 70.1 O 71.1 W 72.1 O 73.1 W 74.1 O 75.1 W 76.1 O 77.1 W 78.1 O 79.1 O</p>	<p><b>Profilflug</b></p> <p>Wetter: sonnig; Wind aus 130° mit 12 Knoten</p> <p>Störungen in EM5:</p> <p>Linie 67.1: Fid 100 bis Ende Linie 68.1: Anfang – Fid 131 Linie 69.1: Fid 205 – Ende Linie 70.1: Anfang – Fid 238 Linie 71.1: Fid 311 – Ende Linie 72.1: Anfang – Fid 337</p>

<b>87007</b>	18.06.0 1	11:45 – 14:12	80.1 W 81.1 O 82.1 W 83.1 O 84.1 W 85.1 O 86.1 W 87.1 O 88.1 W 89.1 O	<b>Profilflug</b>  Wetter: bewölkt; Wind aus 310° mit 17 bis 24 Knoten
<b>87008</b>	19.06.0 1	07:40 – 10:11	90.1 W 91.1 O 92.1 W 93.1 O 94.1 W 95.1 O 96.1 W 97.1 O 98.1 W 99.1 O 100.1 W 101.1 O 102.1 W 103.1 O 104.1 W 105.1 O 106.1 W 107.1 O	<b>Profilflug</b>  Wetter: bewölkt; Wind aus 300° mit 11 Knoten
<b>87009</b>	19.06.0 1	13:00 – 14:02	206.1 O 207.1 W 208.1 O 209.1 W	<b>Sonderflug über Wallanlagen</b>  Wetter: bewölkt; Wind aus 320° mit 12 Knoten

<b>87010</b>	20.06.0 1	08:00 – 10:30	26.9 N 25.9 S 24.9 N 23.9 S 22.9 N 21.9 S 20.9 N 19.9 S 18.9 N 17.9 S	<b>Querprofilflug</b>  Wetter: bewölkt, kühl; Wind aus 210° mit 8 Knoten  17.9: nördlich von Friedheim Störungen in EM5I (Fid 759 – 767)
<b>87011</b>	20.06.0 1	13:30 – 14:39	501.1 W 502.1 O 503.1 W 504.1 O	<b>Testflug mit EM über Wasser</b>  Wetter: zunächst sonnig; über der Nordsee diesig und regnerisch; Wind aus 290° mit 6 Knoten  1. Flughöhe 250 Fuß 2. Flughöhe 300 Fuß 3. Flughöhe 750 Fuß 4. Steigflug 200 – 1200 Fuß (2×)
<b>87012</b>	21.06.0 1	07:30 – 10:03	16.9 N 15.9 S 14.9 N 13.9 S 12.9 N 11.9 S 10.9 N 9.9 S	<b>Querprofilflug</b>  Wetter: bewölkt; Wind aus 320° mit 9 Knoten  Störungen in EM5:  Linie 16.9: Fid 109 – 115 Linie 15.9: Fid 202 – 215 Linie 14.9: Fid 271 – 285 Linie 12.9: Fid 437 – 458 Linie 12.9: Fid 642 – 662

<b>87013</b>	21.06.0 1	12:15 – 14:28	8.9 N	<b>Querprofilflug + Sonderflug</b>  Wetter: bewölkt; Wind aus 310° mit 10 Knoten
			7.9 S	
			6.9 N	
			5.9 S	
			4.9 N	
			3.9 S	
			2.9 N	
			1.9 S	
			200.9 N	
			201.9 S	
			202.9 N	
			203.9 S	
			204.9 N	
			205.9 S	
			206.9 N	
			207.9 S	
			208.9 N	

## Anhang II

### Beschreibung der Datenformate

#### A) Elektromagnetik

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

##### Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/BREMERHAVEN  
/AREACODE  
/087  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 3 BESSEL  
/BIRD  
/40  
/NUMFREQ  
/5  
/FREQUENCY  
/ 383.00 1832.00 8630.00 41330.00 192500.00  
/COILGEOMETRY  
/ 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00  
/COILSEPERATION  
/ 6.87 6.73 6.59 6.68 6.64  
/TOWCABLE  
/ 38.18  
/DUMMY  
/ 999.99  
/DECIMATIONVALUE  
/1  
/PRIVTEXT  
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```

1) Rohdaten: HEM087\_RAW.XYZ

Beispiel:

```

/-----
/XYZ EXPORT [09/05/2011]
/DATABASE [.\087_HEM_RAW.gdb]
/-----
/
/ X Y RECORD SECONDS RADAR LASER BARO HEMR_1 HEMQ_1 HEMR_2 HEMQ_2 HEMR_3 HEMQ_3 HEMR_4 HEMQ_4 HEMR_5 HEMQ_5
//Flight 87000
//Date 2001/06/12
Random 0
3470859 5930847 20 29159.4 4.85 343.90 1.11 -0.08057 -0.03296 -0.25452 -0.18494 -0.27650 -0.14985 -0.11536 0.03143 0.19806 -0.00214
3470856 5930846 21 29159.5 4.87 344.20 1.10 -0.08057 -0.03357 -0.25330 -0.18464 -0.27589 -0.14954 -0.11506 0.03052 0.19868 -0.00580
3470853 5930844 22 29159.6 4.87 344.90 1.11 -0.08118 -0.03510 -0.25147 -0.18433 -0.27589 -0.14863 -0.11536 0.03052 0.19806 -0.00427

```

In dieser Datei 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
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktummer
SECONDS	s.s	Sekundenzähler
RADAR	mV	Messwert des Radarhöhenmessers
LASER	m	Messwert des Laserhöhenmessers
BARO	mV	Messwert der barometrische Höhe des Hubschraubers
HEMR_1	mV	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=383 Hz
HEMQ_1	mV	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=383 Hz
HEMR_2	mV	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1832 Hz
HEMQ_2	mV	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1832 Hz
HEMR_3	mV	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8630 Hz
HEMQ_3	mV	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8630 Hz
HEMR_4	mV	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41430 Hz
HEMQ_4	mV	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41430 Hz
HEMR_5	mV	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=192500 Hz
HEMQ_5	mV	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=192500 Hz

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.

**2) Daten: HEM087\_DAT.XYZ**

Beispiel:

```

/PROGRAMM: HEM01
/BEREINIGTE UND GEFILTRTE DATEN
/PROGRAMM: ANPASS03
/ANPASSUNG PROFILWEISE
/ X Y LON LAT RECORD UTC_TIME TOPO H_RADAR H_LASER BIRD_NN H_BARO REAL_1 QUAD_1 REAL_2 QUAD_2 REAL_3 QUAD_3 REAL_4 QUAD_4 REAL_5 QUAD_5
//Flight 87000
//Date 2001/06/12
Line 1.1
3488255 5945059 8.821370 53.636749 10400 82317.4 1.64 54.57 53.86 55.50 55.50 7.97 26.26 44.36 65.62 164.56 126.28 282.37 95.02 345.58 47.17
3488252 5945060 8.821324 53.636758 10401 82317.5 1.59 54.56 53.82 55.41 55.41 8.00 26.25 44.26 65.51 164.40 126.04 283.44 95.63 346.19 47.22
3488249 5945062 8.821278 53.636768 10402 82317.6 1.53 54.54 53.78 55.31 55.31 8.04 26.23 44.16 65.40 164.24 125.79 284.52 96.24 346.81 47.27

```

In dieser Datei 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 Messpunktummer
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
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=383 Hz
QUAD_1	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=383 Hz
REAL_2	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1832 Hz
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1832 Hz
REAL_3	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8630 Hz
QUAD_3	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8630 Hz
REAL_4	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41330 Hz
QUAD_4	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41330 Hz
REAL_5	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=192500 Hz
QUAD_5	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=192500 Hz

Hubschrauber-Geophysik Bremerhaven 2001 (Revision 2011)

**3) Halbraumparameter: HEM087\_APP.XYZ**

Beispiel:

```

/PROGRAMM: HEM01
/BERECHNETE HALBRAUMPARAMETER
/PROGRAMM: ANPASS03
/ANPASSUNG PROFILWEISE
/ X Y LON LAT RECORD UTC_TIME TOPO H_RADAR H_LASER BIRD_NN H_BARO RHOA_1 KDA_1 ZST_1 ... RHOA_5 KDA_5 ZST_5
//Flight 87000
//Date 2001/06/12
Line 1.1
3488255 5945059 8.821370 53.636749 10400 82317.4 1.64 54.57 53.86 55.50 65.56 -7.97 96.16 ... 22.27 2.58 5.28
3488252 5945060 8.821324 53.636758 10401 82317.5 1.59 54.55 53.82 55.41 65.17 -7.75 96.07 .. 22.21 2.59 5.28
3488249 5945062 8.821278 53.636768 10402 82317.6 1.53 54.54 53.78 55.31 64.85 -7.56 96.00 .. 22.15 2.60 5.29

```

In dieser Datei 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 Messpunktummer
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
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=383 Hz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=383 Hz
ZST_1	m	Schwerpunkttiefe für die Frequenz f=383 Hz
RHOA_2	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=1832 Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=1832 Hz
ZST_2	m	Schwerpunkttiefe für die Frequenz f=1832 Hz
RHOA_3	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=8630 Hz
KDA_3	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=8630 Hz
ZST_3	m	Schwerpunkttiefe für die Frequenz f=8630 Hz
RHOA_4	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=41330 Hz
KDA_4	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=41330 Hz
ZST_4	m	Schwerpunkttiefe für die Frequenz f=41330 Hz
RHOA_5	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=192500 Hz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=192500 Hz
ZST_5	m	Schwerpunkttiefe für die Frequenz f=192500 Hz

Hubschrauber-Geophysik Bremerhaven 2001 (Revision 2011)

**4) Inversionsdaten HEM087\_INV.XYZ**

Beispiel:

```

/PROGRAMM: HEM01
/BEREINIGTE UND GEFILTRTE DATEN
/INVERSIONSMODELLE VON E:\SiemonB\Gebiete\087 Bremerhaven\Processing\HEM\Data\INV\2002\F4_10_S0\HEM087_INV.XYZ
/UEBERTRAGEN AM 02-SEP-11 16:50:00
/ X Y LON LAT RECORD UTC_TIME 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
//Flight 8700
//Date 2001/06/12
Line 1.1
3488255 5945059 8.821370 53.636749 10400 82317.4 1.41 54.57 53.86 55.50 55.50 3867.13 0.78 ... 341.77 61.18 21.90 7.91
3488252 5945060 8.821324 53.636758 10401 82317.5 1.36 54.56 53.82 55.41 55.41 3889.27 0.77 ... 340.07 61.39 20.79 8.11
3488249 5945062 8.821278 53.636768 10402 82317.6 1.30 54.54 53.78 55.31 55.31 3911.40 0.75 ... 338.38 61.61 19.67 8.31

```

In dieser Datei sind alle notwendigen gemessenen Parameter sowie die Ergebnisse  $\rho$ ,  $d$  und  $qall$  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
LONG	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	korrigierte (nachträglich Micro-Leveling) topografische Höhe über NN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe des Hubschraubers abzüglich der korrigierten Laserhöhe
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
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 4-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 niveauekorrigierten (gelevelten) Ergebnissen der Hubschraubermagnetik.

### Magnetikdaten HMG087.XYZ

/BGR HEADER:

/  
/AREANAME  
/BREMERHAVEN  
/AREACODE  
/087  
/C\_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 3 BESSEL  
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/G-822A  
/IGRF  
/2005  
/LON\_BASE  
/8.661973  
/LAT\_BASE  
/53.372497  
/ALT\_BASE  
/13  
/TOWCABLE  
/40.0  
/DUMIMY  
/-9999  
/PRIVTEXT

(hier können Kommentarzeilen stehen)

Beispiel:

/Bearbeitung: M. Ibs-von Seht

```

/ X Y LON LAT RECORD UTC_DATE UTC_TIME ALT_BIRD H_RADAR_RAW H_LASER_RAW T_BASE_RAW T_BASE_F T_RAW DELTA_T DELTA_T_LEV
//Flight 8700
//Date 2001/06/12
Line 1.1
3488255 5945059 8.821370 53.636749 10400 20010612 82317.4 48.7 307.5 48994.37 48994.36 48994.36 49090.53 25.45 26.55
3488252 5945060 8.821324 53.636758 10401 20010612 82317.5 48.6 307.5 48994.37 48994.36 48994.36 49090.51 25.44 26.54
3488249 5945062 8.821278 53.636768 10402 20010612 82317.6 48.5 307.5 48994.37 48994.36 48994.36 49090.50 25.42 26.52

```

In dieser Datei 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") 35000000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_RADAR_RAW	mV	Messwert der Radarhöhe des Hubschraubers über Grund
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde über Grund
T_BASE_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_BASE_F	nT	bereinigte Daten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Flugsonde
DELTA_T	nT	Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes nach Abzug des IGRF und der Tagesvariation sowie Korrektur des richtungsabhängigen Fehlers (heading error)
DELTA_T_LEV	nT	niveauekorrigierte 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 Messprofilnummern.

Zeilen, die mit "Tie"

beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.

beginnen, sind Kommentarzeilen.

beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.

beginnen, kennzeichnen Messprofilnummern.

beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.



Line 1.1

3488255	5945059	8.821370	53.636749	10400	20010612	82317.4	48.7	307.5	53.8	95.7	100.250	15.0	980	62
3488225	5945070	8.820910	53.636841	10410	20010612	82318.4	47.8	305.0	53.6	95.2	100.261	15.0	954	48
3488194	5945080	8.820440	53.636929	10420	20010612	82319.4	46.9	302.5	53.4	94.4	100.272	15.0	973	52

Fortsetzung der letzten drei Zeilen:

219	17	6	9	160.0	0.41	0.80	2.72	174.65	0.44	0.89	2.81	2.05
247	30	4	10	197.3	0.42	0.81	2.81	179.97	0.43	0.88	2.81	2.03
234	19	6	10	176.8	0.41	0.83	2.83	183.98	0.42	0.87	2.82	2.02

In dieser Datei sind alle notwendigen gemessenen Parameter sowie die Ergebnisse der Radiometrie in der Reihenfolge der Radiometrie Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 4500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_RADAR_RAW	mV	Messwert der Radarhöhe des Hubschraubers über Grund
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde über Grund
HAG	m	Höhe des Hubschraubers über Grund
PRESS	kPa	Luftdruck
TEMP	°C	Lufttemperatur
LIVE_T	ms	Registrierzeitintervall
COSMIC	cps	Kosmische Strahlung > 3 MeV
TOT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Totalstrahlung
POT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Kaliumstrahlung
URA_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung
THO_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Thoriumstrahlung
TOT	cps	Totalstrahlung
POT	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden
URA	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden
THO	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden
TOT_LEV	cps	Totalstrahlung (niveauekorrigiert)
POT_LEV	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden (niveauekorrigiert)
URA_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden (niveauekorrigiert)
THO_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden (niveauekorrigiert)
EXPO	µR/h	Strahlungsrate am Erdboden, ermittelt aus niveauekorrigierten Gehalten

Anmerkungen: siehe Magnetik

## Anhang III

### DVD-Inhalt

\Acrobat Reader\ Adobe - Adobe Reader herunterladen.URL \Android\ Android\AdobeReader.apk \Mac\ AdbeRdr1010_de_DE.dmg \Unix\ AdbeRdr9.4.2-1_i386linux_deu.deb AdbeRdr9.4.2-1_i486linux_deu.bin AdbeRdr9.4.2-1_i486linux_deu.rpm AdbeRdr9.4.2-1_i486linux_deu.tar.bz2 \Windows 7\ AdbeRdr1011_de_DE.exe	\Oasis\ 087_DEM_neu.map 087_DEM_neu.map.xml 087_Flightlines_neu.map 087_Flightlines_neu.map.xml 087_rho_005mNN_neu.map 087_rho_005mNN_neu.map.xml 087_rho_010mNN_neu.map 087_rho_010mNN_neu.map.xml 087_rho_015mNN_neu.map 087_rho_015mNN_neu.map.xml 087_rho_020mNN_neu.map 087_rho_020mNN_neu.map.xml 087_rho_030mNN_neu.map 087_rho_030mNN_neu.map.xml 087_rho_040mNN_neu.map 087_rho_040mNN_neu.map.xml 087_rho_050mNN_neu.map 087_rho_050mNN_neu.map.xml 087_rho_060mNN_neu.map 087_rho_060mNN_neu.map.xml 087_rho_060muNN.map 087_rhoa1_neu.map 087_rhoa2_neu.map 087_rhoa2_neu.map.xml 087_rhoa3_neu.map 087_rhoa3_neu.map.xml 087_rhoa4_neu.map 087_rhoa4_neu.map.xml 087_rhoa5_neu.map 087_rhoa5_neu.map.xml 087_zst1_neu.map 087_zst1_neu.map.xml 087_zst2_neu.map 087_zst2_neu.map.xml 087_zst3_neu.map 087_zst3_neu.map.xml 087_zst4_neu.map 087_zst4_neu.map.xml 087_zst5_neu.map 087_zst5_neu.map.xml expo.zon EXPO_M1.grd EXPO_M1.grd.gi EXPO_M1.grd.xml MAG.zon MAG_LEV.grd MAG_LEV.grd.gi MAG_LEV.grd.xml map.ini map01.map map01.map.xml map01.mdf pot.zon POT_BIO.grd POT_BIO.grd.gi POT_BIO.grd.xml rho_005mNN_neu.grd rho_005mNN_neu.grd.gi rho_005mNN_neu.grd.xml rho_010mNN_neu.grd rho_010mNN_neu.grd.gi
\Bericht\ Technischer Bericht Bremerhaven 87.pdf	
\Daten\ \HEM\ Format_description_HEM.txt HEM087_APP.xyz HEM087_DAT.xyz HEM087_INV.xyz HEM087_RAW.xyz	
\HMG\ Format_description_HMG.txt HMG087.XYZ	
\HRD\ Format_description_HRD.txt HRD087.XYZ	
\Karten\ \ArcGis\ 87 Bremerhaven Digital Elevation Model.mxd 87 Bremerhaven Fluglinien.mxd 87 Bremerhaven Gesamtstrahlung.mxd 87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa1.mxd 87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa2.mxd 87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa3.mxd 87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa4.mxd 87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa5.mxd 87 Bremerhaven Kalium.mxd 87 Bremerhaven Kartenrahmen.mxd 87 Bremerhaven Magnetik.mxd 87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst1.mxd 87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst2.mxd 87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst3.mxd 87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst4.mxd 87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst5.mxd 87 Bremerhaven Strahlungsrate.mxd 87 Bremerhaven Thorium.mxd 87 Bremerhaven Uran.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 005m unter NN.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 010m unter NN.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 015m unter NN.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 020m unter NN.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 030m unter NN.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 040m unter NN.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 050m unter NN.mxd 87 Bremerhaven Widerstand 060m unter NN.mxd	
\Legenden\ Legenden.zip	

rho_010mNN_neu.grd.xml	\Karten\ \DEM\ 87 Bremerhaven Digitales Höhenmodell.pdf
rho_015mNN_neu.grd	
rho_015mNN_neu.grd.xml	
rho_015mNN_neu.grd.gi	
rho_020mNN_neu.grd	\Fluglinien\ 87 Bremerhaven Fluglinien.pdf
rho_020mNN_neu.grd.gi	
rho_020mNN_neu.grd.xml	
rho_030mNN_neu.grd	\HEM\ 87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa1.pdf
rho_030mNN_neu.grd.gi	87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa2.pdf
rho_030mNN_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa3.pdf
rho_040mNN_neu.grd	87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa4.pdf
rho_040mNN_neu.grd.gi	87 Bremerhaven Halbraumwiderstand rhoa5.pdf
rho_040mNN_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst1.pdf
rho_050mNN_neu.grd	87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst2.pdf
rho_050mNN_neu.grd.gi	87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst3.pdf
rho_050mNN_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst4.pdf
rho_060mNN_neu.grd	87 Bremerhaven Schwerpunktstiefe zst5.pdf
rho_060mNN_neu.grd.gi	87 Bremerhaven Widerstand 005m unter NN.pdf
rho_060mNN_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Widerstand 010m unter NN.pdf
rhoa1_neu.grd	87 Bremerhaven Widerstand 015m unter NN.pdf
rhoa1_neu.grd.gi	87 Bremerhaven Widerstand 020m unter NN.pdf
rhoa1_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Widerstand 030m unter NN.pdf
rhoa2_neu.grd	87 Bremerhaven Widerstand 040m unter NN.pdf
rhoa2_neu.grd.gi	87 Bremerhaven Widerstand 050m unter NN.pdf
rhoa2_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Widerstand 060m unter NN.pdf
rhoa3_neu.grd	
rhoa3_neu.grd.gi	\HMG\ 87 Bremerhaven Magnetik.pdf
rhoa3_neu.grd.xml	
rhoa4_neu.grd	
rhoa4_neu.grd.gi	\HRD\ 87 Bremerhaven Gesamtstrahlung.pdf
rhoa4_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Kalium.pdf
rhoa5_neu.grd	87 Bremerhaven Strahlungsrate.pdf
rhoa5_neu.grd.gi	87 Bremerhaven Thorium.pdf
rhoa5_neu.grd.xml	87 Bremerhaven Uran.pdf
tho.zon	
THO_BIO.grd	
THO_BIO.grd.gi	
THO_BIO.grd.xml	
TOPO_LEV_FILT300_neu.grd	
TOPO_LEV_FILT300_neu.grd.gi	
TOPO_LEV_FILT300_neu.grd.xml	
tot.zon	
TOT_BIO.grd	
TOT_BIO.grd.gi	
TOT_BIO.grd.xml	
ura.zon	
URA_BIO.grd	
URA_BIO.grd.gi	
URA_BIO.grd.xml	
zst1_neu.grd	\Vertikalsektionen\ Vertisec 870011.pdf
zst1_neu.grd.gi	Vertisec 870019.pdf
zst1_neu.grd.xml	Vertisec 870021.pdf
zst2_neu.grd	Vertisec 870029.pdf
zst2_neu.grd.gi	Vertisec 870031.pdf
zst2_neu.grd.xml	Vertisec 870039.pdf
zst3_neu.grd	Vertisec 870041.pdf
zst3_neu.grd.gi	Vertisec 870049.pdf
zst3_neu.grd.xml	Vertisec 870051.pdf
zst4_neu.grd	Vertisec 870059.pdf
zst4_neu.grd.gi	Vertisec 870061.pdf
zst4_neu.grd.xml	Vertisec 870069.pdf
zst5_neu.grd	Vertisec 870071.pdf
zst5_neu.grd.gi	Vertisec 870079.pdf
zst5_neu.grd.xml	Vertisec 870081.pdf
	Vertisec 870089.pdf
	Vertisec 870091.pdf
	Vertisec 870098.pdf
	Vertisec 870099.pdf
	Vertisec 870101.pdf
	Vertisec 870108.pdf
	Vertisec 870109.pdf
	Vertisec 870111.pdf
	Vertisec 870118.pdf
	Vertisec 870119.pdf
	Vertisec 870121.pdf
	Vertisec 870128.pdf
	Vertisec 870129.pdf
	Vertisec 870131.pdf
	Vertisec 870138.pdf
	Vertisec 870139.pdf
	Vertisec 870141.pdf
\Topographie\ Zusammenbau Bremerhaven.tfwx Zusammenbau Bremerhaven.tif	

Vertisec 870148.pdf  
Vertisec 870149.pdf  
Vertisec 870151.pdf  
Vertisec 870158.pdf  
Vertisec 870159.pdf  
Vertisec 870161.pdf  
Vertisec 870169.pdf  
Vertisec 870171.pdf  
Vertisec 870179.pdf  
Vertisec 870181.pdf  
Vertisec 870189.pdf  
Vertisec 870191.pdf  
Vertisec 870199.pdf  
Vertisec 870201.pdf  
Vertisec 870209.pdf  
Vertisec 870211.pdf  
Vertisec 870219.pdf  
Vertisec 870221.pdf  
Vertisec 870229.pdf  
Vertisec 870231.pdf  
Vertisec 870239.pdf  
Vertisec 870241.pdf  
Vertisec 870249.pdf  
Vertisec 870251.pdf  
Vertisec 870259.pdf  
Vertisec 870261.pdf  
Vertisec 870269.pdf  
Vertisec 870271.pdf  
Vertisec 870281.pdf  
Vertisec 870282.pdf  
Vertisec 870291.pdf  
Vertisec 870292.pdf  
Vertisec 870301.pdf  
Vertisec 870302.pdf  
Vertisec 870311.pdf  
Vertisec 870312.pdf  
Vertisec 870321.pdf  
Vertisec 870322.pdf  
Vertisec 870331.pdf  
Vertisec 870332.pdf  
Vertisec 870341.pdf  
Vertisec 870342.pdf  
Vertisec 870351.pdf  
Vertisec 870352.pdf  
Vertisec 870361.pdf  
Vertisec 870362.pdf  
Vertisec 870371.pdf  
Vertisec 870381.pdf  
Vertisec 870391.pdf  
Vertisec 870401.pdf  
Vertisec 870411.pdf  
Vertisec 870412.pdf  
Vertisec 870421.pdf  
Vertisec 870422.pdf  
Vertisec 870431.pdf  
Vertisec 870432.pdf  
Vertisec 870441.pdf  
Vertisec 870442.pdf  
Vertisec 870451.pdf  
Vertisec 870461.pdf  
Vertisec 870471.pdf  
Vertisec 870472.pdf  
Vertisec 870481.pdf  
Vertisec 870482.pdf  
Vertisec 870491.pdf  
Vertisec 870492.pdf  
Vertisec 870501.pdf

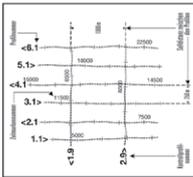
Vertisec 870502.pdf  
Vertisec 870511.pdf  
Vertisec 870521.pdf  
Vertisec 870531.pdf  
Vertisec 870541.pdf  
Vertisec 870551.pdf  
Vertisec 870561.pdf  
Vertisec 870571.pdf  
Vertisec 870581.pdf  
Vertisec 870591.pdf  
Vertisec 870601.pdf  
Vertisec 870611.pdf  
Vertisec 870621.pdf  
Vertisec 870631.pdf  
Vertisec 870641.pdf  
Vertisec 870651.pdf  
Vertisec 870661.pdf  
Vertisec 870671.pdf  
Vertisec 870681.pdf  
Vertisec 870691.pdf  
Vertisec 870701.pdf  
Vertisec 870711.pdf  
Vertisec 870721.pdf  
Vertisec 870731.pdf  
Vertisec 870741.pdf  
Vertisec 870751.pdf  
Vertisec 870761.pdf  
Vertisec 870771.pdf  
Vertisec 870781.pdf  
Vertisec 870791.pdf  
Vertisec 870801.pdf  
Vertisec 870811.pdf  
Vertisec 870821.pdf  
Vertisec 870831.pdf  
Vertisec 870841.pdf  
Vertisec 870851.pdf  
Vertisec 870861.pdf  
Vertisec 870871.pdf  
Vertisec 870881.pdf  
Vertisec 870891.pdf  
Vertisec 870901.pdf  
Vertisec 870911.pdf  
Vertisec 870921.pdf  
Vertisec 870931.pdf  
Vertisec 870941.pdf  
Vertisec 870951.pdf  
Vertisec 870961.pdf  
Vertisec 870971.pdf  
Vertisec 870981.pdf  
Vertisec 870991.pdf  
Vertisec 871001.pdf  
Vertisec 871011.pdf  
Vertisec 871021.pdf  
Vertisec 871031.pdf  
Vertisec 871041.pdf  
Vertisec 871051.pdf  
Vertisec 871061.pdf  
Vertisec 871071.pdf

## **Anhang IV**

### **Karten**

(Originalkarten verkleinert auf 1:200.000)

**AEROGEOPHYSIKALISCHE  
MESSUNGEN IM GEBIET  
BREMERHAVEN**



Die aerogeophysikalischen Messungen wurden mit dem System **AGS** durchgeführt. Die Messungen sind in der Tabelle **AGS** dokumentiert. Die Messungen sind in der Tabelle **AGS** dokumentiert. Die Messungen sind in der Tabelle **AGS** dokumentiert.



Maßstab 1:50 000 (2 cm = 1 km)

<b>BGR</b>	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 30655 Hannover, Leibnizstraße 24
<b>Bremerhaven</b>	
Thema: Topographie und Fluglinien	
Datum: 2001	
Verarbeitet: 2011	
Geodaten: 2011	
Geometrie: 2011	
Geometrie: 2011	



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.