

B. Siemon, W. Voß, T. Kerner,  
J. Pielawa

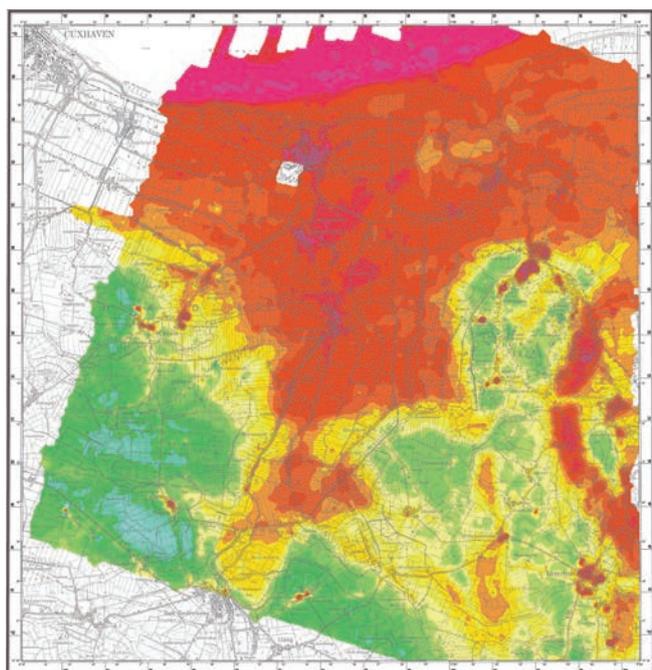


Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

# Technischer Bericht Hubschrabergeophysik Hadelner Marsch

**Mai / Juni 2004**

(Revision 2017)







**Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe**

**Technischer Bericht  
Hubschrabergeophysik  
Hadelner Marsch**

**Mai/Juni 2004**

(Revision 2017)



Autoren: B. Siemon  
W. Voß  
T. Kerner  
J. Pielawa

Datum: 01.02.2017



## Inhaltsverzeichnis

<b>Personal</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>V</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. Messgebiet und Befliegung</b> .....	<b>4</b>
<b>4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR</b> .....	<b>7</b>
4.1. Messhubschrauber .....	8
4.2. Messausrüstung.....	8
4.3. Elektromagnetik.....	9
4.4. Magnetik.....	10
4.5. Radiometrie .....	11
4.6. Navigations- und Positionierungssystem .....	12
4.7. Datenerfassung.....	14
4.8. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber .....	15
<b>5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten</b> .....	<b>16</b>
5.1. Prozessabläufe .....	17
5.2. Positionsdaten.....	17
5.2.1. GPS-Koordinaten .....	17
5.2.2. Radarhöhen .....	17
5.2.3. Laserhöhen .....	17
5.2.4. Barometrische Höhen .....	18
5.2.5. Topografische Höhen .....	18
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik.....	18
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems .....	19
5.3.2. Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur.....	19
5.3.3. Datenkorrektur .....	20
5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter .....	20
5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten .....	21
5.3.6. Statistische Niveaueinpassung.....	22
5.3.7. 1D-Inversion der HEM-Daten.....	23
5.3.8. Präsentation der HEM-Ergebnisse.....	23

---

5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik.....	24
5.4.1. Magnetisches Totalfeld.....	24
5.4.2. Berechnung des IGRF .....	24
5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen .....	24
5.4.4. Statistische Niveauanpassung.....	24
5.4.5. Präsentation der Magnetikergebnisse.....	24
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie .....	25
5.5.1. Effektive Höhe.....	25
5.5.2. Registrierzeitkorrektur.....	26
5.5.3. Hintergrundstrahlung.....	26
5.5.4. Compton-Streuung.....	27
5.5.5. Zählraten in Standardflughöhe.....	28
5.5.6. Radioelementgehalte und Dosisleistung.....	29
5.5.7. Filterung und statistische Niveauanpassung.....	29
5.5.8. Präsentation der Ergebnisse der Radiometrie .....	30
<b>6. Kartografische Arbeiten.....</b>	<b>31</b>
6.1. Topografische Karten 1:50.000 .....	31
6.2. Ergebniskarten.....	31
<b>7. Archivierung.....</b>	<b>33</b>
<b>8. Literatur.....</b>	<b>34</b>
<b>Unterschriften.....</b>	<b>37</b>
<b>Anhang I:</b> Befliegungsdaten Messgebiet 109 Hadelner Marsch.....	<b>39</b>
<b>Anhang II:</b> Beschreibung der Datenformate .....	<b>45</b>
<b>Anhang III:</b> DVD-Inhalt .....	<b>65</b>
<b>Anhang IV:</b> Karten.....	<b>69</b>
<b>Anhang V:</b> Vertikalsektionen.....	<b>98</b>
<b>Anlage: DVD</b> (DVD+R)	

## **Personal:**

Die Befliegung im Jahr 2004 und die nachfolgenden Auswertungen wurden von Mitarbeitern des ehemaligen BGR-Referats B3.13 „Angewandte Aero- und Bodengeophysik“ (heute: Arbeitsbereich „Aerogeophysik und Luftfahrttechnischer Betrieb“ im Fachbereich B2.1 „Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie“) durchgeführt.

## **Leitung und Management**

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

Dr. Bernhard **Siemon**, Arbeitsbereichsleiter in B2.1, BGR

## **Auswertung und Berichterstattung**

Dr. Bernhard **Siemon**, Physiker, HEM-Datenauswertung, BGR

Wolfgang **Voß**, Vermessungsingenieur, HMG-Datenauswertung, BGR

Tatjana **Kerner**, Geophysikerin, HRG-Datenauswertung, BGR

Jens **Pielawa**, Kartograf, BGR

## **Messgruppe**

Karl-Heinz **Meinhardt**, Operator, Systembetreuer, BGR

Hans-Joachim **Rehli**, Leiter der Messgruppe, BGR

Josef **Scheiwein**, Hubschrauber-ingenieur, BGR

Wolfgang **Voß**, Vermessungsingenieur, Navigator, BGR

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

**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

E-Mail: heli@bgr.de, Uwe.Meyer@bgr.de, Bernhard.Siemon@bgr.de

### Abbildungsverzeichnis:

- 1 Lageskizze des Messgebietes Hadelner Marsch
- 2 Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR
- 3 Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen und geschichteten Halbräumen

### Tabellenverzeichnis:

- 1 Technische Daten der Befliegung Hadelner Marsch
  - 2 Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
  - 3 Geophysikalische Messsysteme
  - 4 HEM-Systemparameter für BKS60
  - 5 Bodenstation
  - 6 Energiebereiche und Kanaluordnungen registrierter Strahlungsquellen
  - 7 Navigations- und Positionierungssysteme
  - 8 Höhenmesser
  - 9 Datenerfassung und -aufzeichnung
  - 10 Sonstige Ausrüstung
  - 11 HEM-Auswertung (Übersicht)
  - 12 Kalibrierwerte für das HEM-System BKS60
  - 13 Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung
  - 14 Koeffizienten der Einstreuratzen
  - 15 Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen
  - 16 Sensitivitäten
  - 17 Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Hadelner Marsch
  - 18 Gitterparameter
  - 19 Inhalt der DVD
- A-1:** Flugprotokolle für das Messgebiet 109 Hadelner Marsch

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

1. Fluglinien,
2. Digitales Höhenmodell,
3. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 139,600 Hz (rhoa5),
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 37,830 Hz (rhoa4),
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8510 Hz (rhoa3),
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1778 Hz (rhoa2),
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 375 Hz (rhoa1),
8. Schwerpunktstiefe bei 139,600 Hz (zst5),
9. Schwerpunktstiefe bei 37,830 Hz (zst4),
10. Schwerpunktstiefe bei 8510 Hz (zst3),
11. Schwerpunktstiefe bei 1778 Hz (zst2),
12. Schwerpunktstiefe bei 375 Hz (zst1),
13. Spezifischer Widerstand bei -05m NN,
14. Spezifischer Widerstand bei -07m NN,
15. Spezifischer Widerstand bei -10m NN,
16. Spezifischer Widerstand bei -15m NN,
17. Spezifischer Widerstand bei -20m NN,
18. Spezifischer Widerstand bei -30m NN,
19. Spezifischer Widerstand bei -40m NN,
20. Spezifischer Widerstand bei -50m NN,
21. Spezifischer Widerstand bei -60m NN,
22. Spezifischer Widerstand bei -70m NN.
23. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
24. Gehalte von Kalium im Boden in %
25. Äquivalentgehalte von Uran im Boden in ppm
26. Äquivalentgehalte von Thorium im Boden in ppm
27. Totalstrahlung in cps
28. Ionendosisleistung im Boden in  $\mu\text{R/h}$

**Liste der Vertikalsektionen:**

Messprofile:

- 1. VRS 1.2
- 2. VRS 2.2
- 3. VRS 3.2
- 4. VRS 4.2
- 5. VRS 5.2
- 6. VRS 6.2
- 7. VRS 7.2
- 8. VRS 10.2
- 9. VRS 11.1
- 10. VRS 12.2
- 11. VRS 13.2
- 12. VRS 14.2
- 13. VRS 15.1
- 14. VRS 16.1
- 15. VRS 17.1
- 16. VRS 18.1
- 17. VRS 19.1
- 18. VRS 20.1
- 19. VRS 21.2
- 20. VRS 21.3
- 21. VRS 22.2
- 22. VRS 22.3
- 23. VRS 23.2
- 24. VRS 24.2
- 25. VRS 25.2
- 26. VRS 25.3
- 27. VRS 26.1
- 28. VRS 27.1
- 29. VRS 28.1
- 30. VRS 29.1
- 31. VRS 30.1
- 32. VRS 31.1

- 33. VRS 32.1
- 34. VRS 33.1
- 35. VRS 34.1
- 36. VRS 35.1
- 37. VRS 36.1
- 38. VRS 36.2
- 39. VRS 37.1
- 40. VRS 37.2
- 41. VRS 38.1
- 42. VRS 38.2
- 43. VRS 39.1
- 44. VRS 39.2
- 45. VRS 40.1
- 46. VRS 40.2
- 47. VRS 41.1
- 48. VRS 41.2
- 49. VRS 42.1
- 50. VRS 43.1
- 51. VRS 44.1
- 52. VRS 45.1
- 53. VRS 46.1
- 54. VRS 47.1
- 55. VRS 48.1
- 56. VRS 49.1
- 57. VRS 50.1
- 58. VRS 51.1
- 59. VRS 52.1
- 60. VRS 53.1
- 61. VRS 54.1
- 62. VRS 55.1
- 63. VRS 56.1
- 64. VRS 57.1

- 65. VRS 58.1
- 66. VRS 59.1
- 67. VRS 60.1
- 68. VRS 61.1
- 69. VRS 62.1
- 70. VRS 63.1
- 71. VRS 64.1
- 72. VRS 65.1
- 73. VRS 66.1
- 74. VRS 67.1
- 75. VRS 67.2
- 76. VRS 68.1
- 77. VRS 69.1
- 78. VRS 70.1
- 79. VRS 71.1
- 80. VRS 72.1
- 81. VRS 73.1
- 82. VRS 74.1
- 83. VRS 75.1
- 84. VRS 76.1
- 85. VRS 77.1
- 86. VRS 78.1
- 87. VRS 79.1
- 88. VRS 80.1
- 89. VRS 81.1
- 90. VRS 82.1
- 91. VRS 83.1
- 92. VRS 84.1
- 93. VRS 85.1
- 94. VRS 86.1
- 95. VRS 87.1
- 96. VRS 88.1

- 97. VRS 89.1
- 98. VRS 90.1
- 99. VRS 91.1
- 100. VRS 92.1
- 101. VRS 93.1
- 102. VRS 94.1
- 103. VRS 95.1
- 104. VRS 96.1
- 105. VRS 97.1
- 106. VRS 98.1
- 107. VRS 99.1
- 108. VRS 100.1
- 109. VRS 101.1
- 110. VRS 102.1
- 111. VRS 103.1
- 112. VRS 104.1
- 113. VRS 105.1
- 114. VRS 106.1
- 115. VRS 107.1
- 116. VRS 108.1
- 117. VRS 109.1
- 118. VRS 110.1
- 119. VRS 111.1
- 120. VRS 112.1
- 121. VRS 113.1
- 122. VRS 114.1
- 123. VRS 115.1
- 124. VRS 116.1
- 125. VRS 117.1

Kontrollprofile:

- 126. VRS 1.9
- 127. VRS 2.9
- 128. VRS 3.9
- 129. VRS 4.9
- 130. VRS 5.9
- 131. VRS 6.9
- 132. VRS 7.9
- 133. VRS 8.9
- 134. VRS 9.9
- 135. VRS 10.9
- 136. VRS 11.9
- 137. VRS 12.9
- 138. VRS 13.9

## Abkürzungen

°	Grad
°C	Grad Celsius
'	Minute
%	Prozent
1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional
$\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ , a, b, g	Einstreuratzen
$\alpha_e$ , $\beta_e$ , $\gamma_e$	höhenkorrigierte Einstreuratzen
$\alpha_n$	komplexe Wellenzahl (n =0: Luft)
A, A'	Amplituden
a	Zählrate der Hintergrundstrahlung des Hubschraubers inkl. des Messsystems
Ah	Amperestunden
Am	Amperemeter
As	Amperesekunden
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
b	kosmische Einstreuung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bi	Bismut
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (heute: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie)
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
C	Gehalt eines Radioelementes im Boden
$C_0$	Radioelementgehalt im Boden
CF	Compact Flash
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
$C_H$	Zählrate im Höhenstrahlungskanal
$c_L$	effektive Kabellänge
cps	counts per second
Cs	Cäsium
$\Delta T$	Anomalien des erdmagnetischen Feldes
$\Delta V$	magnetische Tagesvariationen
$\delta$	Residual
$\delta_p$	inverse, normierte Skintiefe (= h/p)
$D_a$	scheinbarer Abstand
$d_a$	scheinbare Tiefe
DAS	Digital Acquisition System
DC	Gleichstrom
DEM	Digitales Höhenmodell
DGPS	Differential Global Positioning System
$d_n$	Schichtmächtigkeiten
DVD	Digital Versatile Disc

---

$\varepsilon$	Komponentenverhältnis (= Q/I)
$\varepsilon_0, \varepsilon$	dielektrische Permittivität (in Luft: $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
E	Ionendosisleistung am Erdboden
e	Basis des natürlichen Logarithmus ( $1/e \approx 0.37$ )
EM	Elektromagnetik
eTh	Äquivalentgehalt von Thorium
eU	Äquivalentgehalt von Uran
F	IGRF
f	Frequenz
FAS	Fugro Airborne Surveys (heute: CGG)
FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik
flt	ArcGIS GRIDFLOAT-Format
ft	feet (Fuss)
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	globales Navigationssatellitensystem
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
h	Höhe des HEM-Systems über der Erdoberfläche (Flugsondenhöhe)
h_GPS	GPS-Höhe der Flugsonde
h_l	Laserhöhe der Flugsonde
h <sub>0</sub>	Normhöhe des Spektrometers (h <sub>0</sub> = 80 m)
HCP	horizontal-koplanar
h <sub>e</sub>	effektive Höhe
HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HMG	Hubschraubermagnetik
hPa	Hektopascal
h <sub>r</sub>	Radarhöhe des Hubschraubers
HRD	Hubschrauberradiometrie
Hz	Hertz
IAEA	International Atomic Energy Association
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IBS	interaktive Bereichsselektion
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
I	In-phase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten
i	Laufparameter (Daten)
i	imaginäre Einheit
J <sub>0</sub>	Bessel-Funktion (1. Art, 0. Ordnung)
K	Grad Kelvin
K	Kalium, Kaliumkanal
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz

km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
$\lambda$	Wellenzahl
L	Messprofilkennung (line)
l	Liter
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
log	Logarithmus
$\mu$	Absorptionskoeffizient
$\mu_0, \mu$	magnetische Permeabilität (in Luft: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am)
$\mu\text{R/h}$	Mikroröntgen pro Stunde
m	Meter
MB	Megabyte
MeV	Megaelektronenvolt
ms	Millisekunde
N	Norden
N	Anzahl Frequenzen
$N_c$	Zählrate der Hintergrundstrahlung
NaI	Natriumiodid
NN	Normalnull
$N_m$	Zählraten $N_{\text{Th(corr)}}$ , $N_{\text{U(corr)}}$ , $N_{\text{K(corr)}}$ und $N_{c,TC}$ bei effektiver Höhe $h_e$
NNO	Nordnordost
NO	Nordnost
$N_R$	registrierzeitkorrigierte Rohzählrate
$n_R$	Rohzählrate
$N_s$	Zählraten $N_m$ , bezogen auf die Standardhöhe $h_0$
nT	Nanotesla
NW	Nordwest
$N_x$	bzgl. Hintergrundstrahlung und STD-Bedingungen korrigierte Zählraten (x = K, U, Th)
$N_{x(\text{corr})}$	bzgl. der Einstreuratens korrigierte Zählraten (x = K, U, Th)
O	Osten
OSO	Ostsüdost
$\Omega\text{m}$	Ohmmeter (Ohm*m)
$\omega$	Kreisfrequenz
$\pi$	Kreiszahl (= 3,14159265...)
P	im Hubschrauber gemessener Luftdruck
p	Skintiefe
$P_0$	mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe ( $P_0 = 101,325$ kPa)
PC	Personalcomputer
PDF	Portable Document Format

ppm	parts per million
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
$\rho_0, \rho_n, \rho$	spezifischer (Schicht-)Widerstand (in Luft: $\rho_0 > 10^8 \Omega\text{m}$ )
$\rho_a$	scheinbarer spezifischer Widerstand
r	Abstands- oder Ortsparameter
$R_1$	komplexer Reflexionsfaktor
S	Sensitivität
S	Süden
s	Sekunde
SHP	Shaft Horse Power
SO	Südost
STD	Standardbedingungen (Standardtemperatur und -druck)
STP	Standard-Temperatur-Druck
SW	Südwest
SSW	Südsüdwest
T	Kontrollprofilkennung (tie-line)
T	Totalintensität des erdmagnetischen Feldes
T	Temperatur
t	Zeit
$T_0$	Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala (273,15 K)
TC	Total-/Gesamtstrahlung
Th	Thorium, Thoriumkanal
TIFF	Tagged Image File Format
Tl	Thallium
$t_L$	aktive Registrierzeit des Spektrometers
topo	topografische Höhe
U/U-UP	Uran, Urankanal (UP: nach oben)
USA	United States of America
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
V	Volt
$V_m$	Voltmeter
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
$V_s$	Voltsekunde
W	Westen
WNW	Westnordwest
WGS	World Geodetic System
X, Y, Z	kartesische Koordinaten, X = N, Y = O, Z = Tiefenachse
xyz	Geosoft-Format (ASCII-Daten)
Z	relatives magnetisches Sekundärfeld
z	Tiefe
$z^*$	Schwerpunktstiefe

## 1. Zusammenfassung

Für die Erkundung von Grundwasserleitern im Bereich der Hadelner Marsch wurde im Mai/Juni 2004 von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) eine aerogeophysikalische Vermessung durchgeführt. Die Befliegung fand auf Vorschlag und mit finanzieller Unterstützung des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (heute: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik) und des Wasserversorgungsverbandes Land Hadeln bzw. des Wasserversorgungsverbandes Wingst statt. Das Ziel der Untersuchungen im Bereich der Elbmündung war die räumliche Erfassung der Salzwasserintrusion und der Süßwasser führenden Grundwasserleiter. Ein weiteres Ziel war die Kalibrierung und der Praxistest des erstmalig eingesetzten, digitalen elektromagnetischen Messsystems.

Das Hubschraubermesssystem der BGR umfasst in seiner Standardausführung 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 bildet die Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes ab, deren Quellen sowohl oberflächennah als auch aus großer Tiefe stammen können, und in der Radiometrie werden die Verteilungen der Totalstrahlung (Gesamtstrahlung) und der Elemente Kalium, Uran und Thorium sowie die Ionendosisleistung im Boden, deren Quellen in der Regel in den oberflächennahen Bereichen des Untergrundes liegen, bestimmt.

Das im Jahr 2004 eingesetzte Messsystem bestand 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 gut 40 m für Elektromagnetik und Magnetik und etwa 80 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 gemessen, was bei einer Fluggeschwindigkeit von etwa 140 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 der Messdaten sowie der Daten der parallel registrierenden Bodenstation erfolgte nach Abschluss der Befliegung in der BGR in Hannover.

Das Messgebiet Hadelner Marsch hat eine maximale Ausdehnung von 29 km in N-S- und 26 km in W-O-Richtung. Es wird durch die Elbe im Norden, das Messgebiet Cuxhaven im Westen, das Messgebiet Bremerhaven im Südwesten sowie den Breitengrad 53°36' im Süden und den Längengrad 9°08' im Osten begrenzt.

Mit 18 Messflügen, die 117 Mess- bzw. 13 Kontrollprofile mit einer Gesamtlänge von etwa 3000 Profilkilometer umfassen, wurde vom 25. Mai bis 11. Juni 2004 eine Fläche von etwa 700 km<sup>2</sup> vermessen. Der Sollabstand der WNW-OSO-Profile betrug 250 m, derjenige der SSW-NNO-Kontrollprofile 2000 m. Mit je einem weiteren Flug wurde das HEM-System über tiefem Meerwasser vor

Helgoland kalibriert bzw. für einen Test der Einsatzmöglichkeit für die Deicherkundung ein Nord-seedeich mehrmals überflogen. Aufgrund technischer Probleme, die meist auf Störungen durch externe Sender (Radaranlagen) beruhten, mussten einige Profile wiederholt bzw. konnten nicht ausgewertet werden.

Der „Technische Bericht“ protokolliert die Durchführung der aerogeophysikalischen Vermessung und beschreibt die verwendete Messausrüstung sowie die Bearbeitung der Daten und die Darstellung der Ergebnisse in Form von Schnitten und Karten.

Der vorliegende Bericht stellt eine Revision des Technischen Berichtes aus dem Jahr 2005 dar. Dies wurde notwendig, da bisher nur die HEM-Ergebnisse beschrieben worden waren. Die Auswertung der HMG- und HRD-Daten erfolgte zwar in den Jahren 2007 und 2008, aber ohne Dokumentation in einem Technischen Bericht. Aus Anlass der Einstellung der Produkte der Aerogeophysik in die Geodaten-Infrastruktur (GDI) der BGR und der Bereitstellung dieser Produkte im BGR-Produktcenter wurde die Revision des Technischen Berichtes erstellt.

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 vorliegen, sind im Maßstab 1:50.000 erstellt worden:

- Fluglinienplan der für die HEM ausgewerteten Profile (Ist-Flugwege).
- Digitales Geländemodell.
- Scheinbare spezifische Widerstände (Halbraumwiderstände) und Schwerpunktstiefen für die fünf HEM-Messfrequenzen 375, 1778, 8510, 37.830 und 139.600 Hz.
- Spezifische Widerstände in den Tiefen -5, -7, -10, -15, -20, -30, -40, -50, -60 und -70 m NN, abgeleitet aus den HEM-1D-Inversionsmodellen.
- Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes,
- Gehalte von Kalium im Boden in %, die Äquivalenzgehalte von Thorium und Uran im Boden in ppm, die Totalstrahlung in cps und die Ionendosisleistung im Boden in  $\mu\text{R/h}$ .

Die Interpretation der Daten hinsichtlich der oben genannten Zielsetzung werden nicht in diesem Technischen Bericht, sondern in anderen Publikationen behandelt.

## 2. Einleitung

Die in dem Forschungsvorhaben „Pilotstudie zu einer detaillierten aerogeophysikalischen Landesaufnahme“ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) gewonnenen Erfahrungen im Raum Cuxhaven–Bremerhaven (Siemon et al., 2004) sollten in einem weiteren, für die Trinkwasserversorgung bedeutsamen Gebiet mit tiefen quartären Rinnensystemen und Kontakt zum Meerwasser eingebracht werden. Hierzu führte die BGR (Referat B3.13, heute Fachbereich B2.1) im Bereich der Hadelner Marsch im Mai/Juni 2004 eine aerogeophysikalische Vermessung durch. Die Befliegung fand auf Vorschlag und mit finanzieller Unterstützung des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA, heute: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik) und des Wasserversorgungsverbandes Land Hadeln bzw. des Wasserversorgungsverbandes Wingst statt. Das Ziel der Untersuchungen im Bereich der Elbmündung war die räumliche Erfassung der Salzwasserintrusion und der Süßwasser führenden Grundwasserleiter. Ein weiteres Ziel war die Kalibrierung und der Praxistest des erstmalig eingesetzten, digitalen elektromagnetischen Messsystems.

Das Hubschraubermesssystem der BGR umfasst in seiner Standardausführung die Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD), 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 Gesamtstrahlung und der Elemente Kalium, Uran und Thorium sowie die Ionendosisleistung im Boden bestimmt.

Die Auswertung der HEM-Daten erfolgte im Jahr 2005 und wurde bereits in einem Technischen Bericht dokumentiert (Siemon et al., 2005). Der vorliegende Bericht stellt eine Revision dieses Technischen Berichtes dar. Die Revision wurde notwendig, da die Auswertung der HMG- und HRD-Daten zwar in den Jahren 2007 und 2008 erfolgte, aber es wurde keine Dokumentation in einem Technischen Bericht durchgeführt. Die Revision des Technischen Berichtes wurde anlässlich der INSPIRE-konformen Einstellung der Produkte der Aerogeophysik in die Geodaten-Infrastruktur (GDI) der BGR und der Bereitstellung dieser Produkte, zu denen auch der Technische Bericht zählt, im BGR-Produktcenter (<http://produktcenter.bgr.de/>) erstellt. In diesem Bericht ist die Durchführung und Auswertung der Befliegung in der Hadelner Marsch dokumentiert. Die beigefügten Karten und Schnitte entsprechen dem damaligen Stand der Auswertung. Lediglich der digitale Export der finalen Ergebnisse in ASCII-Dateien, TIFF-Grafiken, ArcGIS-Datenbanken und -Gitterdaten (*grids*) erfolgte in den aktuellen Formaten, um die Konformität zu allen anderen Exporten zu gewährleisten. Die Ergebnisse dieser Befliegung sind auch über das Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des LIAG (<http://www.geophysics-database.de/>) abrufbar.

### 3. Messgebiet und Befliegung

Das Messgebiet Hadelner Marsch hat eine maximale Ausdehnung von 29 km in N-S- und 26 km in W-O-Richtung. Das Befliegungsgebiet wird durch die Elbe im Norden, das Messgebiet Cuxhaven (Siemon et al., 2013) im Westen, das Messgebiet Bremerhaven (Siemon et al., 2011) im Südwesten sowie den Breitengrad 53°36' im Süden und den Längengrad 9°08' im Osten begrenzt. Hier schließt sich das Messgebiet Glückstadt (Steuer et al., 2013) an. **Tabelle 1** enthält die Kenndaten für das Messgebiet und **Abbildung 1** zeigt einen Lageplan des Messgebietes (mit roter Linie umrandete Fläche) sowie die Blattsschnitte der Topographischen Karten im Maßstab 1:50.000 zur Darstellung der Ergebnisse (schwarz gestrichelt eingerahmte Fläche). Die Nachbargebiete Cuxhaven und Bremerhaven (Befliegung in den Jahren 2000 und 2001) sind durch hellviolette bzw. ockerfarbene Punkte gekennzeichnet. Das Messgebiet erstreckt sich über das TK100-Kartenblatt C 2318 Cuxhaven.

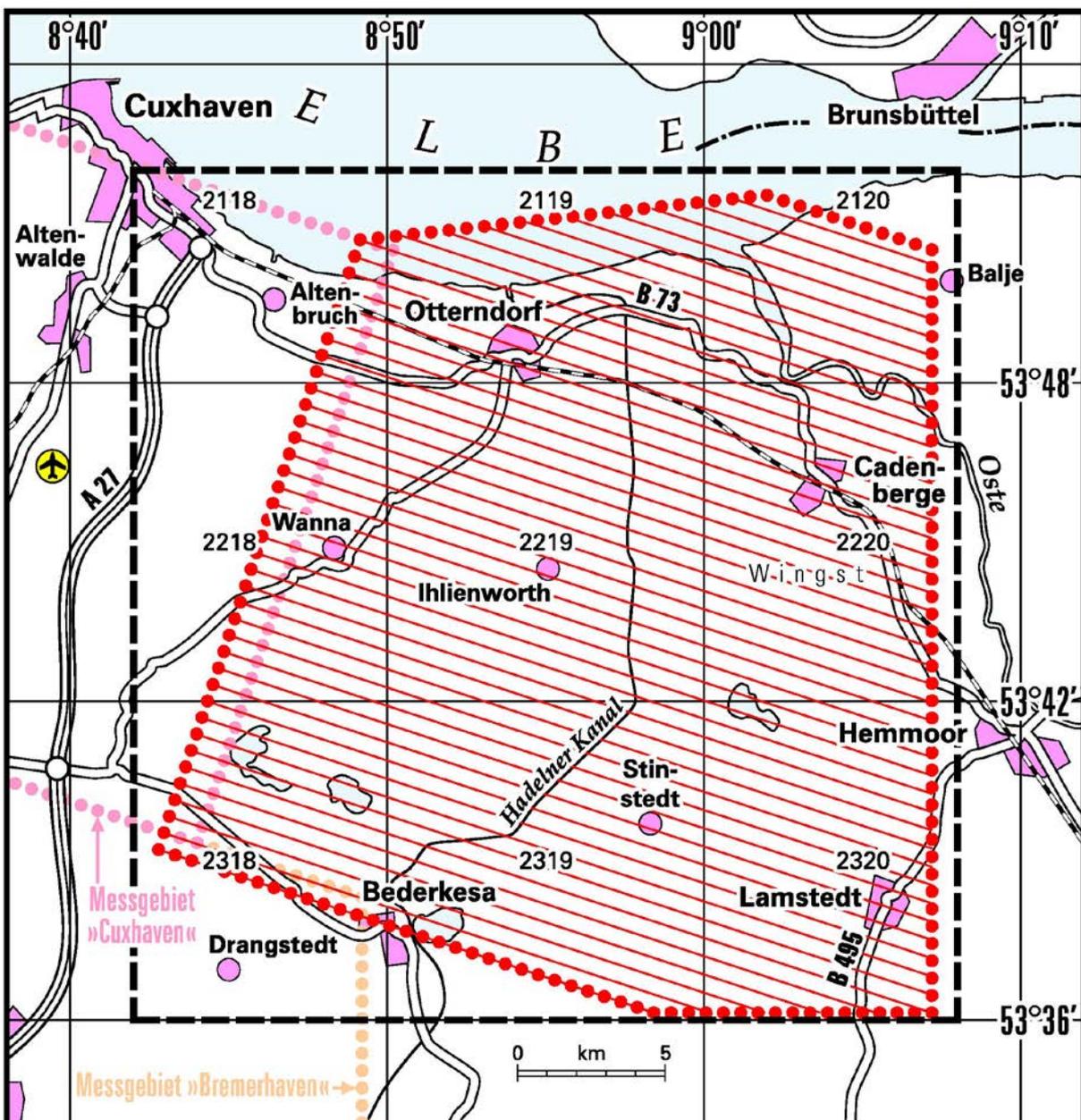


Abbildung 1. Lageskizze des Messgebietes Hadelner Marsch.

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Hadelner Marsch hohe Ansprüche an den erstmalig eingesetzten Piloten der Firma Wiking Helikopter Service GmbH dar, da das Gelände durch zahlreiche Hochspannungsleitungen durchzogen und z. T. dicht besiedelt war. Störungen der Messungen z. B. durch Radarsender, Starkstromleitungen oder über Ortschaften waren vorhanden. Dennoch konnten die Messungen meist wie geplant durchgeführt werden.

Die geophysikalische Befliegung des Messgebietes Hadelner Marsch wurde vom 25. Mai bis 11. Juni 2004 vom Flugplatz Nordholz-Spieka aus durchgeführt. Mit 18 Messflügen, die 117 Mess- bzw. 13 Kontrollprofile mit einer Gesamtlänge von etwa 3000 Profilkilometer umfassen, wurde eine Fläche von etwa 700 km<sup>2</sup> vermessen. Aufgrund technischer Probleme, die meist auf Störungen durch externe Sender (Radaranlagen) beruhten, mussten einige Profile wiederholt bzw. konnten zwei bei HEM nicht ausgewertet werden.

Die Befliegung fand auf parallelen Messprofilen bei einem vorgegebenen Profilabstand von 250 m und senkrecht hierzu auf Kontrollprofilen mit deutlich größerem Profilabstand von 2000 m statt. Die Messprofilrichtung in diesem Messgebiet war WNW–OSO, die der Kontrollprofile SSW–NNO. Die vorwiegend nach Norden bzw. Osten geflogenen Profile wurden 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 einige Messprofile wiederholt oder geteilt werden mussten, erhielten diese die Kennung „.2“ bzw. „.3“. In der HEM konnten zwei Messprofile (L8 und L9) nicht ausgewertet und zehn Messprofile mussten geteilt werden, sodass sich – abweichend von HMG und HRD – 125 Messprofile ergaben.

Die Flughöhe des Hubschraubers betrug während der Messflüge im Mittel etwa 80 m über Grund. Über Wald, bebauten Gebieten und Hochspannungsleitungen konnte 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, stieg der Hubschrauber mit dem Messsystem eine deutlich größere Höhe (>350 m), um fern von störenden Einflüssen die notwendigen Kalibrierungen des HEM-Systems durchführen zu können.

Die Bodenstation zur Aufzeichnung von magnetischen Tagesvariationen und Luftdruck wurde am Ostende des Segelflughafens Spieka bei 8,651536° östlicher Länge und 53,769985° nördlicher Breite aufgestellt.

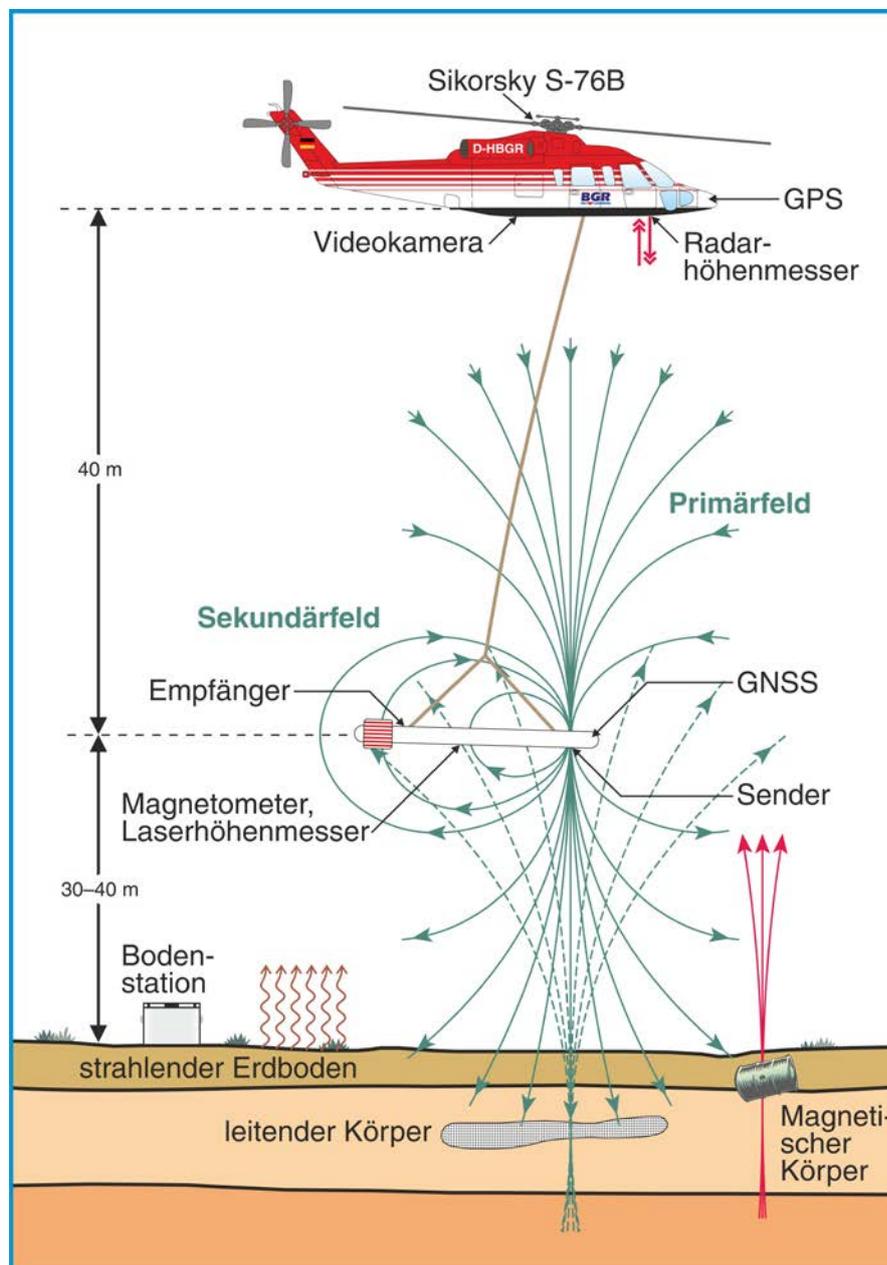
Einzelheiten zum Messgebiet und den Messflügen können **Tabelle 1** und dem **Anhang I** entnommen werden.

**Tabelle 1.** Technische Daten der Befliegung Hadelner Marsch

Messgebiet BGR-Gebietsnummer	Hadelner Marsch 109
Befliegungszeitraum	25.05.–11.06.2004
Größe des Messgebietes	700 km <sup>2</sup>
Gesamtprofilkilometer	etwa 3000 km
Gesamtzahl der Messflüge	20
Bezeichnung der Messflüge	10900–10919
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	44 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit über Grund	143 km/h
Mittlerer Messpunktabstand	4 m
Zahl der Messprofile	117
Zahl der Messprofilflüge	16
Länge der Messprofile	9–28 km
Richtung der Messprofile	108,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	250 m
Zahl der Kontrollprofile	13
Zahl der Kontrollprofilflüge	2
Länge der Kontrollprofile	11–28 km
Richtung der Kontrollprofile	18,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	2.000 m
Sonderflüge (Kalibrierung HEM, Nordseedeich)	2

#### 4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR

Das aktuelle aerogeophysikalische Messsystem der BGR besteht aus einem Messhubschrauber und diversen aerogeophysikalischen und fernerkundlichen Verfahren (Meyer & Siemon, 2014). Mit dem Standardmesssystem, das für die Befliegung im Jahr 2004 eingesetzt wurde, wurden die Daten für die drei Methoden Elektromagnetik, Magnetik und Radiometrie (Gammastrahlenspektrometrie, Szintillometrie) erfasst. 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, welches sich in einer Flugsonde oder im Hubschrauber bzw. in einer Referenzstation am Boden befindet (**Abbildung 2**).



**Abbildung 2.** Prinzipische Skizze des Hubschraubermesssystems der BGR

#### 4.1. Messhubschrauber

Im Jahre 1986 wurde vom Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) der derzeit eingesetzte Hubschrauber vom Typ Sikorsky S-76B (siehe **Tabelle 2**) angeschafft und der BGR als Messhubschrauber zur Verfügung gestellt. Im November 2013 wurde der Hubschrauber an die BGR als nachgeordnete Behörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) übergeben.

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

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

#### 4.2. Messausrüstung

Im Messhubschrauber befinden sich das Gammastrahlenspektrometer, die Navigationsgeräte, der barometrische und der Radarhöhenmesser, die Videokamera sowie die Steuer- und Registriereinheit. Das HEM-System, das Magnetometer, der Laserhöhenmesser sowie die Positionserfassung sind in einer Flugsonde eingebaut, die durch ein ca. 45 m langes Kabel mit dem Hubschrauber verbunden ist und in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit etwa 40 m unterhalb des Hubschraubers geschleppt wird (**Abbildung 2**). Die Länge des Kabels ist so bemessen, dass die Messungen der hochempfindlichen magnetischen und elektromagnetischen Sensoren (**Tabelle 3**) durch den Hubschrauber möglichst wenig gestört werden. Die äußere Hülle der etwa 10 m langen, zigarrenförmigen Flugsonde, die einen Durchmesser von 0,5 m hat, ist aus Kevlar gefertigt, um eine möglichst hohe Biegesteifigkeit zu erhalten. Dieses Material zeichnet sich durch eine extrem hohe mechanische Festigkeit bei gleichzeitig geringer elektrischer Leitfähigkeit aus.

Die analogen und digitalen Daten werden zentral durch das DAS 8 (Data Acquisition System) erfasst und analog auf Thermopapier bzw. digital auf einer ZIP-Diskette aufgezeichnet.

**Tabelle 3.** Geophysikalische Messsysteme

Geophysikalische Messsysteme		
Flugsonde	<b>I. Elektromagnetisches 5-Frequenz-Messsystem (HEM)</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes bis zu Tiefen von etwa 150 m
	<b>Hersteller</b>	Fugro Airborne Surveys (FAS), Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	DIGHEM <sup>CP5_DSP</sup> (BKS60, intern: 60)
	<b>II. Cäsiummagnetometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung des erdmagnetischen Totalfeldes
	<b>Hersteller</b>	Geometrics, USA
	<b>Gerätebezeichnung</b>	G-822A
Hubschrauber	<b>III. Gammastrahlenspektrometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
	<b>Hersteller</b>	Exploranium, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Spektrometer: GR-820 (inklusive Kristalldetektor: GPX-1024)

### 4.3. Elektromagnetik

Bei dem elektromagnetischen (EM) Messverfahren werden von den Sendespulen zeitlich variierende magnetische Felder, die Primärfelder, bei 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 HEM-Systems (vgl. **Abbildung 2**).

Bei dem hier verwendeten HEM-System wird für jede der fünf Messfrequenzen im Bereich von 375 Hz bis 140 kHz (BKS60, **Tabelle 4**) ein eigenes Spulensystem benutzt, das aus horizontal-koplanar angeordneten Sende-, Empfangs-, Kompensations- und Kalibrierspulen besteht.

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

Mit Hilfe der Kalibrierspulen, die im Zentrum der jeweiligen Empfangsspulen liegen, werden definierte Ausschläge im Messsignal erzeugt und in der Einheit ppm angegeben. Diese relative Einheit wird benutzt, da das Sekundärfeld, das sehr viel kleiner als das Primärfeld ist, auf das Primärfeld am

Ort der Empfangsspule normiert wird. Die hierzu notwendigen Umrechnungsfaktoren von der gemessenen Spannung in V in ppm wurden vom Hersteller geliefert.

**Tabelle 4.** HEM-Systemparameter für BKS60

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
375	7,92	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.778	7,91	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
8.510	7,96	horizontal-koplanar	EM_2	3. Frequenz
37.830	8,03	horizontal-koplanar	EM_1	4. Frequenz
139.600	7,92	horizontal-koplanar	EM_4	5. Frequenz

Die Größe der empfangenen Sekundärfelder sowie ihre zeitliche Verzögerung gegenüber den erzeugenden Primärfeldern werden registriert. Aus diesen beiden Größen, Amplitude und Phasenverschiebung oder Real- und Imaginärteil (In-phase I und Quadrature Q), kann die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes bzw. deren Kehrwert, der spezifische Widerstand, berechnet werden, wobei die verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Eindring- oder Aussagetiefen haben. Je niedriger die Frequenz ist, umso tiefer dringen die elektromagnetischen Felder in den Untergrund ein. Die Eindringtiefe hängt aber auch vom spezifischen Widerstand im Untergrund ab: Je höher er ist, desto größer ist auch das Eindringen der Felder. Mit der niedrigsten Frequenz von 375 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 aufgrund der Frequenzabhängigkeit der HEM-Amplituden insbesondere bei den niedrigen Frequenzen bemerkbar machen können. Da der Hubschrauber auch als ein solches Objekt anzusehen ist, ist das HEM-System in einer Flugsonde eingebaut und wird in genügend großem Abstand (etwa 40 m) unterhalb des Hubschraubers geschleppt.

#### 4.4. Magnetik

Die Totalintensität des erdmagnetischen Feldes wird mit Hilfe eines in der Flugsonde montierten hochempfindlichen Cs-Magnetometers (**Tabelle 3**) gemessen und in der Einheit Nanotesla (nT) angegeben. Die Funktion eines Cs-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 Norddeutschland hat es eine Stärke von etwa 49.000 nT. Es wird vom

Krustenfeld überlagert, dessen Quellen Gesteine mit Anteilen an ferromagnetischen Mineralien sind. 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. Während geogene Anomalien im Allgemeinen eine große räumliche Ausdehnung aufweisen, sind anthropogene Störungen des Magnetfeldes meist örtlich begrenzt und lassen sich daher sicher identifizieren. Schließlich unterliegt das geogene Magnetfeld aufgrund von Schwankungen im Zustand der Ionosphäre einem Tagesgang. Diese Prozesse bewirken in Mitteleuropa Variationen von etwa 10 bis 30 nT.

Zur Erfassung des magnetischen Tagesganges wird eine ebenfalls mit einem Cs-Magnetometer bestückte Bodenstation betrieben (**Tabelle 5**). Sie zeichnet an einem im Regelfall magnetisch ungestörten 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 Bodenstation die GPS-Zeit mitregistriert.

**Tabelle 5.** *Bodenstation*

<b>Bodenstation</b>	
<b>Aufgabe</b>	Automatische Registrierung des magnetischen Totalfeldes und des barometrischen Druckes
<b>Hersteller</b>	Bodenstation: FAS, Kanada Magnetometer: Cs-Sensor H-8, SCINTREX, Kanada Barometer: MPXS4115A, MOTOROLA, Kanada
<b>Gerätebezeichnung</b>	CF1 Data Logger

#### **4.5. Radiometrie**

Die von natürlichen und künstlichen Radionukliden ausgehende Gammastrahlung wird mit Hilfe eines Kristalldetektors gemessen (**Tabelle 3**). Zur Verwendung kam ein digitales Gammastrahlenspektrometer vom Typ GR-820 der Firma Exploranium (Kanada). Der Kristalldetektor vom Typ GPX-1024 besteht aus fünf Natriumiodid(NaI)-Kristallen. Das Spektrometer ist fest im Hubschrauber montiert. Jeder der NaI-Kristalle hat ein Volumen von 4 Litern. Vier der Kristalle registrieren die von unten und von den Seiten einfallende Strahlung, der fünfte Kristall dient zur Aufzeichnung der von oben eintreffenden Strahlung. Eintretende Gammastrahlung wird durch die Kristalle absorbiert und dabei in Lichtimpulse umgewandelt. Diese werden über Photovervielfacherröhren in elektrische Impulse gewandelt, wobei die Amplitude der Impulse proportional zur Energie der einfallenden Gammastrahlung ist. Das Spektrometer besitzt einen Spektralbereich von 0 bis 3 MeV, der in 256 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 (**Tabelle 6**). Die Stabilisierung des Spektrometers erfolgt über die natürliche Thoriumstrahlung (down) bzw. mit einer Cäsiumprobe (up). 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. Der nach oben ausgerichtete Kristall ist gegen von unten eintreffende Strahlung abgeschirmt und dient zur Erfassung der Strahlung, die von radioaktivem atmosphärischem Radongas ausgeht und bei der Bestimmung der natürlichen Radionuklide im Boden störend wirkt.

**Tabelle 6.** Energiebereiche und Kanalzuordnungen registrierter Strahlungsquellen

Strahlungsquelle	Energiebereich in MeV	Energiepeak in MeV	Kanäle
Totalstrahlung	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	201–233
Höhenstrahlung	3,0–6,0	—	255

Das Gammastrahlenspektrometer summiert die Spektren über jeweils eine Sekunde auf, daher wird als Einheit für die Zählraten cps (*counts per second*) verwendet. **Tabelle 6** zeigt die Zuordnung der Strahlungsquellen zu den Kanälen in den aufgezeichneten Spektren. Die Aufzeichnung des Uran-Energiebereichs erfolgt getrennt für die nach unten gerichteten und den nach oben gerichteten Kristallen.

#### 4.6. Navigations- und Positionierungssystem

Ein GPS-Empfänger, dessen Antenne außen am Hubschrauber montiert ist, liefert laufend Positionsangaben an das Navigationssystem. Die GPS-Daten werden zusammen mit den geophysikalischen Daten über das DAS 8 (**Kapitel 4.2**) gespeichert.

Aufgabe des Navigationssystems (**Tabelle 7**) ist es, dem Piloten alle zur Durchführung eines Messfluges notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen. Hierzu werden zunächst mit dem Programm LiNav von AG-NAV Inc. die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte sämtlicher Mess- bzw. Kontrollprofile aus den Messgebietsgrenzen, der Profilrichtung und dem Abstand der Messprofile berechnet. Diese werden an den Navigationscomputer im Hubschrauber übergeben und auf einem Display im Cockpit dargestellt. Über eine separate Anzeige erhält der Pilot alle erforderlichen Informationen, um dieses Messprofil so genau wie möglich abzufliegen. Die – neben der Radarhöhe – wichtigste Information ist dabei die jeweilige seitliche Abweichung von dieser Linie, die sowohl digital als Meterangabe als auch linear in Form eines Balkendiagramms erscheint. Die Positionsangaben erhält der Navigationsrechner von einem GPS-Navigationsempfänger, dessen Antenne außen am Hubschrauber angebracht ist. Der Fehler des Navigationssystems beträgt weniger als 1–2 m.

Aufgabe eines globalen Navigationssatellitensystems (GNSS) (**Tabelle 7**) ist es, zu jeder geophysikalischen Messung die Koordinaten zu liefern. Dafür wird ein GPS-Navigationsempfänger verwendet, dessen Antenne sich innerhalb der Flugsonde befindet. Auch hier liegt der Fehler der Koordinaten in der Regel unterhalb von 1–2 m.

**Tabelle 7.** Navigations- und Positionierungssysteme

Systeme zur Navigation und Positionierung		
Hubschrauber	<b>GPS-Navigationssystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Erfassung und Anzeige in grafischer und digitaler Form der für den Piloten zur Durchführung von Messflügen notwendigen GPS-Navigationsparameter.
	<b>Hersteller</b>	Navigationscomputer und Anzeige: AgNav, Kanada GPS-Empfänger: CSI WIRELESS, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Navigationscomputer: PNAV 2100 GPS-Empfänger: DGPS MAX
Flugsonde	<b>Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der geografischen Position und Höhe der Flugsonde
	<b>Hersteller</b>	CSI Wireless, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	DGPS MAX

Die genaue Höhe der Flugsonde (**Tabelle 8**) über der Erdoberfläche wird zur Auswertung der elektromagnetischen Daten und zur Erstellung eines digitalen Geländemodells benötigt.

**Tabelle 8.** Höhenmesser

Höhenmesser		
Hubschrauber	<b>Radarhöhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über der Erdoberfläche
	<b>Hersteller</b>	Sperry, USA
	<b>Gerätebezeichnung</b>	AA-200
	<b>Barometrischer Höhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der absoluten Höhe des Hubschraubers
	<b>Hersteller</b>	Rosemount, USA
<b>Gerätebezeichnung</b>	1241A5B	
Flugsonde	<b>Laserhöhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Präzise Bestimmung der Höhe der Flugsonde über der Erdoberfläche
	<b>Hersteller</b>	Riegl, Österreich
	<b>Gerätebezeichnung</b>	LD90-31K

Durch einen in die Flugsonde eingebauten Laserhöhenmesser wird diese Höhe auf  $\pm 0,2$  m genau bestimmt, wenn die Lage der Flugsonde bekannt ist. Fehlt diese, dann können die Ungenauigkeiten aufgrund des Pendelns der Flugsonde auch mehrere Meter betragen. Ein weiterer Vorteil des Laserhöhenmessers ist der fokussierte Durchmesser des Laserstrahls, der es ermöglicht, über lichten Wäldern häufig die Entfernung bis zum Boden zu erfassen und nicht nur den Abstand bis zu den Baumkronen.

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

Mit Hilfe eines GPS-Empfängers wird die absolute Höhe des Hubschraubers bestimmt, die jedoch ohne Verwendung einer Referenzstation am Boden oder einem anderen Korrekturverfahren einen Fehler von einigen Metern aufweisen kann. Die Flughöhe des Hubschraubers (**Tabelle 8**) über der Erdoberfläche bzw. über Hindernissen (z. B. Wäldern und Gebäuden) wird im Normalfall zur Auswertung der radiometrischen Daten benötigt. Diese mit dem Radarhöhenmesser erfassten Höhen über der Erdoberfläche bzw. Bewuchs dienen auch zur Flugführung.

#### 4.7. Datenerfassung

Die Erfassung und Aufzeichnung der geophysikalischen und Positionsdaten erfolgt über das DAS 8 (**Tabelle 9**). Die Datenspeicherung erfolgt auf einer ZIP-Diskette. 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.

**Tabelle 9.** *Datenerfassung und -aufzeichnung*

Datenerfassung / Datenaufzeichnung		
Hubschrauber	<b>Datenerfassungs- und Datenaufzeichnungssystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Digitalisierung analoger Signale; Zwischenspeicherung digitaler Daten; Zusammenstellung ausgewählter Daten zu Datenblöcken; Übertragung von Datenblöcken zum digitalen Datenrekorder sowie zum Analogrekorder
	<b>Hersteller</b>	RMS, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	DAS 8
Hubschrauber	<b>Digitaler Datenrekorder</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Speicherung der Messdaten auf einem digitalen Datenträger
	<b>Hersteller</b>	RMS, Kanada, modifiziert durch BGR
	<b>Gerätebezeichnung</b>	-

#### 4.8. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber

Eine 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.

Die DC-Bordspannung (28 V) des Hubschraubers wird über eine Pufferbatterie (24 Ah) geglättet und anschließend über Sicherungen auf die einzelnen Geräte des Messsystems verteilt (**Tabelle 10**). Die Steuerungs- und Aufzeichnungsgeräte des aerogeophysikalischen Messsystems befinden sich in einem 19-Zoll-Geräteschrank. Der Geräteschrank ist über Schwingungsdämpfer mit einer Holzplatte verbunden, die fest mit dem Boden des Hubschraubers verschraubt ist.

**Tabelle 10.** *Sonstige Ausrüstung*

Sonstige Ausrüstung		
Hubschrauber	<b>Videosystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Aufzeichnung des Flugweges sowie über einen Monitor, Kontrolle der Messsonde bei Start und Landung und während des Messfluges
	<b>Hersteller</b>	Farbkamera: PULNIX, USA; Videorekorder: TOSHIBA, Japan
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Farbkamera: TMC-63M; Videorekorder: V701 TO
	<b>Zentrale Spannungsversorgung</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Pufferung der DC-Bordspannung des Hubschraubers
	<b>Hersteller</b>	Sikorsky, USA
	<b>Geräteschrank</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Aufnahme von Messgeräten des aerogeophysikalischen Messsystems
	<b>Hersteller</b>	Sikorsky, USA

## 5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten

Die Ziele der Datenverarbeitung können wie folgt zusammengefasst werden:

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

Die Auswertung der aerogeophysikalischen Daten zu den Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD) wird – je nach Anforderung – in verschiedenen Auswertebenen (Levels) durchgeführt. **Tabelle 11** zeigt diese Auswertungsebenen in der Übersicht für die Elektromagnetik.

**Tabelle 11.** HEM-Auswertung (Übersicht)

Level	Bezeichnung	Umfang	Details	Produkte
1	Befliegung	Datenerfassung und Feldprozessierung	Daten- und Qualitätskontrolle automatische Prozessierung	HEM-Daten und Halbraumparameterkarten
2	Standardauswertung	Feinprozessierung	Niveauekorrektur (Stützstellen, Statistik, 2D-Filterung), automatische Datenselektion, einfache 1D-Inversion	wie bei 1 plus 1D-HEM-Modelle als Karten und Vertikalschnitte
3	Optimierte Prozessierung	Detailprozessierung mit Zusatzinformationen	Korrektur anthropogener Effekte mittels interaktiver Bereichsselektion (IBS), 1D-Inversion mit Randbedingungen	wie bei 2
4	Gekoppelte Modellierung	3D-geophysikalische plus hydro-/geologische Modellierung	iterative Modellierung, 1D/3D-Inversion (HEM) mit Randbedingungen aus definierten Schnittstellen bzw. gemeinsamen Modellraum	3D-Modelle (HEM- plus geologische bzw. Grundwassermodelle)
5	Nutzerorientierte Parametrisierung	Interpretation der elektrischen Leitfähigkeit bzgl. hydro-/geologischen Parametern	speziell festzulegen	Aussagen und Grafiken zu nutzerbasierten Parametern

Für die Magnetik und Radiometrie gelten analoge Auswertungsebenen. Der wesentliche Unterschied in den ersten drei Ebenen (Levels) besteht darin, dass für HMG und HRD keine 1D-Inversionen durchgeführt und somit auch keine 1D-Modelle als Vertikalschnitte dargestellt werden. Die weitere Auswertung und Interpretation der HMG- und HRD-Daten verläuft völlig unterschiedlich zu der HEM-Auswertung/Interpretation.

## 5.1. Prozessabläufe

Die aerogeophysikalischen Daten wurden bereits während des Feldbetriebes auf Plausibilität sowie technische und formale Korrektheit überprüft. Hierzu wurden die Messdaten direkt nach Beendigung eines Messfluges anhand der Aufzeichnung auf Thermopapier begutachtet.

Die Datenbearbeitung beginnt mit der Bearbeitung der Positionsdaten:

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

Die folgenden Datenverarbeitungsschritte sind für alle Methoden gültig:

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

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

## 5.2. Positionsdaten

Die Bearbeitung der Positionsdaten erfolgte vor der Auswertung der geophysikalischen Daten und wurde mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft bzw. eigenen Programmen vorgenommen.

### 5.2.1. GPS-Koordinaten

Die während des Fluges registrierten Koordinaten, die die Positionen des Hubschraubers und der Flugsonde angeben, beziehen sich auf das WGS84-System. Diese geografischen Koordinaten wurden für die Positionen des Hubschraubers bzw. der Flugsonde in ein lokales, kartesisches Koordinatensystem transformiert, wobei auch fehlende Koordinatenwerte durch lineare Interpolation ergänzt wurden. Alle Ergebnisse für das Messgebiet Hadelner Marsch sind auf GK-Koordinaten (Zone 3) bezogen.

### 5.2.2. Radarhöhen

Die vom Hubschrauber aus gemessenen Radarhöhenwerte wurden von mV in m umgerechnet und auf die Höhe der Flugsonde bezogen, d. h. die mittlere effektive Kabellänge  $c_L$  (41 m) musste noch abgezogen werden:

$$h_r \text{ [m]} = h_r \text{ [mV]} \cdot 250 \text{ [ft/mv]} \cdot 0,3048 \text{ [m/ft]} - c_L \text{ [m]}.$$

### 5.2.3. Laserhöhen

Die mit einem Laserhöhenmesser gemessenen Höhen der Flugsonde über Gelände können Fehler (Ausreißer, Lücken) enthalten, die linear korrigiert wurden. Ferner können zu große Werte (verursacht durch Neigung oder seitliche Auslenkung der Flugsonde) oder zu kleine Werte (Bewuchs, Bebauung) auftreten.

#### 5.2.4. Barometrische Höhen

Die barometrische Höhe des Hubschraubers wurde durch einen Druckmesser erfasst. Der zeitliche Verlauf der Luftdruckschwankungen wurde mit einem Drucksensor in der Bodenstation registriert und korrigiert. Abschließend wurde die barometrische Höhe bei Start und Landung auf die absolute Höhe des Flugplatzes bezogen.

#### 5.2.5. Topografische Höhen

Die topografische Höhe des Geländes (topo) wurde aus der Differenz der GPS-Höhe der Flugsonde ( $h_{\text{GPS}}$ ) und der Laserhöhe ( $h_{\text{l}}$ ) berechnet

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

Sie wird benötigt, um die aus den Messdaten abgeleiteten Geländehöhen (DEM) in Kartenform oder auch dreidimensional darstellen zu können.

### 5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik

Die Auswertung der gemessenen HEM-Daten, Realteil I (In-phase oder 0°-Phase) und Imaginärteil Q (Out-of-phase, Quadrature oder 90°-Phase) erfordert mehrere Bearbeitungsschritte:

- Berücksichtigung der Kalibrierung;
- Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur;
- Datenkorrektur;
- Transformation in Halbraumparameter;
- Statistische Niveauekorrektur (*Microlevelling*);
- Interpolation und Glättung;
- Inversion in Widerstands-Tiefen-Modelle.

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

Neben dem eigentlichen Nutzsignal, das von elektrisch leitfähigem Material an und unter der Erdoberfläche herrührt, treten auch Störsignale in den Messdaten auf, die durch z. B. Bewegung des Systems oder durch externe Felder verursacht werden. Im Zuge der Datenverarbeitung wurden diese Effekte lediglich geglättet (Level 2 in **Tabelle 11**).

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

### 5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems

Das HEM-System wurde von dem Hersteller (Fugro Airborne Surveys (FAS), heute: CGG) mit Hilfe von externen Spulen auf schlecht leitendem Untergrund in Kanada (Mountsbury Conservation Area südwestlich von Toronto) kalibriert. Nach der Optimierung der Phaseneinstellungen mit Hilfe eines Ferritstabes lassen sich mit diesen externen Kalibrierspulen Signale bekannter Größe in den Empfängern erzeugen. Diese Kalibrierwerte werden benutzt, um die Ausschläge, die durch die internen Kalibrierspulen erzeugt werden, in ppm anzugeben (**Tabelle 12**). Da Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht auszuschließen sind, wurden die Kalibrierfaktoren mit einem Flug über der Nordsee vor Helgoland überprüft. Dort gibt es eine etwa 50 m tiefe Rinne, die eine ausreichend große Wassertiefe garantiert. Unter der Annahme homogener Leitfähigkeit des Meerwassers wurden die Halbraumwiderstände des Meerwassers und die Abstände der Wasseroberfläche zum Messsystem aus den HEM-Daten zu jeder Messfrequenz bestimmt und mit den Sollwerten, dem spezifischen Widerstand von Meerwasser und der Laserhöhe, verglichen.

Zu Beginn eines Messfluges wurden in großer Flughöhe die Eichausschläge der internen Kalibrierspulen überprüft und automatisch nachjustiert. Temperaturänderungen während des Fluges haben Einfluss auf die Messelektronik. Daher wurden die internen Kalibrierspulen mehrmals während eines Messfluges eingeschaltet, um Phasenlagen und Verstärkungen der Eichausschläge für alle Frequenzen zu überprüfen. Diese in großer Flughöhe mehrmals aufgezeichneten Eichsignale wurden automatisch bei der Datenverarbeitung in den Messdaten erkannt und ihre relativen Amplituden (in mV) mit statistischen Verfahren bestimmt. Aus Vergleich der Amplituden und Phasen der Messdaten mit den bekannten Werten der Eichsignale erhält man für jede Messfrequenz über den gesamten Flug gemittelte Phasenkorrekturen und Eichfaktoren (in ppm/mV), mit denen die Rohdaten (in mV) in ppm-Werte transformiert wurden.

**Tabelle 12.** Kalibrierwerte für das HEM-System BKS60

Frequenz f [Hz]	Kalibrierwerte I, Q [ppm]	Korrekturwerte
375	210, 205	1,02
1.778	220, 225	0,95
8.510	220, 210	1,27
37.830	660, 660	1,00
139.600	560, 560	1,10

### 5.3.2. Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur

Die Sekundärfelddaten können noch Primärfeldanteile enthalten, die nicht vollständig durch die verwendeten Kompensationsspulen erfasst worden sind. Ferner kann sich dieser Anteil durch temperaturbedingte Drift während des Fluges ändern. Daher ist es notwendig, dieses so genannte Nullniveau mehrmals während eines Fluges zu erfassen. Dies geschieht in der Regel in großen Flughöhen (Höhe der Flugsonde >350 m), da in diesen Höhen das Sekundärfeld weitgehend abgeklungen ist. In

den Bereichen mit großer Flughöhe und möglichst ruhigem Messsignalverlauf wurden bei der Datenbearbeitung sogenannte Stützstellen gesetzt, an denen Messwerte vorliegen, die das Nullniveau repräsentieren. Die Interpolationsgeraden zwischen jeweils benachbarten Stützstellen lieferten die Bezugsniveaus, von denen aus die Messamplituden der Sekundärfelder zu bestimmen sind. Die Nullniveaubestimmung wurde für jeden Messkanal (I und Q für fünf Frequenzen) durchgeführt.

Mit der oben beschriebenen Vorgehensweise ließen sich die langfristigen, quasi-linearen Driften in den Nullniveaus beseitigen. Kurzfristige Schwankungen des Nullniveaus konnten damit nicht vollständig erfasst werden. Daher mussten 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 waren. An diesen Stellen wurden die auf Basis der zu erwartenden Halbraumparametern berechneten Sekundärfelder als Bezugsniveau herangezogen (Siemon, 2009).

### 5.3.3. Datenkorrektur

Störungen, die durch externe EM-Signale hervorgerufen werden (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen, Sferics, Ortschaften, Bahnlinien), wurden durch geeignete Filterung bzw. Eliminierung bei der Datenbearbeitung automatisch unterdrückt. Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen elektrischen Installationen beruhen (vgl. Kapitel 5.3.7), wurden in der Regel in den Daten belassen.

### 5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter

Das relative magnetische Sekundärfeld  $Z$  für eine horizontal-koplanare (HCP) Spulenordnung mit einem Spulenabstand  $r$ , einer Sensorhöhe  $h$  und einer Messfrequenz  $f$  ist eine komplexe Größe (siehe Ward & Hohmann, 1988):

$$Z = I + iQ = r^3 \int_0^{\infty} R_1(f, \lambda, \rho, \mu, \varepsilon) \frac{\lambda^3 e^{-2\alpha_0 h}}{\alpha_0} J_0(\lambda r) d\lambda$$

wobei  $\alpha_0^2 = \lambda^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0$  mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am,  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  As/Vm,  $\rho_0 > 10^8$   $\Omega$ m und  $i =$  imaginäre Einheit;  $J_0$  ist eine Bessel-Funktion der ersten Art und nullter Ordnung, und  $R_1$  ist der komplexe Reflexionsfaktor, der die Materialparameter (spezifischer Widerstand  $\rho$ , magnetische Permeabilität  $\mu$  und dielektrische Permittivität  $\varepsilon$ ) des Untergrundes enthält. Dieses komplexe Integral wird numerisch mit der Schnellen Hankel-Transformation (z. B. Anderson, 1989, Johansen & Sørensen, 1979) berechnet. Zur Umgehung von Singularitätsproblemen ( $\alpha_0 \approx 0$ ), die nur bei hohen Frequenzen auftreten können, wurde das Integral nur für den Fall der quasi-stationären Näherung ( $\alpha_0 \approx \lambda$ ), betrachtet (Siemon, 2012).

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

- scheinbarer spezifischer Widerstand (Halbraumwiderstand)  $\rho_a$  [ $\Omega$ m] und
  - scheinbarer Abstand  $D_a$  [m] des Sensors von der Oberkante des leitenden Halbraums,
- transformiert (Siemon, 2001).

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

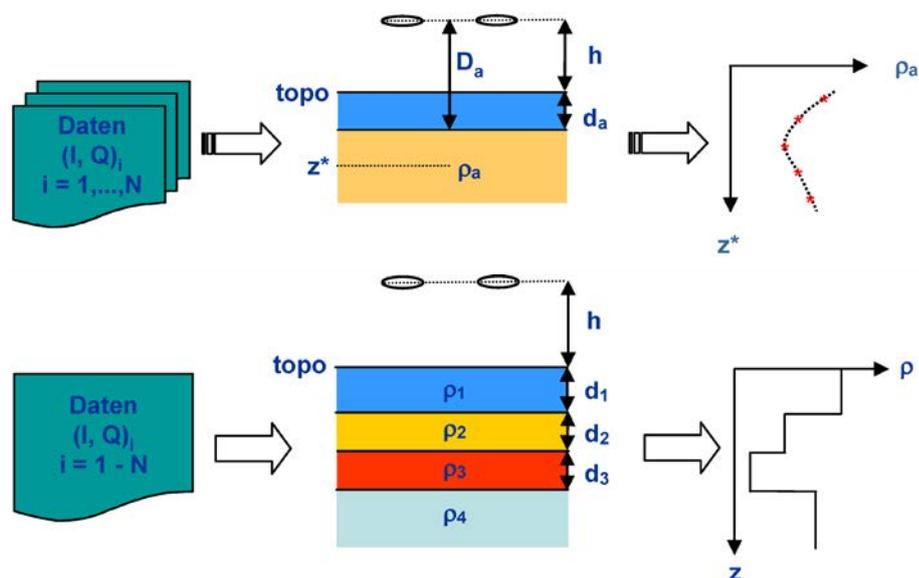
$$A' = (h/r)^3 A \quad \text{mit } A = (I^2 + Q^2)^{1/2} \quad \text{und} \quad \varepsilon = Q/I$$

für beliebige Halbraummodelle als Funktion von  $\delta_p = h/p$  für die Höhen  $h$  und die Skintiefen  $p = 503,3 (\rho_a/f)^{1/2}$  berechnet. Aus den resultierenden Funktionen  $A'(\delta_p)$  und  $\delta_p(\varepsilon)$ , die mit Hilfe von Polynomen angenähert wurden, können die Halbraumparameter für die Messwerte  $I$  und  $Q$  abgeleitet werden:

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

Die berechnete Höhe  $D_a$  (scheinbarer Abstand des HEM-Systems von der Halbraumoberkante) kann von der gemessenen Höhe der Flugsonde (in m über der Erdoberfläche) abweichen. Der Abstand zwischen der Halbraumoberfläche und der aus den Höhenmessungen berechneten Erdoberfläche wird als scheinbare Tiefe  $d_a = D_a - h$  definiert. Falls  $d_a$  positiv ist, wird über dem Halbraum eine „schlecht leitende“, bei negativem  $d_a$  eine „gut leitende“ Deckschicht angenommen.

Neben dem scheinbaren spezifischen Widerstand  $\rho_a$  und dem scheinbaren Abstand  $D_a$  wird ebenfalls für alle Frequenzen der Parameter Schwerpunkstiefe  $z^* = d_a + p/2$  bestimmt (Siemon, 2001). Die Schwerpunkstiefe ist ein Maß für das mittlere Eindringen der induzierten Ströme in den leitenden Erduntergrund und ermöglicht eine Tiefenangabe für den scheinbaren spezifischen Widerstand, die  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven als erste Approximation der vertikalen Widerstandsverteilung (**Abbildung 3**).



**Abbildung 3.** Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen (oben) und geschichteten (unten) Halbräumen

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

Die Sekundärfelder enthalten in dicht besiedelten Gebieten neben den geogenen Anteilen oft auch anthropogene Anteile, die von Bebauungen und elektrischen Installationen wie z. B. Elektrokabel, Metallzäunen und Eisenbahnschienen herrühren können. Oft sind diese Einflüsse auf die HEM-Daten gering und können mit der Standarddatenverarbeitung weitgehend eliminiert werden. In einigen Fäl-

len, wie beispielsweise bei Ortschaften oder großen Bauwerken mit einem hohen Metallanteil, ist der anthropogene Anteil in den HEM-Daten nicht mehr vernachlässigbar. In der Nähe von Hochspannungsleitungen, elektrifizierten Eisenbahnlinien oder Ortschaften können außerdem externe elektromagnetische Felder vorkommen, die die HEM-Messungen empfindlich stören können. Dies ist insbesondere bei den niedrigen Messfrequenzen zu beobachten, da dort der geogene Anteil des Sekundärfeldes deutlich kleiner ist als bei den höheren Messfrequenzen, sodass der anthropogene Anteil, der oft nur eine geringe Frequenzabhängigkeit aufweist, überwiegen kann (Siemon et al., 2011).

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

Eine manuelle Entfernung der anthropogen betroffenen Bereiche erfolgte nicht. Es wurden lediglich einige Messprofile geteilt und gekürzt. Somit wurden diese anthropogenen Effekte in den HEM-Daten nur durch die generelle Glättung der Daten unterdrückt.

### 5.3.6. Statistische Niveauanpassung

Im Messgebiet Hadelner Marsch war eine herkömmliche statistische Niveauanpassung (nach **Kapitel 5.3.2**) nicht ausreichend, da aufgrund der Überfliegung von Ortschaften, Hochspannungsleitungen und Wäldern deutliche barometrische Höhenänderungen und folglich auch spürbare Temperaturschwankungen auf das Messsystem und somit auf das Nullniveau einwirkten. Zur Lösung dieser Niveauprobeme wurde ein Verfahren angewendet, das eine Nivellierung sowohl senkrecht als auch entlang der Fluglinien ermöglicht. Die Nivellierung der logarithmierten Halbraumwiderstände und die Differenzen der scheinbaren Tiefen (in m u. GOK) senkrecht zu den Fluglinien wurden mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft vorgenommen. Dieses sogenannte Microlevelling-Verfahren basiert auf dem Gitter der Messprofilaten, in welchem Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpass-Filters (Grenzwellenlänge 500-1500 m, Ordnung 2) und eines direktionalen Kosinus-Filters (Azimut 18°, Grad 1) identifiziert werden (vgl. Siemon, 2009). Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Niveaufehlerwerte liefert. Aus den mittleren Differenzen der aus diesen nivellierten Halbraumparametern berechneten HEM-Daten (I und Q) und den originären HEM-Daten wurden anschließend die Korrekturwerte für jedes Messprofil abgeleitet.

### 5.3.7. 1D-Inversion der HEM-Daten

Die prozessierten HEM-Daten zu allen Messfrequenzen werden in die Parameter eines geschichteten Halbraums, spezifischer Widerstand und Mächtigkeit zu jeder Modellschicht, invertiert. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig. Dieses Startmodell wird automatisch aus den  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet. Das Startmodell wird entweder aus ebenso vielen Schichten aufgebaut wie Messfrequenzen vorhanden sind, wobei die Schichtwiderstände auf die scheinbaren spezifischen Widerstände und die Schichtgrenzen auf das logarithmische Mittel zweier benachbarter Schwerpunkstiefen gesetzt werden, oder aus einer frequenzunabhängigen Anzahl von Schichten, wobei die interpolierte Sondierungskurve in Schichten unterteilt wird, deren Mächtigkeiten mit der Tiefe zunehmen. Die zugehörigen spezifischen Widerstände werden in der jeweiligen Schichtmitte aus der Sondierungskurve abgegriffen (Siemon, 2006). Wahlweise kann bei beiden Verfahren eine schlecht leitende Deckschicht hinzugefügt werden, deren Mächtigkeit sich aus der scheinbaren Tiefe  $d_a$  der höchsten Messfrequenz und ggf. zusätzlich einer vorzugebenden Luftschichtmächtigkeit ergibt, mindestens aber 0,5 m beträgt. Im Inversionsprozess wird das Startmodell solange iterativ verbessert, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt ist. Dies ist erreicht, wenn die differenzielle Verbesserung der Anpassung der Modelldaten an die Messdaten weniger als z. B. 10% beträgt.

Da die Daten der höchsten Messfrequenz möglicherweise nicht exakt genug kalibriert werden konnten, wurden diese für die Inversion nicht verwendet. Als Startmodell diente die frequenzabhängige Variante, d. h. es wurde ein Fünf-Schicht-Modell (inklusive Deckschicht) für die Inversion benutzt.

### 5.3.8. Präsentation der HEM-Ergebnisse

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten (siehe **Anhang IV**) und Vertikalschnitte (siehe **Anhang V**) präsentiert. Karten im Maßstab von 1:50.000 (vgl. **Kapitel 6**) wurden für die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand  $\rho_a$  (in  $\Omega\text{m}$ ) und Schwerpunkstiefe  $z^*$  (in m unter GOK) für fünf Messfrequenzen produziert.

Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:50.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:2.000 wurden basierend auf den 1D-Inversionsergebnissen von jedem der 125 Messprofile und der 13 Kontrollprofile hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen Modellen mit fünf Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topografischen Höhe längs eines Profils nebeneinandergestellt werden. Über den Modellen sind zusätzlich der Flugweg des HEM-Sensors, Informationen zur Datenbearbeitung, der Anpassungsfehler der Inversion und die Messdaten dargestellt, die in einer Legende erklärt werden. Im **Anhang V** sind die Vertikalschnitte mit fünf Schichten dargestellt, die auch auf der DVD abgelegt sind.

## 5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik

### 5.4.1. Magnetisches Totalfeld

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

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

mit  $F(r)$  = magnetisches Hauptfeld (IGRF),  $\Delta T(r)$  = anomaler, lokaler Anteil des erdmagnetischen Feldes im Messgebiet,  $\Delta V(t)$  = Tagesvariation des erdmagnetischen Feldes während der Messung,  $\delta(r,t)$  = sonstige Anteile (z. B. magnetisches Eigenfeld des Hubschraubers). Gesucht werden die Anomalien des magnetischen Totalfeldes  $\Delta T(r)$ . Während das magnetische Hauptfeld  $F(r)$ , das anhand von Tabellenwerten berechnet werden kann, und die Tagesvariationen  $\Delta V(t)$ , die in der Regel mit der Bodenstation registriert werden, von der gemessenen Totalintensität subtrahiert werden können, sind die sonstigen Anteile  $\delta(r,t)$  nicht isoliert zu erfassen.

Die Datenverarbeitung wurde unter Verwendung von Oasis montaj von Geosoft durchgeführt.

### 5.4.2. Berechnung des IGRF

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

### 5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen

Die Referenzstation zur Erfassung der magnetischen Tagesvariationen  $\Delta V(t)$  befand sich am Ostende des Segelflugplatzes Spieka.  $\Delta V(t)$  ergibt sich aus dem Messwert der Bodenstation abzüglich des IGRF-Feldes am Ort der Bodenstation und zum Zeitpunkt der Messung (49240 nT). Kurzzeitige Störeinflüsse in den Daten der Bodenstation werden durch manuelle Korrektur und die Anwendung eines Tiefpass-Filters beseitigt.

### 5.4.4. Statistische Niveaueinpassung

In Gebieten mit nicht zu verbreiteten und starken magnetischen Störungen durch anthropogene Quellen werden die Magnetikdaten für gewöhnlich einer statistischen Niveaueinpassung unterzogen. Dazu wurden in Geosoft Oasis montaj bereitgestellte Verfahren, Kreuzungspunktstatistik (*tie-line levelling*) und 2D-Filterung (*microlevelling*), benutzt. Bei Letzterem (vgl. **Kapitel 5.3.6**) wurde ein Butterworth-Hochpass-Filter (Grenzwellenlänge 3000 m, Ordnung 2) und ein direktonaler Kosinus-Filter (Azimut 18°, Grad 1) verwendet.

### 5.4.5. Präsentation der Magnetikergebnisse

Die HMG-Ergebnisse werden als Karte (**siehe Anhang IV**) präsentiert. Die Karte (vgl. **Kapitel 6**) wurde im Maßstab von 1:50.000 für die Anomalien des erdmagnetischen Feldes erstellt, die aber die anthropogenen Effekte noch beinhalten.

## 5.5. 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 (2003) sind die mit dem Gammastrahlenspektrometer im Hubschrauber gemessenen Zählraten in Gehalte von K, U und Th für das obere Erdreich umzurechnen. Die Radioisotope U und Th emittieren selbst keine Gammastrahlung. Um deren Gehalte abschätzen zu können, wird mit dem Spektrometer die Gammastrahlung ihrer radioaktiven Tochterprodukte Bismut-214 (Uran) und Thallium-208 (Thorium) gemessen. Da diese Abschätzung unter der Annahme erfolgt, dass zwischen den Elementen U bzw. Th und deren Tochterprodukten ein Gleichgewicht vorhanden ist, werden die berechneten Gehalte als Äquivalentgehalte von Uran (eU) und Thorium (eTh) bezeichnet. Für die Ermittlung der Gehalte aus den Rohzählraten ist eine Reihe von Arbeiten zur Kalibrierung des Spektrometers sowie in der Datenverarbeitung erforderlich:

- Bestimmung der Hintergrundzählraten durch Flüge über ausgedehnten Wasserflächen;
- Bestimmung von Einstreuraten zur Korrektur der Compton-Streuung mit Hilfe von Kalibrierkörpern;
- Bestimmung von Absorptionskoeffizienten und Detektorempfindlichkeiten mit Hilfe von Flügen über einer Kalibrierstrecke.

Die Effekte hervorgerufen durch die Reaktion des Detektors auf atmosphärisches Radon und die Abschwächung durch Vegetation wurden nicht korrigiert. Einzelheiten zu den durchgeführten Kalibrierungen sind in den jeweiligen Kapiteln der Datenverarbeitung beschrieben. Die Datenverarbeitung wurde unter Verwendung von Oasis montaj von Geosoft durchgeführt.

### 5.5.1. Effektive Höhe

Für die Anwendung der Datenanalysetechniken der Radiometrie ist es notwendig, die gemessenen Daten an Standardbedingungen (STP, *Standard Temperature and Pressure*) anzupassen. Dazu gehört die Umrechnung der Detektorhöhe über der Erdoberfläche in eine effektive Höhe, die für die Standardtemperatur und den Standardluftdruck gilt, da beide Größen die Dichte und damit die Dämpfung der Gammastrahlung durch die Luft beeinflussen. Die Höhenkorrektur wurde nach den Empfehlungen der IAEA (2003) mit folgender Formel durchgeführt:

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

mit:

- $h_e$  = effektive Höhe des Detektors über der Erdoberfläche unter STP-Bedingungen (m),
- $h_r$  = Höhe des Spektrometers über der Erdoberfläche (m),
- $T_0$  = 273,15 K, Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala,
- $T$  = Lufttemperatur (°C),
- $P_0$  = 1013,25 hPa, mittlerer Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe,
- $P$  = Luftdruck im Hubschrauber (hPa).

Der mit einem barometrischen Höhenmesser erfasste Luftdruck wurde korrigiert und in die absolute Höhe des Hubschraubers transformiert (vgl. **Kapitel 5.2.4**). Diese korrigierte Höhe wurde über die barometrische Höhenformel in Luftdruck wieder zurückgewandelt. Die Lufttemperatur wurde zu Beginn und Ende des Fluges am Boden an einem im Hubschrauber eingebauten Außenthermometer abgelesen und notiert.

### 5.5.2. Registrierzeitkorrektur

Hintergrund für die Registrierzeitkorrektur ist die kurze Zeitspanne, in welcher das Spektrometer einen Impuls verarbeitet. Währenddessen werden alle weiteren eingehenden Impulse zurückgewiesen. Die während des Fluges aufgezeichneten Registrierzeiten (*live time*) sind gerade die Zeitspannen, in denen das Spektrometer innerhalb einer Sekunde empfangsbereit war. Der Einfluss dieser verkürzten Registrierzeiten ist in der Regel sehr klein, kann aber in Gebieten mit hoher Radioaktivität bedeutend sein. Im Rahmen der Registrierzeitkorrektur wurden die gemessenen Zählraten entsprechend den Empfehlungen der IAEA (2003) auf den Messzyklus von einer Sekunde hochgerechnet:

$$N_R = n_R \cdot 10^3 / t_L$$

mit:

- $N_R$  = korrigierte Zählrate,
- $n_R$  = registrierte Zählrate,
- $t_L$  = aktive Registrierzeit (*live time*, in ms).

### 5.5.3. 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 Gammasktrum 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 wurden durch Messflüge in unterschiedlichen Höhen zwischen etwa 100 und 3500 m über ausgedehnten Wasserflächen ermittelt. Die Berechnung der Korrekturwerte basiert auf dem linearen Zusammenhang zwischen der Zählrate im Höhenstrahlungskanal und der Zählrate für die Hintergrundstrahlung:

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

mit:

- $N_c$  = Zählrate der kosmischen und vom Messsystem ausgehenden Hintergrundstrahlung für jeden Messkanal,
- $a$  = Zählrate der Hintergrundstrahlung des Hubschraubers inklusive des Messsystems für jeden Messkanal,
- $b$  = kosmische Einstreuung für jeden Messkanal,
- $C_H$  = Zählrate im Höhenstrahlungskanal.

Zur Bestimmung der Werte  $a$  und  $b$  wurden in 2003 Messflüge in verschiedenen Höhen über dem Atlantik vor Namibia durchgeführt (Röttger, 2003). Mit diesen Messdaten erfolgte die Berechnung der Korrekturgrößen (**Tabelle 13**) mittels linearer Regression der gegen die Zählraten der kosmischen Strahlung aufgetragenen Zählraten der Kanäle K, U, U-UP (nach oben gerichteter Kristall), Th und TC (Gesamtstrahlung).

**Tabelle 13.** Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung.

Strahlungsquelle	Messsystem a [cps]	kosmische Einstreuung b
TC	68,77	0,7771
K	8,32	0,0417
U	2,16	0,0363
Th	1,59	0,0338
U-UP	0,41	0,009475

#### 5.5.4. Compton-Streuung

Der Compton-Effekt beschreibt die Wechselwirkung von Gammaquanten mit Elektronen der äußeren Atomhülle beim Durchgang durch Materie. Ein Teil der Energie der Gammaquanten wird auf diese sogenannten Compton-Elektronen übertragen und die Gammaquanten selbst werden gestreut. Praktisch hat dies zur Folge, dass ein bestimmter Anteil z. B. von der ursprünglichen Thoriumstrahlung in den niedrigeren Energiebereichen des Uran- und Kaliumfensters enthalten ist. Ebenso streuen Urananteile in den Kaliumkanal. Der umgekehrte Effekt, d. h. die Einstreuung in höhere Energiekanäle, existiert auch, ist aber deutlich geringer. Die Koeffizienten der Einstreuratzen (*stripping ratios*) wurden für das BGR-Messsystem im Jahre 2001 über Kalibrierfeldern der Geologischen Bundesanstalt (GBA) in Wien (Allenstein), Österreich, bestimmt. Die Werte, die mit der PADWIN-Software (Röttger, 2003) numerisch bestimmt wurden, sind in **Tabelle 14** aufgelistet und wurden entsprechend den Empfehlungen der IAEA (2003) auf die Messwerte angewendet.

**Tabelle 14.** Koeffizienten der Einstreuratzen.

Einstreuung	Koeffizient
$\alpha$ (Th $\rightarrow$ U)	0,3044
$\beta$ (Th $\rightarrow$ K)	0,5144
$\gamma$ (U $\rightarrow$ K)	0,7304
a (U $\rightarrow$ Th)	0,0787
b (K $\rightarrow$ Th)	0,0069
g (K $\rightarrow$ U)	0,0077

Die Einstreuratzen steigen mit der Entfernung des Detektors von der radioaktiven Quelle an und müssen daher laut IAEA (2003) mit den effektiven Höhen  $h_e$  des Hubschraubers über der Erdoberfläche unter Standardbedingungen (in m) nach folgenden Formeln korrigiert werden:

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

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

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

Um die bezüglich der Einstreuratens korrigierten Zählraten  $N_{Th(corr)}$ ,  $N_{U(corr)}$  und  $N_{K(corr)}$  zu erhalten, muss der eingestreute Anteil von den gemessenen und hinsichtlich der Hintergrundstrahlung unter Standardbedingungen bereits korrigierten Nettozählraten  $N_{Th}$ ,  $N_K$  und  $N_U$  abgezogen werden:

$$N_{Th(corr)} = [N_{Th}(1 - g\gamma) + N_U(b\gamma - a) + N_K(ag - b)] / A$$

$$N_{U(corr)} = [N_{Th}(g\beta - \alpha) + N_U(1 - b\beta) + N_K(b\alpha - g)] / A$$

$$N_{K(corr)} = [N_{Th}(\alpha\gamma - \beta) + N_U(a\beta - \gamma) + N_K(1 - a\alpha)] / A$$

mit:

$$A = 1 - g\gamma - a(\alpha - g\beta) - b(\beta - \alpha\gamma)$$

Für die Totalstrahlung wird keine Korrektur der Compton-Streuung durchgeführt (IAEA, 2003).

### 5.5.5. Zählraten in Standardflughöhe

Die Intensität der vom Boden stammenden Gammastrahlung verringert sich mit der Höhe über der Erdoberfläche durch die Absorption in der Luft. Die Absorption hängt hauptsächlich von der Dichte und der Feuchtigkeit der Luft ab. Die energiespezifischen Absorptionskoeffizienten  $\mu$  wurden mit Hilfe von Kalibrierflügen in unterschiedlichen Höhen über einer Eichstrecke in Allentsteig, Österreich, in 2001 bestimmt. Die hinsichtlich der Hintergrundstrahlung und der Compton-Streuung korrigierten Daten lieferten durch Auftragen über die Messhöhe und anschließende exponentielle Regression die Absorptionskoeffizienten für jeden Kanal (**Tabelle 15**).

Mit den Absorptionskoeffizienten  $\mu$  werden die in einer Höhe  $h_e$  gemessenen Zählraten  $N_m$  (nach Berücksichtigung der Hintergrundstrahlung und der Einstreuratens) in Zählraten  $N_s$  bei einer Normhöhe von  $h_0 = 80$  m umgewandelt:

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

mit:

- $\mu$  = Absorptionskoeffizient für das jeweilige spektrale Fenster,
- $N_m$  = Zählraten  $N_{Th(corr)}$ ,  $N_{U(corr)}$ ,  $N_{K(corr)}$  und  $N_{c,TC}$  bei effektiver Höhe  $h_e$ ,
- $N_s$  = korrigierte Zählrate bezogen auf die Standardhöhe  $h_0$ .

**Tabelle 15.** Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen.

Spektralfenster	Absorptionskoeffizienten $\mu$ (in 1/m)
TC	0,007594
K	0,008900
U	0,009022
Th	0,006925

### 5.5.6. Radioelementgehalte und Dosisleistung

Die IAEA (2003) empfiehlt die Umrechnung der Zählraten der drei Gammastrahler in die Äquivalentgehalte der beiden Radioelemente Uran (eU, in ppm) und Thorium (eTh, in ppm) und in den Gehalt des Radioelementes Kalium (in %) in den oberflächennahen Bodenschichten sowie die Angabe von Dosisleistungen (*exposure rate*). Dies hat den Vorteil, dass die Ergebnisse von Messungen mit verschiedenen Instrumenten (z. B. mit unterschiedlichem Kristallvolumen) untereinander vergleichbar sind. Für die Berechnung der Gehalte ist die Division der auf die Standardhöhe angepassten Zählraten durch die spezifischen Sensitivitäten durchzuführen:

$$C = N_s / S$$

mit:

C = Gehalte der Elemente im Boden (K in %, eU in ppm, eTh in ppm),

$N_s$  = korrigierte Zählraten im jeweiligen Energiefenster,

S = Sensitivität der Strahlungsquelle im Energiefenster.

Die Sensitivitäten des Spektrometers (**Tabelle 16**) wurden mit den Daten von Kalibrierflügen über einer Eichstrecke in Allentsteig, Österreich, in 2001 bestimmt (Röttger, 2003). Die so bestimmten Gehalte beziehen sich auf eine unendlich ausgedehnte, gleichmäßig strahlende Ebene. Sie können sich somit von den wahren Gehalten der Elemente im Boden, insbesondere durch den Einfluss der Bodenfeuchte oder wenn die strahlenden Flächen unregelmäßig verteilt sind, unterscheiden.

**Tabelle 16.** Sensitivitäten.

Radioelement	Sensitivität
K	32,45 cps / % K
U	3,58 cps / ppm eU
Th	2,31 cps / ppm eTh

Die Dosisleistungen können aus den Gehalten der im Boden vorhandenen radioaktiven Elemente berechnet werden. Dazu sind die mit den Dosisleistungskonstanten gewichteten Gehalte von Uran, Thorium und Kalium zu summieren. Für die Ionendosisleistung E am Erdboden (in  $\mu\text{R/h}$ ) ergibt sich folgender Zusammenhang:

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

mit:

1 % K = 1,505  $\mu\text{R/h}$ ,

1 ppm eU = 0,653  $\mu\text{R/h}$ ,

1 ppm eTh = 0,287  $\mu\text{R/h}$ .

### 5.5.7. Filterung und statistische Niveauanpassung

Die ermittelten Radioelementgehalte und die Gesamtzählraten werden nach Abschluss der hier beschriebenen Bearbeitungsschritte flächig in Form von farbkodierten Karten (Gitterdaten, *grids*) dargestellt. Diese Art der Darstellung erlaubt es, die Intensität des statistischen Rauschens der Daten im Verhältnis zu geologisch bedingten Anomalien in den Daten visuell abzuschätzen. Außerdem werden

etwaige Niveauunterschiede zwischen den Daten einzelner Profillinien sichtbar. Niveauunterschiede können immer dann auftreten, wenn sich während der Kampagne Änderungen in den Umweltbedingungen (z. B. Bodenfeuchte, Luftfeuchtigkeit) ergeben haben.

Diese Niveaufehler werden mit verschiedenen Methoden, die in Geosoft Oasis montaj bereitgestellt werden, korrigiert. Zunächst werden die Quotienten der jeweiligen (Äquivalent-)Gehalte an den Schnittpunkten der Messprofile mit den Kontrollprofilen bestimmt und statistisch bearbeitet (*statistic* bzw. *full levelling*). Die noch verbliebenen Niveaufehler können aus Daten entfernt werden, indem man eine zweidimensionale Filterung, d. h. eine Kombination aus Butterworth (Grenzwellenlänge 500-1500 m, Ordnung 2) und eines direktionalen Kosinus-Filters (Azimut 18°, Grad 1) der Gitterdaten durchführt (*microlevelling*). Daraufhin werden die gefilterten Gitterdaten verwendet, um die Profildaten zu korrigieren.

#### **5.5.8. Präsentation der Ergebnisse der Radiometrie**

Die HRD-Ergebnisse werden als Karten (siehe **Anhang IV**) präsentiert. Die Karten im Maßstab von 1:50.000 (vgl. **Kapitel 6**) wurden die Äquivalentgehalte der Radioelemente Uran und Thorium, des Gehaltes des Radioelementes Kalium sowie der Gesamtstrahlung und der Ionendosisleistung am Erdboden erstellt.

## 6. Kartografische Arbeiten

### 6.1. Topografische Karten 1:50.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurde eine topographische Karte mit einem gesonderten Blattschnitt im Maßstab 1:50.000 hergestellt. Zur Abdeckung des Messgebietes ergab sich ein Blatt mit der Ausdehnung von 26' geografischer Länge und 16' geografischer Breite. **Tabelle 17** enthält die Eckpunktkoordinaten der Blätter, sowohl in geografischen als auch in Gauß-Krüger-Koordinaten (Zone 3).

**Tabelle 17:** Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Hadelner Marsch

Karteneckpunkt	Geografische Koordinaten		Gauß-Krüger-Koordinaten	
	Länge	Breite	Rechtswert	Hochwert
NW	8°42' E	53°52' N	3480 267	5970 500
NO	9°08' E	53°52' N	3508 770	5970 467
SW	8°42' E	53°36' N	3480 142	5940 824
SO	9°08' E	53°36' N	3508 826	5940 790

Die Ergebniskarten 1:50.000 basieren auf Rasterdaten der topografischen Karte 1:100.000, die zwecks besserer Lesbarkeit auf den Maßstab 1:50.000 vergrößert wurde. Zur Verwendung kamen die Rasterdaten des Blattes C 2318 Cuxhaven (1997). Herausgeber ist das LGN – Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen in 30659 Hannover.

Digital wurde dazu je ein Rahmen mit geographischen Eckpunktkoordinaten und ergänzenden Gauß-Krüger-Koordinaten im 3°-Meridian-Streifensystem mit 9° als Mittelmeridian, basierend auf dem Bessel-Ellipsoid, konstruiert. Der Grauton der topographischen Darstellung wird durch eine fünfzigprozentige Aufrasterung der digitalen Topographie erreicht.

### 6.2. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Hadelner Marsch wurden 28 geophysikalische Ergebniskarten im Maßstab 1:50.000 hergestellt (siehe Kartenverzeichnis und **Anhang IV**). Die verwendeten Gitterparameter zur Erstellung der geophysikalischen Karten sind in **Tabelle 18** aufgelistet. Alle Karten sind mit einer ausführlichen Legende versehen, die Auskunft über das Messgebiet, die Kartengrundlagen, die Skalierung, den dargestellten Parameter und die beteiligten Institutionen und Personen gibt.

Ferner wurde im Maßstab 1:50.000 eine Fluglinienkarte auf Basis der topografischen Karten produziert, die die Lage der Messprofile zeigt. Die Profillinien sind mit Liniennummern versehen, die am Anfang eines Profils in Fluglinienrichtung stehen. Ausgewählte Zeitmarken-Positionen (jeder hundertste Record) sind mit einem „x“ gekennzeichnet. Jeder Zehnte hiervon, d. h. jeder tausendste Record, ist mit der dazugehörigen Nummer (in Fluglinienrichtung) beschriftet. Die Fluglinienkarte gestattet eine schnelle Zuordnung der Daten von Profilen und Vertikalsektionen zur Position im Messgebiet.

**Tabelle 18:** *Gitterparameter*

Parameter	Wert
Methode zur Flächeninterpolation	minimale Krümmung
Gitterzellengröße [m]	50
Zellen außerhalb der Datenpunkte	7
Spannung	0
Log-Option	linear, (außer: $\log \rho$ , $\log z^*$ )

Digitale Höhenmodelle (DEM) können aus der absoluten Höhe des HEM-Sensors minus der Sensorhöhe über Grund abgeleitet werden. Die Höhenkarte ist ebenfalls mit der topografischen Karte unterlegt.

## 7. Archivierung

Alle Daten und Plots wurden auf DVD gespeichert und im Fachbereich „B2.1 – Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie“ archiviert. Darüber hinaus sind die Ergebnisdaten als ASCII-codierte Profildaten im Geosoft-xyz-Format und die Endergebnisse (Bericht, Karten und Vertikalsektionen) als PDF-Dokumente im Originalmaßstab auf einer DVD (**Tabelle 19** und **Anhang III**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Für die Darstellung in ArcGIS-Projekten wurden die Daten als Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (\*.flt) beigefügt.

**Tabelle 19:** Inhalt der DVD

Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Bericht		Technischer Bericht (PDF) (Acrobat Reader unter <a href="http://get.adobe.com/de/reader/">http://get.adobe.com/de/reader/</a> )
\Daten...	\HEM	ASCII-Datei aller gemessenen Daten (HEM109_DAT.XYZ) ASCII-Datei aller abgeleiteten Parameter (HEM109_APP.XYZ) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM109_INV.XYZ) ASCII-Datei der aus den 1D-Inversionsmodellen abgeleiteten spezifischen Widerstände für bestimmte Tiefen von -5 bis -100 m NN (HEM109_RHO_AT_Z.XYZ)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Bodenstationsdaten etc. (HMG109.xyz)
	\HRD	ASCII-Datei der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Totalstrahlung und die Ionendosisleistung etc. (HRD109.xyz)
\Karten...	\Fluglinien	PDF-Karte 1:50.000 des Flugweges mit Topografie
	\DEM	PDF-Karte 1:50.000 des Digitalen Höhenmodells
	\HEM	PDF-Karten 1:50.000 der Halbraumwiderstände und der Schwerpunkstiefen für die Messfrequenzen 375 Hz, 1778 Hz, 8510 Hz, 37.830 Hz, 139.600 Hz PDF-Karten 1:50.000 der spezifischen Widerstände bei -5, -7, -10, -15, -20, -30, -40, -50, -60 und -70 m NN (entnommen aus den 1D-Inversionsmodellen)
	\HMG	PDF-Karte 1:50.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT mit anthropogenen Effekten
	\HRD	PDF-Karten 1:50.000 der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Ionendosisleistung
	\ArcGIS	Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (*.flt)
\VRS	PDF-Vertikalschnitte des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnissen mit fünf Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:50.000 und Vertikalmaßstab 1:2.000	

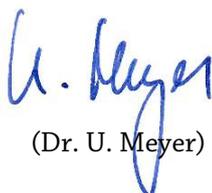
## 8. Literatur

- Anderson, W.L., 1989. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling. *Geophysics* 54, 263–266.
- IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1363AEA, Vienna.
- IAGA, 1992: International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group 8: Analysis of the main field and secular variation. *Geophysical Journal International*, 108, 945–946.
- Johansen, H.K. & Sørensen, K., 1979. The fast Hankel transform. *Geophysical Prospecting* 27, 876–901.
- Meyer, U. & Siemon, B., 2014. Hubschrauber-Geophysik der BGR neu am Start. *Geowissenschaftliche Mitteilungen (GMIT)*, 55, 6–14.
- Röttger, B., 2003. Auswertung Spektrometer-Eichung, Teststrecke Allensteig/Österreich 2001; Szinti Flug über Wasser Swakopmund/Namibia 2003, BGR-Bericht, Hannover.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 2000. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 65, 1983-1992.
- Siemon, B., 2001. Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 46, 65–76, doi: 10.1016/S0926-9851(00)00040-9.
- Siemon, B., 2006. Electromagnetic methods – frequency domain: Airborne techniques. In: Kirsch, R. (ed.), *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 155–170.
- Siemon, B., 2009. Levelling of frequency-domain helicopter-borne electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 67 (3), 206–218, doi: 10.1016/j.jappgeo.2007.11.001.
- Siemon, B., 2012. Accurate 1D forward and inverse modeling of high-frequency helicopter-borne electromagnetic data. *Geophysics*, 77 (4), WB81–WB87, doi: 10.1190/GEO2011-0371.1.
- Siemon, B., Eberle, D.G. & Binot, F., 2004. Helicopter-borne electromagnetic investigation of coastal aquifers in North-West Germany. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 32 (5/6), 385-395.
- Siemon, B., Rehli, H.-J., Voß, W. & Pielawa, J., 2005. Ergebnisse der Hubschrauber-geophysik im Bereich der Hadelner Marsch 2004, Technischer Bericht. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0125945, Hannover.
- Siemon, B., Steuer, A., Ullmann, A., Vasterling, M. & Voß, W., 2011. Application of frequency-domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater exploration in urban areas. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 36/16, 1373-1385, doi: 10.1016/j.pce.2011.02.006.

- Siemon, B., Voß, W., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J., 2011. Technischer Bericht Hubschrauber-Geophysik Bremerhaven, Juni 2001 (Revision 2011). BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0130162, Hannover.
- Siemon, B., Voß, W., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J. & Röttger, B., 2013 Technischer Bericht Hubschrauber-Geophysik – Cuxhaven Mai 2000 (Revision 2013). BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131409, Hannover.
- Steuer, A., Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J. & Voß, W., 2013. Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Glückstadt, Sommer 2008 – Frühjahr 2009. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131097, Hannover.
- Ward, S.H. & Hohmann, G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications. In Nabighian M.N. (Eds.) Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. 1, Theory. Society of Exploration Geophysics, IG no 3, Tulsa, 130–310.



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



(Dr. T. Himmelsbach)

(Dr. U. Meyer)

Stellv. Leiter der Abteilung  
„Grundwasser und Boden“

Leiter des Fachbereichs  
„Geophysikalische Erkundung –  
Technische Mineralogie“



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs  
„Aerogeophysik und  
Luftfahrttechnischer Betrieb“



## Anhang I

### Messgebiet 109 – Hadelner Marsch

<b>Basis:</b>	Nordholz-Spieka	Flugplatzhöhe: 27 m
<b>Magnetik Bodenstation:</b>	8,651536° östliche Länge,	53,7699852° nördliche Breite
<b>Messgebiet:</b>		
<b>Profilabstand:</b>	Messprofile – 250 m	Kontrollprofile – 2000 m
<b>Profilrichtung:</b>	Messprofile – 108,5°	Kontrollprofile – 18,5°
<b>Profile:</b>	Messprofile – 117	Kontrollprofile – 13
<b>Profilkilometer:</b>	Messprofile – ca. 2650 km	Kontrollprofile – ca. 350 km
<b>Größe des Messgebietes:</b>	ca. 700 km <sup>2</sup>	

**Tab. A-1:** Flugprotokoll für das Messgebiet 109 Hadelner Marsch

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
<b>10900</b>	25.05.04	09:03 – 10:34	L1.1 L2.1 L3.1 L4.1 L5.1 L6.1 L7.1 L8.1 L9.1 L10.1 L11.1 L12.1 L13.1 L14.1	<b>Messprofilflug</b> EM: die 1. Frequenz ist überwiegend stark gestört; die 5. Frequenz ist teilweise gestört Laser: häufiger Ausfall des Laser-Höhenmessers Magnetometer: in Flugrichtung E gelegentliche Aussetzer im Mag; Ursache ist das zeitweise starke Schwanken der Sonde Profilkilometer: (146) <b>Wiederholung des gesamten Fluges</b> Wetter: bewölkt, starker Wind aus 310° mit 18 Knoten, Temperatur 13°C
<b>10901</b>	25.05.04	14:47 – 17:06	L15.1 L16.1 L17.1 L18.1 L19.1 L20.1 L21.1 L22.1 L23.1 L24.1	<b>Messprofilflug</b> EM: Linie 21.1, Fid 531 – NN-Sprung in 40KQ; Fid 532 – NN-Sprung in 140I + 140Q Linie 23.1, Fid 667 – Nullniveausprung + Phasenverschiebung in allen EM-Frequenzen <b>Wiederholung der Linien 21.1 – 24.1</b> Profilkilometer: 97 (+76) Wetter: bewölkt, starker Wind aus 310° mit 18 Knoten, Temperatur 13°C
<b>10902</b>	26.05.04	07:29 – 09:49	L23.2 L24.2 L25.1 L26.1 L27.1 L28.1 L29.1	<b>Messprofilflug</b> EM: Linie 23.2, Fid 118/119 – NN-Sprung in 140I und 140Q (zweimal) sowie in 40KQ; ca. 10 Sekunden NN-Verschiebung in 1K8Q Linie 24.2, Fid 200 – NN-Verschiebung in 140I und 40KQ sowie in 40KQ Linie 25.1, Fid 323 bis Ende – 1K8I und 1K8Q sind für den Rest des Fluges unbrauchbar <b>Wiederholung der Linie 25.1</b> Profilkilometer: 124 (+21) Wetter: bewölkt, zeitweise Regen, 13°C, Wind aus 360° mit 14 Knoten

<b>10903</b>	26.05.04	11:58 – 14:15	L30.1 L31.1 L32.1 L33.1 L34.1 L35.1 L36.1 L37.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 174 Wetter: regnerisch, 13°C, Wind aus 30° mit 14 Knoten
<b>10904</b>	27.05.04	08:13 – 10:24	L38.1 L39.1 L40.1 L41.1 L42.1 L43.1 L44.1 L45.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 179 Wetter: stark bewölkt, 12°C, Wind aus 306° mit 10 Knoten
<b>10905</b>	27.05.04	12:21 – 14:37	L46.1 L47.1 L48.1 L49.1 L50.1 L51.1 L52.1 L53.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 185 Wetter: stark bewölkt, Regen, 12°C, Wind aus 306° mit 10 Knoten
<b>10906</b>	28.05.04	07:08 – 09:15	L54.1 L55.1 L56.1 L57.1 L58.1 L59.1 L60.1 L61.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 190 Wetter: stark bewölkt, 11°C, Wind aus 330° mit 8 Knoten
<b>10907</b>	01.06.04	11:23 – 13:31	L62.1 L63.1 L64.1 L65.1 L66.1 L67.1 L68.1 L69.1	<b>Messprofilflug</b> EM: die 5. Frequenz ist während des gesamten Fluges relativ noisy Profilkilometer: 194 Wetter: sonnig, diesig, 21°C, kaum Wind

<b>10908</b>	02.06.04	07:18 – 09:33	L70.1 L71.1 L72.1 L73.1 L74.1 L75.1 L76.1 L77.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 200 Wetter: sonnig, 21°C
<b>10909</b>	02.06.04	11:16 – 13:27	L78.1 L79.1 L80.1 L81.1 L82.1 L83.1 L84.1 L85.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 206 EM: die 5. Frequenz ist unbrauchbar Wetter: sonnig, 28°C
<b>10910</b>	03.06.04	07:18 – 09:31	T1.9 T2.9 T3.9 T4.9 T5.9 T6.9 T7.9	<b>Kontrollprofilflug</b> EM: die 5. Frequenz ist während des gesamten Fluges sehr noisy; außerdem hat sich die Phase falsch eingestellt Linie 5.9, Fid 477 – NN-Versatz in 40KQ Mag: stellenweise einzelne Spikes Profilkilometer: 207 Wetter: sonnig, 18°C, kaum Wind
<b>10911</b>	03.06.04	13:04 – 14:51	T8.9 T9.9 T10.9 T11.9 T12.9 T13.9	<b>Kontrollprofilflug</b> EM: die 5. Frequenz ist während des gesamten Fluges sehr noisy; außerdem ist die Phase falsch eingestellt Profilkilometer: 140 Wetter: sonnig, 15°C
<b>10912</b>	07.06.04	12:18 – 14:35	L86.1 L87.1 L88.1 L89.1 L90.1 L91.1 L92.1 L93.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 210 Wetter: sonnig, 30°C, Wind aus 240° mit 10 Knoten

<b>10913</b>	08.06.04	07:19 – 09:32	L94.1 L95.1 L96.1 L97.1 L98.1 L99.1 L100.1 L101.1	<b>Messprofilflug</b> EM: 5. Frequenz ist am Anfang des Fluges relativ ruhig, wird später noisy. Mag: in Flugrichtung E treten gelegentlich kurze Störungen (unter 5 Sekunden) auf Profilkilometer: 216 Wetter: sonnig, 16°C, Wind aus 20° mit 6 Knoten
<b>10914</b>	08.06.04	11:11 – 13:21	L102.1 L103.1 L104.1 L105.1 L106.1 L107.1 L108.1 L109.1	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 214 Wetter: sonnig, 24°C, Wind aus 340° mit 8 Knoten
<b>10915</b>	09.06.04	07:30 – 09:26	L110.1 L111.1 L112.1 L113.1 L114.1 L115.1 L116.1 L117.1	<b>Messprofilflug</b> EM: der Noise in der 5. Frequenz wird mit zunehmender Flugdauer stärker Profilkilometer: 172 Wetter: bewölkt, 16°C, regnerisch, Wind aus 180° mit 8 Knoten
<b>10916</b>	10.06.04	07:26 – 09:38	L14.2 L13.2 L12.2 L11.2 L10.2 L9.2 L8.2 L7.2 L6.2 L5.2 L4.2 L3.2 L2.2 L1.2	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 146 Wetter: bewölkt, 18°C, stark diesig, Wind aus 250° mit 12 Knoten

<b>10917</b>	10.06.04	11:28 – 13:33		<b>EM-Kalibrierflug über der Nordsee</b>
<b>10918</b>	11.06.04	08:36 – 09:28	L21.2 L22.2 L25.2	<b>Messprofilflug</b> Profilkilometer: 59 Wetter: bewölkt, 19°C, Wind aus 300° mit 27 Knoten
<b>10919</b>	11.06.04	09:30 – 10:30		<b>Sonderflug “Deichvermessung”</b> Je 2 Profile rechts und links eines Deiches sowie direkt über dem Deich EM: die niedrigste Frequenz war ausgeschaltet, um saubere Ergebnisse in der 5. Frequenz zu erhalten

## Anhang II

### Beschreibung der Datenformate

#### A) Elektromagnetik (HEM)

##### Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/HADELNER MARSCH  
/AREACODE  
/109  
/C_MERIDIAN, ZONE AND GEOID  
/ 9 3 GK-BESSEL  
/ ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/BIRD  
/60  
/NUMFREQ  
/ 5  
/FREQUENCY  
/ 375.00 1778.00 8510.00 37830.00 139600.00  
/COILGEOMETRY  
/ 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00  
/COILSEPERATION  
/ 7.92 7.92 7.96 8.03 7.92  
/TOWCABLE  
/41.00  
/DUMMY  
/ 999.99  
/DECIMATIONVALUE  
/ 1  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```



1) HEM109\_DAT.XYZ

Beispiel:  
/PRIVTEXT  
/Processing by B. Siemon (BGR) using HEM05  
/Unlevelled and uncorrected data  
/Transferred on 07-JAN-17 18:40:00  
/ X Y LON LAT RECORD UTC\_TIME TOPO\_H\_RADAR H\_LASER BIRD\_NN H\_BARO REAL\_1 QUAD\_1 ... REAL\_5 QUAD\_5  
//Flight 10929  
//Date 2004/06/10  
Line 1.2  
3508647 5968052 9.130295 53.843382 68750 92054.4 1.78 31.85 33.92 29.70 34.47 210.44 321.56 ... 3142.91 1138.85  
3508644 5968053 9.130249 53.843391 68751 92054.5 1.88 31.91 33.92 29.80 34.47 209.90 320.51 ... 3130.33 1135.66  
3508640 5968055 9.130189 53.843409 68752 92054.6 1.88 32.34 33.92 29.80 34.46 209.38 319.52 ... 3118.05 1132.42

In dieser Datei sind alle gemessenen Parameter in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m NN	Topographische Höhe
H_RADAR	m	gefilterter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge (41m) vom Hubschrauber zur Flugsonde; entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	ungefilterter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m NN	geglättete absolute Sensorhöhe, abgeleitet aus den GPS-Daten
H_BARO	m NN	geglättete barometrische Sensorhöhe, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers minus der Kabellänge (41 m)
REAL_1	ppm	gefilterter Wert der Inphase-Komponente für die niedrigste Frequenz
QUAD_1	ppm	gefilterter Wert der Out-of-Phase-Komponente für die niedrigste Frequenz
REAL_5	ppm	gefilterter Wert der Inphase-Komponente für die höchste Frequenz
QUAD_5	ppm	gefilterter Wert der Out-of-Phase-Komponente für die höchste Frequenz



2) HEM109\_APP.XYZ

Beispiel:  
/PRIVTEXT  
/Processing by B. Siemon (BGR) using HEM05  
/Levelled but uncorrected data  
/Transferred on 07-JAN-17 18:40:00  
/ 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 10929  
//Date 2004/06/10  
Line 1.2  
3508647 5968052 9.130295 53.843382 68750 92054.4 1.78 31.85 33.92 29.70 34.47 5.33 2.01 32.01 ... 35.61 -5.28 0.21  
3508644 5968053 9.130249 53.843391 68751 92054.5 1.88 31.91 33.92 29.80 34.47 5.33 2.06 32.07 ... 35.78 -5.25 0.21  
3508640 5968055 9.130189 53.843409 68752 92054.6 1.88 32.34 33.92 29.80 34.46 5.34 2.11 32.13 ... 35.95 -5.22 0.21

In dieser Datei sind alle notwendigen gemessenen Parameter sowie die berechneten Halbraumparameter in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m NN	Topographische Höhe
H_RADAR	m	gefilterter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge (41m) vom Hubschrauber zur Flugsonde; entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	ungefilterter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m NN	geglättete absolute Sensorhöhe, abgeleitet aus den GPS-Daten
H_BARO	m NN	geglättete barometrische Sensorhöhe, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers minus der Kabellänge (41 m)
RHOA_1	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die niedrigste Frequenz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die niedrigste Frequenz
ZST_1	m	Schwerpunkttiefe für die niedrigste Frequenz
:		
RHOA_5	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die höchste Frequenz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die höchste Frequenz
ZST_5	m	Schwerpunkttiefe für die höchste Frequenz



### 3) HEM109\_INV.XYZ

Beispiel:  
 /PRIVTEXT  
 /Processing by B. Siemon (BGR) using HEM05  
 /Unlevelled and uncorrected data  
 /Transferred on 07-JAN-17 18:10:00  
 / 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 10929  
 //Date 2004/06/10  
 Line 1.2  
 3508647 5968052 9.130295 53.843382 68750 92054.4 1.78 31.85 33.92 29.70 34.47 4962.59 0.20 ... 5.83 17.05 6.38 2.87  
 3508644 5968053 9.130249 53.843391 68751 92054.5 1.88 31.91 33.92 29.80 34.47 4972.23 0.42 ... 5.55 15.32 7.00 2.89  
 3508640 5968055 9.130189 53.843409 68752 92054.6 1.88 32.34 33.92 29.80 34.46 4971.51 0.46 ... 5.51 15.35 6.99 2.84

In dieser Datei sind alle notwendigen gemessenen Parameter sowie die Ergebnisse der 1D-Inversion in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

X m Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3  
 Y m Gauß-Krüger Hochwert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3  
 LON ° Geografische Länge, Bezugssystem WGS84  
 LAT ° Geografische Breite, Bezugssystem WGS84  
 RECORD an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer  
 UTC\_TIME hhmss.s GPS-Zeit (UTC)  
 TOPO m NN Topographische Höhe  
 H\_RADAR m gefilterter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge (41m) vom Hubschrauber zur Flugsonde; entspricht der Höhe der Flugsonde  
 H\_LASER m ungefilterter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde  
 BIRD\_NN m NN geglättete absolute Sensorhöhe, abgeleitet aus den GPS-Daten  
 H\_BARO m NN geglättete barometrische Sensorhöhe, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers minus der Kabellänge (41 m)  
 RHO\_I\_1 Ωm 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\_4 Ωm spezifischer Widerstand der vierten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells  
 D\_I\_4 m Mächtigkeit der vierten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells  
 RHO\_I\_5 Ωm spezifischer Widerstand der untersten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells  
 QALL Ω Anpassungsfehler der Inversion



```

3) HEM109_RHO_AT_Z
Beispiel:
/PRIVTEXT
/Processing by B. Siemon (BGR) using HEM05
/Unvelled and uncorrected data
/Transferred on 13-JAN-17 16:40:00
/ X Y Z_M005m Z_M010m Z_M015m Z_M020m Z_M025m Z_M030m Z_M035m Z_M040m Z_M045m Z_M050m ... Z_M100m
//Flight 10929
//Date 2004/06/10
Line 1.2
3508647 5968052 14.31 2.59 3.59 5.83 5.83 6.09 6.09 6.38 6.38 6.38 ... -999.99
3508644 5968053 13.87 2.79 3.71 5.55 5.55 6.19 6.19 7.00 7.00 7.00 ... -999.99
3508640 5968055 14.13 2.85 3.76 5.51 5.51 6.16 6.16 6.99 6.99 6.99 ... -999.99

```

In dieser Datei sind die spezifischen Widerstände Rho der 1D-Inversion für verschiedene Tiefen abgespeichert:

X	Y	m	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm	Ωm
			Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3									
Z_M005m			Gauß-Krüger Hochwert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3									
Z_M010m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -5 m NN									
Z_M015m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -10 m NN									
Z_M020m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -15 m NN									
Z_M025m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -20 m NN									
Z_M030m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -25 m NN									
Z_M035m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -30 m NN									
Z_M040m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -35 m NN									
Z_M045m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -40 m NN									
Z_M050m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -45 m NN									
Z_M100m			spezifischer Widerstand des 5-Schicht-Inversionsmodells bei -100 m NN									

-999.99 = Es sind keine Modellwerte in dieser Tiefe vorhanden.

Anmerkungen:

Zeilen, die mit "/" beginnen sind Kommentarzeilen.

Zeilen, die mit "//" beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.

Zeilen, die mit "LINE" beginnen, kennzeichnen Messprofillinien.

Zeilen, die mit "TIE" beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.



## **B) Magnetik (HMG)**

**HMG109.XYZ**

/BGR HEADER:

/

/AREANAME

/HADELNER MARSCH

/AREACODE

/109

/C\_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM

/ 9 3 GK-BESSEL

/ELLIPSOID FOR LON AND LAT

/WGS84

/DEVICE

/G-822A

/IGRF

/2005

/LON\_BASE

/8.651536

/LAT\_BASE

/53.769985

/ALT\_BASE

/22

/TOWCABLE

/41.0

/DUMMY

/-9999

/PRIVTEXT

(hier können Kommentarzeilen stehen)



Beispiel:

```

/PRIVATEXT
/ X Y 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 10916
//Date 2004/06/10
Line 1.2
3508146 5968240 9.122694 53.845081 68891 20040610 92108.5 32.7 1.0007 36.1 49244.03 49244.03 49308.11 34.79 34.93
3508139 5968243 9.122582 53.845105 68892 20040610 92108.6 32.5 1.0013 36.1 49244.03 49244.03 49308.11 34.79 34.94
3508137 5968244 9.122545 53.845113 68893 20040610 92108.7 32.5 1.0013 35.8 49244.03 49244.03 49308.12 34.79 34.94

```

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°, Zone 3
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
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 WGS84
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
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 Messprofilnennungen.
- Zeilen, die mit "Tie" beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.



## C) Radiometrie (HRD)

```
HRD109.xyz
/AREANAME
/HADELNER MARSCH
/AREACODE
/109
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM
/ 9 3 GK-BESSEL
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT
/WGS84
/DEVICE
/GR-820
/BACKGROUND (IAEA 2003, S.60) a(TC), b(TC), a(K), b(K), a(U), b(U), a(Th), b(Th), a(upU), b(upU)
/68.77, 0.7771, 8.32, 0.0417, 2.16, 0.0363, 1.59, 0.0338, 0.41, 0.009475
/STRIPPING (IAEA 2003, S.65) alpha, beta, gamma, a, b, g
/0.3044, 0.5144, 0.7304, 0.0787, 0.0069, 0.0077
/ATTENUATION (IAEA 2003, S.67) mue(TC), mue(K), mue(U), mue(Th)
/0.007594, 0.008900, 0.009022, 0.006925
/SENSITIVITY (IAEA 2003, S.68) S(K), S(U), S(Th)
/32.45, 3.58, 2.31
/TOWCABLE
/ 41.00
/DUMMY
/-9999
/PRIVTEXT
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```



Beispiel:  
 /Processed by T. Kerner  
 / X Y LON LAT RECORD UTC\_DATE UTC\_TIME ALT\_BIRD H\_RADAR\_RAW H\_LASER\_RAW HAG PRESSURE TEMP LIVE\_T  
 Fortsetzung der letzten drei Zeilen:  
 COSMIC\_RAW TOT\_RAW POT\_RAW THO\_RAW URAUP\_RAW TOT POT URA THO TOT\_LEV POT\_LEV URA\_LEV THO\_LEV EXPO  
 //Flight 10916  
 //Date 2004/06/10  
 Line 1,2  
 3508143 5968236 9.122694 53.845081 68890 20040610 92107.4 80.5 1.001 36.1 71.1 1003.789 0.0 944  
 3508103 5968252 9.122086 53.845219 68900 20040610 92108.5 79.5 1.000 34.7 70.2 1003.906 0.0 937  
 3508067 5968267 9.121535 53.845354 68910 20040610 92109.5 78.7 0.984 33.9 69.4 1003.999 0.0 938  
 Fortsetzung der letzten drei Zeilen:  
 54 717 87 13 29 1 594.9 2.30 2.90 6.87 594.94 2.23 2.55 6.85 7.02  
 62 701 93 13 11 0 591.3 2.32 2.88 6.78 591.32 2.25 2.53 6.80 7.02  
 50 726 85 17 25 2 589.0 2.35 2.88 6.71 589.03 2.28 2.53 6.74 7.04

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
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 WGS84
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
PRESSURE	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
URAU_P_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung im upward-looking Kristall
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:**

Zeilen, die mit "/" beginnen, sind Kommentarzeilen.

Zeilen, die mit "//" beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.

Zeilen, die mit "Line" beginnen, kennzeichnen Messprofilinien.

Zeilen, die mit "Tie" beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.



## Anhang III

### DVD-Inhalt

\	109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa5@139600Hz.ft.aux.xml
Adobe - Adobe Reader herunterladen.URL	109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa5@139600Hz.ft.gi
\Bericht\	109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa5@139600Hz.ft.xml
Technischer Bericht Hadelner Marsch.pdf	109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa5@139600Hz.hdr
\Daten\	109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa5@139600Hz.prj
\HEM\	109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa5@139600Hz.stx
Format_description_HEM109.txt	109_HadelnerMarsch_HEM_zst1@375Hz.ft
HEM109_APP.xyz	109_HadelnerMarsch_HEM_zst1@375Hz.ft.aux.xml
HEM109_DAT.xyz	109_HadelnerMarsch_HEM_zst1@375Hz.ft.gi
HEM109_INV.xyz	109_HadelnerMarsch_HEM_zst1@375Hz.ft.xml
HEM109_RHO_AT_Z.xyz	109_HadelnerMarsch_HEM_zst1@375Hz.hdr
\HMG\	109_HadelnerMarsch_HEM_zst1@375Hz.prj
Format_description_HMG109.txt	109_HadelnerMarsch_HEM_zst1@375Hz.stx
HMG109.xyz	109_HadelnerMarsch_HEM_zst2@1780Hz.ft
\HRD\	109_HadelnerMarsch_HEM_zst2@1780Hz.ft.aux.xml
Format_description_HRD109.txt	109_HadelnerMarsch_HEM_zst2@1780Hz.ft.gi
HRD109.xyz	109_HadelnerMarsch_HEM_zst2@1780Hz.ft.xml
\Karten\	109_HadelnerMarsch_HEM_zst2@1780Hz.hdr
Hadelner Marsch ÜK.eps	109_HadelnerMarsch_HEM_zst2@1780Hz.prj
Hadelner Marsch ÜK.jpg	109_HadelnerMarsch_HEM_zst2@1780Hz.stx
\ArcGis\	109_HadelnerMarsch_HEM_zst3@8510Hz.ft
Liesmich.txt	109_HadelnerMarsch_HEM_zst3@8510Hz.ft.aux.xml
\HEM\	109_HadelnerMarsch_HEM_zst3@8510Hz.ft.gi
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa1@375Hz.ft	109_HadelnerMarsch_HEM_zst3@8510Hz.ft.xml
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa1@375Hz.ft.aux.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_zst3@8510Hz.hdr
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa1@375Hz.ft.gi	109_HadelnerMarsch_HEM_zst3@8510Hz.prj
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa1@375Hz.ft.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_zst3@8510Hz.stx
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa1@375Hz.hdr	109_HadelnerMarsch_HEM_zst4@37830Hz.ft
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa1@375Hz.prj	109_HadelnerMarsch_HEM_zst4@37830Hz.ft.aux.xml
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa1@375Hz.stx	109_HadelnerMarsch_HEM_zst4@37830Hz.ft.gi
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa2@1780Hz.ft	109_HadelnerMarsch_HEM_zst4@37830Hz.ft.xml
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa2@1780Hz.ft.aux.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_zst4@37830Hz.hdr
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa2@1780Hz.ft.gi	109_HadelnerMarsch_HEM_zst4@37830Hz.prj
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa2@1780Hz.ft.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_zst4@37830Hz.stx
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa2@1780Hz.hdr	109_HadelnerMarsch_HEM_zst5@139600Hz.ft
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa2@1780Hz.prj	109_HadelnerMarsch_HEM_zst5@139600Hz.ft.aux.xml
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa2@1780Hz.stx	109_HadelnerMarsch_HEM_zst5@139600Hz.ft.gi
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa3@8510Hz.ft	109_HadelnerMarsch_HEM_zst5@139600Hz.ft.xml
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa3@8510Hz.ft.aux.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_zst5@139600Hz.hdr
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa3@8510Hz.ft.gi	109_HadelnerMarsch_HEM_zst5@139600Hz.prj
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa3@8510Hz.ft.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_zst5@139600Hz.stx
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa3@8510Hz.hdr	\HEMINV\
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa3@8510Hz.prj	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@005mbsl.ft
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa3@8510Hz.stx	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@005mbsl.ft.gi
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa4@37830Hz.ft	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@005mbsl.ft.xml
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa4@37830Hz.ft.aux.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@005mbsl.hdr
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa4@37830Hz.ft.gi	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@007mbsl.ft
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa4@37830Hz.ft.xml	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@007mbsl.ft.gi
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa4@37830Hz.hdr	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@007mbsl.ft.xml
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa4@37830Hz.prj	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@007mbsl.hdr
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa4@37830Hz.stx	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@010mbsl.ft
109_HadelnerMarsch_HEM_Rhoa5@139600Hz.ft	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@010mbsl.ft.gi
	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@010mbsl.ft.xml
	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@010mbsl.hdr
	109_HadelnerMarsch_HEM_Rho@015mbsl.ft

109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@015mbsl.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@015mbsl.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@015mbsl.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@020mbsl.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@020mbsl.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@020mbsl.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@020mbsl.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@030mbsl.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@030mbsl.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@030mbsl.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@030mbsl.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@040mbsl.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@040mbsl.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@040mbsl.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@040mbsl.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@050mbsl.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@050mbsl.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@050mbsl.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@050mbsl.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@060mbsl.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@060mbsl.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@060mbsl.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@060mbsl.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@070mbsl.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@070mbsl.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@070mbsl.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HEM\_Rho@070mbsl.hdr  
  
 \HMG\  
 109\_HadelnerMarsch\_HMG\_DeltaT.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HMG\_DeltaT.flt.aux.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HMG\_DeltaT.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HMG\_DeltaT.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HMG\_DeltaT.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HMG\_DeltaT.prj  
 109\_HadelnerMarsch\_HMG\_DeltaT.stx  
  
 \HRD\  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Expo.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Expo.flt.aux.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Expo.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Expo.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Expo.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Expo.prj  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Expo.stx  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_K.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_K.flt.aux.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_K.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_K.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_K.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_K.prj  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_K.stx  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_TC.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_TC.flt.aux.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_TC.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_TC.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_TC.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_TC.prj  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_TC.stx  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Th.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Th.flt.aux.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Th.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Th.flt.xml  
  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Th.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Th.prj  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_Th.stx  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_U.flt  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_U.flt.aux.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_U.flt.gi  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_U.flt.xml  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_U.hdr  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_U.prj  
 109\_HadelnerMarsch\_HRD\_U.stx  
  
 \Topografie\  
 TK50 Hadeln GK.txt  
 TK50 Hadelner Marsch.tif  
  
 \Karten\  
 \DEM\  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Höhenmodell.pdf  
  
 \Fluglinien\  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Fluglinien.pdf  
  
 \HEM\  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Halbraumwiderstand rhoa1.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Halbraumwiderstand rhoa2.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Halbraumwiderstand rhoa3.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Halbraumwiderstand rhoa4.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Halbraumwiderstand rhoa5.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Schwerpunktstiefe zst1.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Schwerpunktstiefe zst2.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Schwerpunktstiefe zst3.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Schwerpunktstiefe zst4.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Schwerpunktstiefe zst5.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -05m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -07m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -10m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -15m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -20m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -30m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -40m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -50m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -60m NN.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Spezifischer Widerstand<sup>↵</sup>  
 bei -70m NN.pdf  
  
 \HMG\  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Anomalien des<sup>↵</sup>  
 erdmagnetischen Totalfeldes.pdf  
  
 \HRD\  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Ionendosisleistung.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Kalium.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Thorium.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Totalstrahlung.pdf  
 TK50 Hadelner Marsch 109 Uran.pdf

\VRS\

VRS1090012.pdf	VRS1090421.pdf	VRS1091021.pdf
VRS1090019.pdf	VRS1090431.pdf	VRS1091031.pdf
VRS1090022.pdf	VRS1090441.pdf	VRS1091041.pdf
VRS1090029.pdf	VRS1090451.pdf	VRS1091051.pdf
VRS1090032.pdf	VRS1090461.pdf	VRS1091061.pdf
VRS1090039.pdf	VRS1090471.pdf	VRS1091071.pdf
VRS1090042.pdf	VRS1090481.pdf	VRS1091081.pdf
VRS1090049.pdf	VRS1090491.pdf	VRS1091091.pdf
VRS1090052.pdf	VRS1090501.pdf	VRS1091101.pdf
VRS1090059.pdf	VRS1090511.pdf	VRS1091111.pdf
VRS1090062.pdf	VRS1090521.pdf	VRS1091121.pdf
VRS1090069.pdf	VRS1090531.pdf	VRS1091131.pdf
VRS1090072.pdf	VRS1090541.pdf	VRS1091141.pdf
VRS1090079.pdf	VRS1090551.pdf	VRS1091151.pdf
VRS1090089.pdf	VRS1090561.pdf	VRS1091161.pdf
VRS1090099.pdf	VRS1090571.pdf	VRS1091171.pdf
VRS1090102.pdf	VRS1090581.pdf	VRS1091172.pdf
VRS1090109.pdf	VRS1090591.pdf	
VRS1090112.pdf	VRS1090601.pdf	
VRS1090119.pdf	VRS1090611.pdf	
VRS1090122.pdf	VRS1090621.pdf	
VRS1090129.pdf	VRS1090631.pdf	
VRS1090132.pdf	VRS1090641.pdf	
VRS1090139.pdf	VRS1090651.pdf	
VRS1090142.pdf	VRS1090661.pdf	
VRS1090151.pdf	VRS1090671.pdf	
VRS1090161.pdf	VRS1090672.pdf	
VRS1090171.pdf	VRS1090681.pdf	
VRS1090181.pdf	VRS1090691.pdf	
VRS1090191.pdf	VRS1090701.pdf	
VRS1090201.pdf	VRS1090711.pdf	
VRS1090212.pdf	VRS1090721.pdf	
VRS1090213.pdf	VRS1090731.pdf	
VRS1090222.pdf	VRS1090741.pdf	
VRS1090223.pdf	VRS1090751.pdf	
VRS1090232.pdf	VRS1090761.pdf	
VRS1090242.pdf	VRS1090771.pdf	
VRS1090252.pdf	VRS1090781.pdf	
VRS1090253.pdf	VRS1090791.pdf	
VRS1090261.pdf	VRS1090801.pdf	
VRS1090271.pdf	VRS1090811.pdf	
VRS1090281.pdf	VRS1090821.pdf	
VRS1090291.pdf	VRS1090831.pdf	
VRS1090301.pdf	VRS1090841.pdf	
VRS1090311.pdf	VRS1090851.pdf	
VRS1090321.pdf	VRS1090861.pdf	
VRS1090331.pdf	VRS1090871.pdf	
VRS1090341.pdf	VRS1090881.pdf	
VRS1090351.pdf	VRS1090891.pdf	
VRS1090361.pdf	VRS1090901.pdf	
VRS1090362.pdf	VRS1090911.pdf	
VRS1090371.pdf	VRS1090921.pdf	
VRS1090372.pdf	VRS1090931.pdf	
VRS1090381.pdf	VRS1090941.pdf	
VRS1090382.pdf	VRS1090951.pdf	
VRS1090391.pdf	VRS1090961.pdf	
VRS1090392.pdf	VRS1090971.pdf	
VRS1090401.pdf	VRS1090981.pdf	
VRS1090402.pdf	VRS1090991.pdf	
VRS1090411.pdf	VRS1091001.pdf	
VRS1090412.pdf	VRS1091011.pdf	

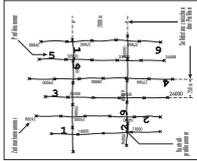


## **Anhang IV**

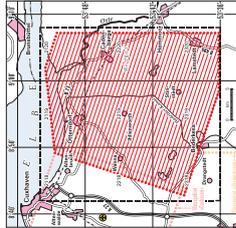
### **Karten**

(Originalkarten 1:50.000 verkleinert auf 1:200.000)

**AEROGEOPHYSIKALISCHE  
MESSUNGEN IM GEBIET  
HADELNER MARSCH**

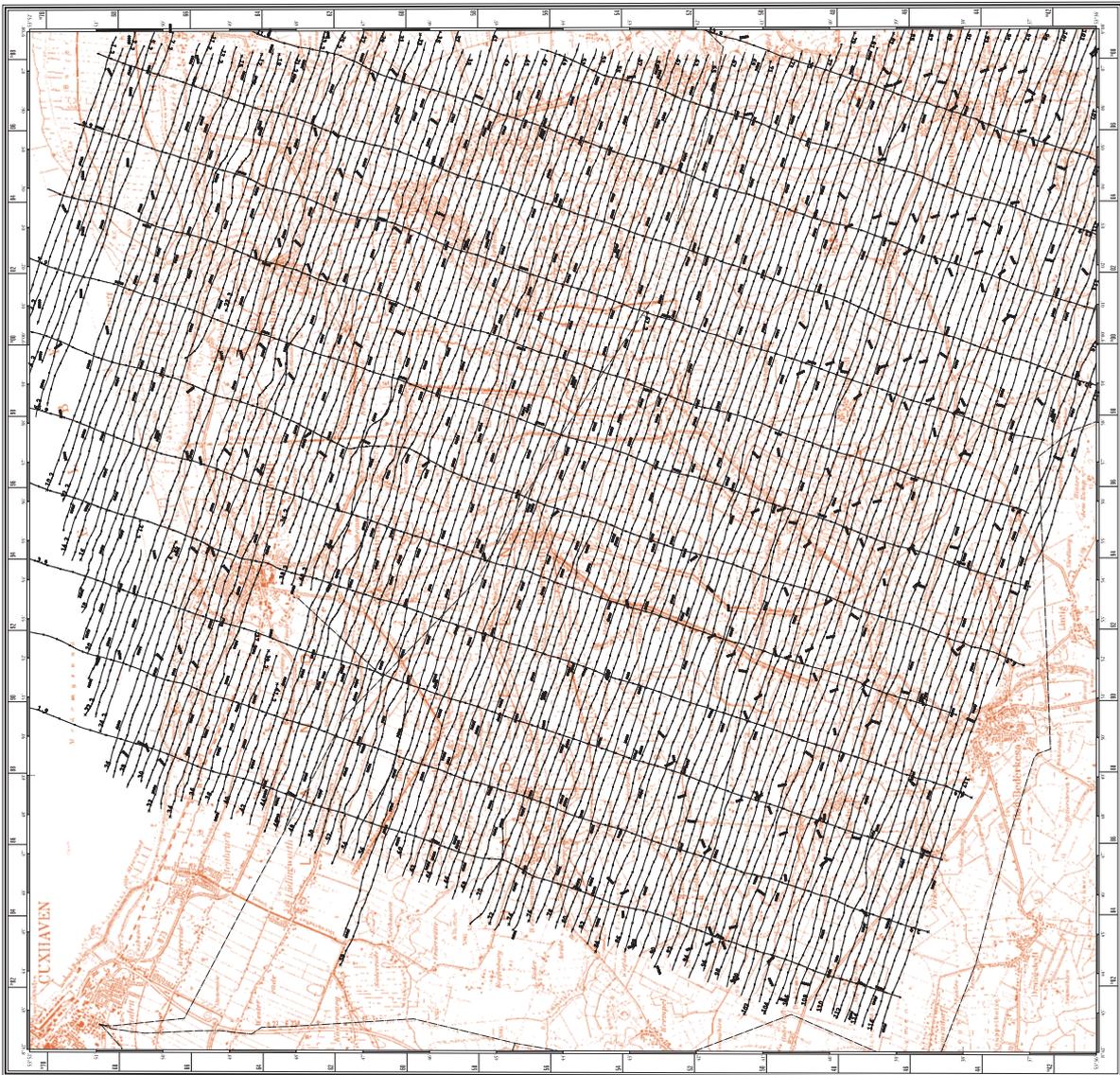


Geographische Koordinaten: 52° 18' 00" N, 10° 00' 00" E  
Merkator-Projektion  
Datum: 1983  
Maßstab: 1:50 000  
Quelle: BGR, Hannover



Maßstab 1:50 000 (2 cm @ 1 km)

<b>BGR</b> Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Institute für Geowissenschaften, Geochemie und Bergbau (IGW) Institute für Bergbauwissenschaften, Geochemie und Bergbau (IGB) Institute für Bergbauwissenschaften, Geochemie und Bergbau (IGB) Institute für Bergbauwissenschaften, Geochemie und Bergbau (IGB)	<b>Hadelner Marsch</b> Topographie und Fluglinien
Beauftragung: BGR, Hannover, vom 1. März 2004, Nr. 100/04 BGR, Hannover, vom 1. März 2004, Nr. 100/04 BGR, Hannover, vom 1. März 2004, Nr. 100/04 BGR, Hannover, vom 1. März 2004, Nr. 100/04	B. 3-13 - Angewandte Aero- und Bodengeophysik Hannover, 2005 - www.bgr.de



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

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