

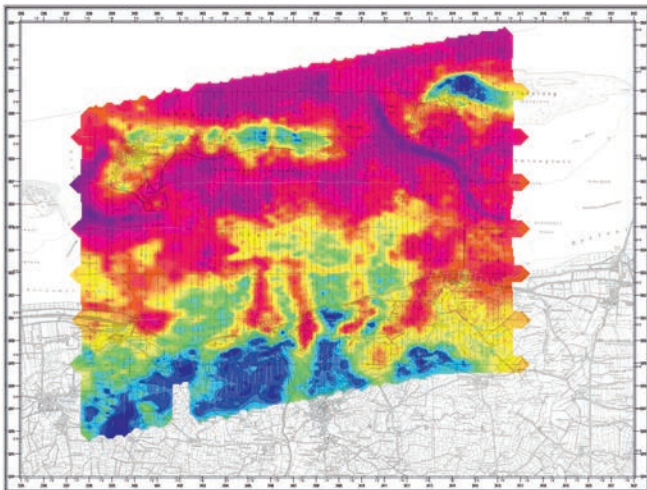
W. Voß, B. Siemon, J. Pielawa,  
M. Bock, M. Ibs-von Seht



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

# Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Befliegung Langeoog

2008/09







**Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe**

**Technischer Bericht  
Hubschraubergeophysik  
Befliegung Langeoog**

**2008/09**

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

Datum: 25.01.2015



## Inhaltsverzeichnis

<b>Personal.....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Kartenverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Liste der Vertikalsektionen.....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungen .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Das Messgebiet .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR .....</b>	<b>9</b>
4.1. Messhubschrauber.....	10
4.2. Messausrüstung.....	10
4.3. Elektromagnetik .....	11
4.4. Magnetik .....	13
4.5. Radiometrie.....	14
4.6. Navigations- und Positionierungssystem.....	15
4.7. Datenerfassung und -aufzeichnung.....	17
4.8. Videosystem .....	17
4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber .....	18
<b>5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten .....</b>	<b>19</b>
5.1. Prozessabläufe .....	20
5.2. Positionsdaten .....	20
5.2.1. GPS-Koordinaten.....	20
5.2.2. Radarhöhen.....	21
5.2.3. Laserhöhen .....	21
5.2.4. Topografische Höhen .....	23
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik .....	23
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems.....	24
5.3.2. Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur .....	25
5.3.3. Datenkorrektur.....	26
5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter .....	27
5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten.....	29
5.3.6. Statistische Niveauanpassung .....	29
5.3.7. Dateninterpolation und -glättung.....	30
5.3.8. 1D-Inversion der HEM-Daten .....	31
5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse .....	31

5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik.....	32
5.4.1. Magnetisches Totalfeld.....	32
5.4.2. Berechnung des IGRF.....	33
5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen.....	33
5.4.4. Statistische Niveaue Anpassung.....	34
5.4.5. Präsentation der Magnetikergebnisse .....	35
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie .....	35
5.5.1. Energiekalibrierung .....	36
5.5.2. Verminderung des Rauschens .....	36
5.5.3. Detektorhöhe über der Erdoberfläche und effektive Höhe .....	37
5.5.4. Registrierzeitkorrektur.....	38
5.5.5. Hintergrundstrahlung .....	38
5.5.6. Korrektur der Compton-Streuung .....	39
5.5.7. Zählraten in Standardflughöhe.....	40
5.5.8. Berechnung der Radioelementgehalte und der Dosisleistung.....	41
5.5.9. Statistische Niveaue Anpassung und Glättung.....	42
5.5.10. Präsentation der Ergebnisse.....	43
<b>6. Kartografische Arbeiten .....</b>	<b>44</b>
6.1. Topografische Karten 1:50.000 .....	44
6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software.....	44
6.3. Ergebniskarten .....	45
<b>7. Archivierung.....</b>	<b>46</b>
<b>8. Literatur.....</b>	<b>47</b>
<b>Unterschriften.....</b>	<b>49</b>
<b>Anhang I:</b> Befliegungsdaten Messgebiet Langeoog.....	<b>51</b>
<b>Anhang II:</b> Beschreibung der Datenformate.....	<b>57</b>
<b>Anhang III:</b> DVD-Inhalt .....	<b>75</b>
<b>Anhang IV:</b> Karten.....	<b>79</b>
<b>Anhang V:</b> Vertikalsektionen .....	<b>111</b>
<b>Anlage: DVD</b> (Double Layer DVD+R)	

## **Personal:**

### **Projektleitung**

Dr. Uwe **Meyer**, Fachbereichsleiter B2.1, Projektleitung BGR  
Dr. Bernhard **Siemon**, Arbeitsbereichsleiter in B2.1, Projektleitung BGR  
Dr. Helga **Wiederhold**, Leiterin des Forschungsschwerpunkts Grundwassersysteme –  
Hydrogeophysik, Projektleitung LIAG

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

Dr. Uwe **Meyer**, Fachbereichsleiter, B2.1, BGR  
Dr. Bernhard **Siemon**, Arbeitsbereichsleiter, HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR  
Dr. Malte **Ibs-von Seht**, Geologe, HMG- und HRD-Datenauswertung, B2.1, BGR  
Dr. Melanie **Bock**, Geophysikerin, HMG- und HRD-Datenauswertung, B2.1, BGR  
Wolfgang **Voß**, Vermessungsingenieur, HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR  
Jens **Pielawa**, Kartograf, B2.1, BGR

### **Messgruppe**

Wolfgang **Voß**, Vermessungsingenieur, B2.1, BGR  
Karl-Heinz **Meinhardt**, Elektroingenieur, Systembetreuer, B2.1, BGR  
Josef **Scheiwein**, Hubschrauber Ingenieur, B2.1, 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  
  
Email: heli@bgr.de, Uwe.Meyer@bgr.de, Bernhard.Siemon@bgr.de

### **Abbildungsverzeichnis:**

1. Lageskizze des Messgebietes Langeoog
2. Fluglinienkarte (Soll-Fluglinien) für das Messgebiet Langeoog
3. Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR
4. Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen und geschichteten Halbräumen
5. Anpassung der Observatoriumsdaten an das Niveau der Bodenstationsdaten

### **Tabellenverzeichnis:**

1. Technische Daten der Befliegung Langeoog
  2. Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
  3. Geophysikalische Messsysteme
  4. HEM-Systemparameter für BKS36a
  5. Bodenstation
  6. Energiebereiche und Kanalzuordnungen registrierter Strahlungsquellen
  7. Navigations- und Positionierungssysteme
  8. Höhenmesser
  9. Datenerfassung und -aufzeichnung
  10. Videosystem
  11. Sonstige Ausrüstung
  12. Auswertungsebenen für die HEM.
  13. Filterparameter für die Korrektur der Laserhöhe in Bereichen mit Vegetation
  14. Kalibrierwerte für das HEM-System (BKS36a)
  15. Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung
  16. Filterparameter für die halbautomatische Erkennung von anthropogenen Störungen
  17. Filterparameter für die HEM-Niveaurektur
  18. Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung
  19. Koeffizienten der Einstreueraten
  20. Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen
  21. Sensitivitäten
  22. Lineare Abschwächungskoeffizienten  $\mu_v$  der Vegetation
  23. Eckpunktkoordinaten der Blattschnitte Langeoog
  24. Gitterparameter
  25. Inhalt der DVD
- A-1:** Flugprotokoll
- A-2:** Gebietsdateien



---

**Kartenverzeichnis (1:50.000):**

1. Topografie und Fluglinien
2. Digitales Höhenmodell in m NHN
3. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 133.200 Hz ( $\rho_{06}$ ) in  $\Omega\text{m}$
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 41.415 Hz ( $\rho_{05}$ ) in  $\Omega\text{m}$
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8372 Hz ( $\rho_{04}$ ) in  $\Omega\text{m}$
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 5400 Hz ( $\rho_{03}$ ) in  $\Omega\text{m}$
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1817 Hz ( $\rho_{02}$ ) in  $\Omega\text{m}$
8. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 386 Hz ( $\rho_{01}$ ) in  $\Omega\text{m}$
9. Schwerpunktstiefe bei 133.200 Hz ( $z_{06}$ ) in m unter GOK
10. Schwerpunktstiefe bei 41.415 Hz ( $z_{05}$ ) in m unter GOK
11. Schwerpunktstiefe bei 8372 Hz ( $z_{04}$ ) in m unter GOK
12. Schwerpunktstiefe bei 5400 Hz ( $z_{03}$ ) in m unter GOK
13. Schwerpunktstiefe bei 1817 Hz ( $z_{02}$ ) in m unter GOK
14. Schwerpunktstiefe bei 386 Hz ( $z_{01}$ ) in m unter GOK
15. Spezifischer Widerstand bei 0 m unter NHN
16. Spezifischer Widerstand bei 2 m unter NHN
17. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter NHN
18. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter NHN
19. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter NHN
20. Spezifischer Widerstand bei 20 m unter NHN
21. Spezifischer Widerstand bei 25 m unter NHN
22. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter NHN
23. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter NHN
24. Spezifischer Widerstand bei 50 m unter NHN
25. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter NHN
26. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
27. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT, bezüglich anthropogener Signale korrigiert
28. Gehalte von Kalium im Boden in %
29. Äquivalentgehalte von Thorium im Boden in ppm
30. Äquivalentgehalte von Uran im Boden in ppm
31. Gesamtstrahlung in cps
32. Ionendosisleistung am Boden in  $\mu\text{R/h}$

---

**Liste der Vertikalsektionen:**

Messprofile:

- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| <b>1.</b> VRS 1.1   | <b>27.</b> VRS 33.1 |
| <b>2.</b> VRS 2.1   | <b>28.</b> VRS 34.1 |
| <b>3.</b> VRS 4.1   | <b>29.</b> VRS 35.1 |
| <b>4.</b> VRS 5.1   | <b>30.</b> VRS 36.1 |
| <b>5.</b> VRS 7.1   | <b>31.</b> VRS 37.1 |
| <b>6.</b> VRS 8.1   | <b>32.</b> VRS 38.1 |
| <b>7.</b> VRS 10.1  | <b>33.</b> VRS 39.1 |
| <b>8.</b> VRS 11.1  | <b>34.</b> VRS 40.1 |
| <b>9.</b> VRS 13.1  | <b>35.</b> VRS 41.1 |
| <b>10.</b> VRS 14.1 | <b>36.</b> VRS 42.1 |
| <b>11.</b> VRS 16.1 | <b>37.</b> VRS 43.1 |
| <b>12.</b> VRS 17.1 | <b>38.</b> VRS 44.1 |
| <b>13.</b> VRS 19.1 | <b>39.</b> VRS 45.1 |
| <b>14.</b> VRS 20.1 | <b>40.</b> VRS 46.1 |
| <b>15.</b> VRS 21.1 | <b>41.</b> VRS 47.1 |
| <b>16.</b> VRS 22.1 | <b>42.</b> VRS 48.1 |
| <b>17.</b> VRS 23.1 | <b>43.</b> VRS 49.1 |
| <b>18.</b> VRS 24.1 | <b>44.</b> VRS 50.1 |
| <b>19.</b> VRS 25.1 | <b>45.</b> VRS 51.1 |
| <b>20.</b> VRS 26.1 | <b>46.</b> VRS 52.1 |
| <b>21.</b> VRS 27.1 | <b>47.</b> VRS 53.1 |
| <b>22.</b> VRS 28.1 | <b>48.</b> VRS 54.1 |
| <b>23.</b> VRS 29.1 | <b>49.</b> VRS 55.1 |
| <b>24.</b> VRS 30.1 | <b>50.</b> VRS 56.1 |
| <b>25.</b> VRS 31.1 | <b>51.</b> VRS 57.1 |
| <b>26.</b> VRS 32.1 | <b>52.</b> VRS 58.1 |

- |                     |
|---------------------|
| <b>53.</b> VRS 59.1 |
| <b>54.</b> VRS 60.1 |
| <b>55.</b> VRS 61.1 |
| <b>56.</b> VRS 62.1 |
| <b>57.</b> VRS 63.1 |
| <b>58.</b> VRS 64.1 |
| <b>59.</b> VRS 65.1 |
| <b>60.</b> VRS 66.1 |
| <b>61.</b> VRS 67.1 |
| <b>62.</b> VRS 68.1 |
| <b>63.</b> VRS 69.1 |
| <b>64.</b> VRS 70.1 |
| <b>65.</b> VRS 71.1 |
| <b>66.</b> VRS 72.1 |
| <b>67.</b> VRS 73.1 |
| <b>68.</b> VRS 74.1 |

Kontrollprofile:

- |                    |
|--------------------|
| <b>69.</b> VRS 1.9 |
| <b>70.</b> VRS 2.9 |
| <b>71.</b> VRS 3.9 |
| <b>72.</b> VRS 4.9 |
| <b>73.</b> VRS 5.9 |
| <b>74.</b> VRS 6.9 |
| <b>75.</b> VRS 7.9 |

## Abkürzungen

°	Grad
°C	Grad Celsius
'	Minute
%	Prozent
1D, 3D	ein-, dreidimensional
$\alpha, \beta, \gamma, a$	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
AC	Wechselstrom
Ah	Amperestunden
Am	Amperemeter
As	Amperesekunden
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
b	kosmische Einstreuung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bi	Bismut
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
bmp	Bitmap
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (heute: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie)
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
$B_n$	Schichtadmittanz
C	Gehalt eines Radioelementes im Boden
$C_0$	Radioelementgehalt am Boden
$C_D$	Radioelementgehalt, beeinflusst von der Vegetation
$C_H$	Zählrate im Höhenstrahlungskanal
ch	Kanalnummer
$c_l$	effektive Kabellänge
cm	Zentimeter
cps	counts per second
Cs	Cäsium
CSRS	Canadian Spatial Reference System
$\Delta h_l$	reduzierte Laserhöhe
$\Delta h_{l_{kor}}$	korrigierte reduzierte Laserhöhe
$\Delta h_{l_{max}}$	Maximalwerte der reduzierten Laserhöhe
$\Delta h_{l_{noise}}$	Standardabweichung der reduzierten Laserhöhe
$\Delta I$	Nullniveaufehler der Inphase-Komponente

---

$\Delta Q$	Nullniveaufehler der Quadrature-Komponente
$\Delta T$	Anomalien des erdmagnetischen Feldes
$\Delta V$	magnetische Tagesvariationen
$\delta$	Residual
$\delta_p$	inverse, normierte Skintiefe (= $h/p$ )
D	Vegetationsdicke
$D_a$	scheinbarer Abstand
$d_a$	scheinbare Tiefe
DC	Gleichstrom
DEM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
$d_n$	Schichtmächtigkeiten
dpi	dots per inch (Pixel pro Zoll)
DTK	Digitale Topographische Karte
DVD	Digital Versatile Disc
$\varepsilon$	Komponentenverhältnis (= $Q/I$ )
$\varepsilon_0, \varepsilon_n$	dielektrische Permittivität ( $n = 0$ : Luft, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
E	Energie
E	Ionendosisleistung am Erdboden
e	Basis des natürlichen Logarithmus ( $1/e \approx 0.37$ )
EDWI	ICAO-Flughafen-Code: Wilhelmshaven-Mariensiel
EM	Elektromagnetik
eTh	Äquivalentgehalt von Thorium
ETRS	European Terrestrial Reference System
eU	Äquivalentgehalt von Uran
EU	Europäische Union
F	IGRF
f	Frequenz
FAS	Fugro Airborne Surveys (heute: CCS - Compagnie Générale de Géophysique)
FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik
ft	feet (Fuss)
G	Verstärkungskonstante des Gammastrahlenspektrometers
GCG	German Combined QuasiGeoid
GFZ	GeoforschungsZentrum Potsdam
GIS	Geoinformationssystem
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System

---

GPS-Z	vertikale GPS-Komponente
h	Höhe des EM-Systems in Meter über der Erdoberfläche (Flugsondenhöhe)
h_GPS	GPS-Höhe der Flugsonde
h_kpa	barometrischer Höhenkanal
h_l	Laserhöhe der Flugsonde
h_l <sub>kor</sub>	korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_r	Radarhöhe der Flugsonde (in Metern)
h_r <sub>mess</sub>	Radarhöhe des Hubschraubers (in feet)
h <sub>0</sub>	Normhöhe des Spektrometers (h <sub>0</sub> = 80 m)
HCP	horizontal-koplanar
h <sub>e</sub>	effektive Höhe (in Metern)
HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HMG	Hubschraubermagnetik
H <sub>N</sub>	berechnete Normalhöhe
hPa	Hektopascal
h <sub>r</sub>	Radarhöhe des Hubschraubers (in Metern)
HRD	Hubschrauberradiometrie
Hz	Hertz
IAEA	International Atomic Energy Association
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
ICBM	Institut für Chemie und Geologie des Meeres, Universität Oldenburg
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
I	Inphase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten
i	Laufparameter (Daten)
i	imaginäre Einheit
I <sub>c</sub>	berechnete Inphase-Komponente
I <sub>noise</sub>	Fehler der Inphase-Komponente
J <sub>0</sub>	Bessel-Funktion (1. Art, 0. Ordnung)
K	Grad Kelvin
K	Kalium
keV	Kiloelektronenvolt
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kPa	Kilopascal
λ	Wellenzahl
L	Messprofilkennung (line)
l	Liter

---

LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
log	Logarithmus
$\mu$	Absorptionskoeffizient
$\mu_v$	Abschwächungskoeffizient der Vegetation
$\mu, \mu_n$	magnetische Permeabilität ( $n = 0$ : Luft, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ )
$\mu\text{R/h}$	Mikroröntgen pro Stunde
m	Meter
m NHN	Meter über Normalhöhennull
m üG	Meter über Gelände
MeV	Megaelektronenvolt
ms	Millisekunde
mV	Millivolt
mxid	ArcGIS-Datenformat
N	Norden
N	Anzahl Frequenzen
n	Laufparameter (Modellparameter)
$N_c$	Zählrate der Hintergrundstrahlung
NaI	Natriumjodid
NASVD	noise adjusted singular value decomposition
NHN	Normalhöhennull (Höhe nach DHHN92)
NL	nicht-linear
$N_L$	Anzahl Schichten
$N_m$	Zählraten $N_{Th(corr)}$ , $N_{U(corr)}$ , $N_{K(corr)}$ und $N_{c,TC}$ bei effektiver Höhe $h_e$
$N_R$	registrierzeitkorrigierte Rohzählrate
$n_R$	Rohzählrate
$N_s$	Zählraten $N_m$ , bezogen auf die Standardhöhe $h_0$
nT	Nanotesla
$N_x$	bzgl. Hintergrundstrahlung und STD-Bedingungen korrigierte Zählraten ( $x = K, U, Th$ )
$N_{x(corr)}$	bzgl. der Einstreuraten korrigierte Zählraten ( $x = K, U, Th$ )
O	Osten
$\Omega m$	Ohmmeter ( $\text{Ohm} \cdot m$ )
$\omega$	Kreisfrequenz
offs	offset
$\pi$	Kreiszahl (= 3,14159265...)
P	im Hubschrauber gemessener Luftdruck
p	Skintiefe
$P_0$	mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe ( $P_0 = 101,325 \text{ kPa}$ )
PC	Personalcomputer

---

PDF	Portable Document Format
ppm	parts per million
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
$Q_c$	berechnete Quadrature-Komponente
$Q_{noise}$	Fehler der Quadrature-Komponente
$\rho, \rho_n$	spezifischer (Schicht-)Widerstand ( $n = 0$ : Luft, $\rho_0 > 10^8 \Omega m$ )
$\rho_a$	scheinbarer spezifischer Widerstand
$\rho_w$	scheinbarer spezifischer Widerstand von (Meer-)Wasser
r	Abstands- oder Ortsparameter
$R_1$	komplexer Reflexionsfaktor
$r_1$	mittlere Amplitudenkorrektur
$r_{mess}$	gemessene Radarhöhe
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
S	Sensitivität
S	Süden
s	Sekunde
STD	Standardbedingungen (Standardtemperatur und -druck)
STF	Standardfehler
T	Kontrollprofilkennung (tieline)
T	Totalintensität des erdmagnetischen Feldes
T	Temperatur
t	Zeit
$T_0$	Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala (273,15 K)
tanh	Tangens Hyperbolicus
TC	Gesamtstrahlung
Th	Thorium
Tl	Thallium
$t_L$	aktive Registrierzeit des Spektrometers
topo	topografische Höhe
U	Uran
USB	Universal Serial Bus
USA	United States of America
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
UTM	Universal Transverse Mercator Projection
V	Volt
VCX	vertikal-koaxial
$V_m$	Voltmeter
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
$V_s$	Voltsekunde
W	Westen

---

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

Die Kenntnis des nahen Untergrundes zwischen der Oberfläche und den ersten hundert Metern Tiefe ist eine wesentliche Voraussetzung zur Planung und Arbeit in vielfältigen ökonomischen, ökologischen und geowissenschaftlichen Bereichen. Die Nordseeküste ist unter Aspekten wie Klimawandel, Küstenschutz und Wirtschaftsraum von besonderem Interesse. Nordseeinseln, Wattenmeer und Deichregionen sind durch Sturmfluten und langfristigen Meeresspiegelanstieg besonders gefährdet. In Norddeutschland gewinnt die Problematik der Grundwasserversalzung in der Praxis der Grundwasserförderung und -aufbereitung zunehmend an Bedeutung und ist eine latente Gefahr für die nachhaltige Nutzung der Grundwasservorkommen. Die natürlichen Ursachen wie Meerwasserintrusionen und Ablaugungen der Salzstöcke werden durch hydraulische Eingriffe bei Grundwasserentnahme sowie bei künstlicher Entwässerung verstärkt. Auch wenn diese Gefahren kaum abgewendet werden können, sind ihre Auswirkungen zum Beispiel auf Süßwasservorkommen besser einschätzbar, wenn eine umfassende Datengrundlage zur Verfügung steht. Aerogeophysikalische Messungen können hier insbesondere Hydrogeologen und Wasserversorgern zu einem besseren Verständnis der Verhältnisse im Untergrund verhelfen.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt derzeit im Rahmen des Projektes „Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche“ (D-AERO) flächenhafte Befliegungen an der deutschen Nordseeküste durch. In den Jahren 2008 und 2009 wurde das Projekt vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) unterstützt. Hierbei standen drei Regionen im Vordergrund: a) die Erweiterung der vorhandenen Datensätze im Raum Bremerhaven-Cuxhaven-Hadelner Bucht nach Westen in den Ems-Jade-Weser Raum, einschließlich der Ostfriesischen Inseln sowie nach Süden bis in den Raum Oldenburg-Bremen; b) das Schließen der Lücke der vorhandenen Datensätze im Raum Bremerhaven-Cuxhaven-Hadelner Bucht und im Raum Hamburg und damit die Kartierung bzw. Bestandsaufnahme des Einflussbereiches der Elbe, und c) die Erweiterung der Messflächen nach Norden in den schleswig-holsteinischen Küstenraum. Die Festlegung der jeweiligen Befliegungsflächen fand in Absprache mit den staatlichen geologischen Diensten (hier: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, LBEG), der Universität Oldenburg (ICBM-Terramare) und der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer statt.

Das Messgebiet Langeoog erstreckt sich von der Insel Langeoog im Westen bis zur Insel Spiekeroog im Osten, die noch mit einem guten Drittel ihrer Gesamtfläche zum Messgebiet gehört. Es umfasst die Wattflächen südlich dieser beiden Inseln und wird auf dem Festland in etwa durch die Ortschaften Dornum im Westen, Esens sowie Verdum im Osten begrenzt. Die Gebietsgröße beträgt etwa 259 km<sup>2</sup> und beinhaltet eine Gesamtprofillänge von 1081 km. Zur Abdeckung des gesamten Messgebiets wurden 12 Messflüge benötigt. Der Sollabstand der 68 N-S-Messprofile beträgt 250 m, der Sollabstand der senkrecht dazu verlaufenden 7 W-O-Kontrollprofile beträgt 2000 m.

Ziel der Befliegung Langeoog war es, zum Verständnis der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse beizutragen. Dabei lag der Fokus auf der Untersuchung der Süßwasserlinsen Langeoogs, der Detektion potentieller Süßwasseraustritte im Wattenmeer sowie der Abschätzung des Gefährdungspotentials für die Versalzung von Süßwasservorkommen auf dem meernahen Festland. Die

Ergebnisse können damit auch zur zukünftigen nachhaltigen wirtschaftlichen Nutzung des nord-deutschen Küstenraums genutzt werden, z. B. bei der Wasserentnahme aus den Süßwasservorkommen auf den Inseln und dem Festland mit einer möglichen Erhöhung des Meeresspiegels.

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

Während des Fluges wurden die HEM- und HMG-Daten zehnmal pro Sekunde aufgezeichnet, was bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von etwa 124 km/h auf einen Messpunkt Abstand von 3,4 m führte, der aufgrund heftiger, meist aus westlicher Richtung kommenden Winde jedoch stark variierte. Die mittlere Höhe der Flugsonde lag bei etwa 33 m über Gelände.

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

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

Folgende Karten sind mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:50.000 erstellt worden:

- Fluglinienkarte der vermessenen Profile (Ist-Flugwege),
- Digitales Geländemodell,
- Scheinbare spezifische Widerstände (Halbraumwiderstände) und Schwerpunktstiefen für sechs Messfrequenzen 386, 1.817, 5.400, 8.372, 41.415 und 133.200 Hz,
- Spezifische Widerstände in den Tiefen 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 60 m unter NHN, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen,
- Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes,
- Gehalte von Kalium im Boden in %, die Äquivalenzgehalte von Thorium und Uran im Boden in ppm, die Gesamtstrahlung in cps und die Ionendosisleistung am Boden in  $\mu\text{R/h}$ .

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

## 2. Einleitung

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

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

Die Nordseeküste ist unter Aspekten wie Klimawandel und Küstenschutz von besonderem Interesse. Nordseeinseln, Wattenmeer und Deichregionen sind durch Sturmfluten und langfristigen Meeresspiegelanstieg besonders gefährdet. In Norddeutschland gewinnt die Problematik der Grundwasserversalzung in der Praxis der Grundwasserförderung und -aufbereitung zunehmend an Bedeutung und ist eine latente Gefahr für die langfristige Nutzung der Grundwasservorkommen. Die natürlichen Ursachen, wie Meerwasserintrusionen und Ablaugungen der Salzstöcke werden durch hydraulische Eingriffe bei Grundwasserentnahme sowie bei künstlicher Entwässerung verstärkt. Auch wenn diese Gefahren kaum abgewendet werden können, sind ihre Auswirkungen zum Beispiel auf Süßwasservorkommen besser einschätzbar, wenn eine umfassende Datengrundlage zur Verfügung steht. Aerogeophysikalische Messungen können hier den Hydrogeologen und Wasserversorgern zu einem besseren Verständnis der Verhältnisse im Untergrund verhelfen. Diese Messungen liefern auch Informationen über Lage und Mächtigkeit von oberflächennahen Ton- und Kleivorkommen, die sowohl als Ressource für Baurohstoffe dienen als auch zum Grundwasserschutz beitragen können.

Als technisch-wissenschaftliche Oberbehörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) führt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) derzeit im Rahmen des Projektes „Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche“ (D-AERO) flächenhafte Befliegungen an der deutschen Nordseeküste durch. In den Jahren 2008 und 2009 wurde das Projekt vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) unterstützt. Hierbei standen drei Regionen im Vordergrund:

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

Die Festlegung der jeweiligen Befliegungsflächen fand in Absprache mit den staatlichen geologischen Diensten (hier: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, LBEG), der Universität Oldenburg (ICBM-Terramare) und der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer statt.

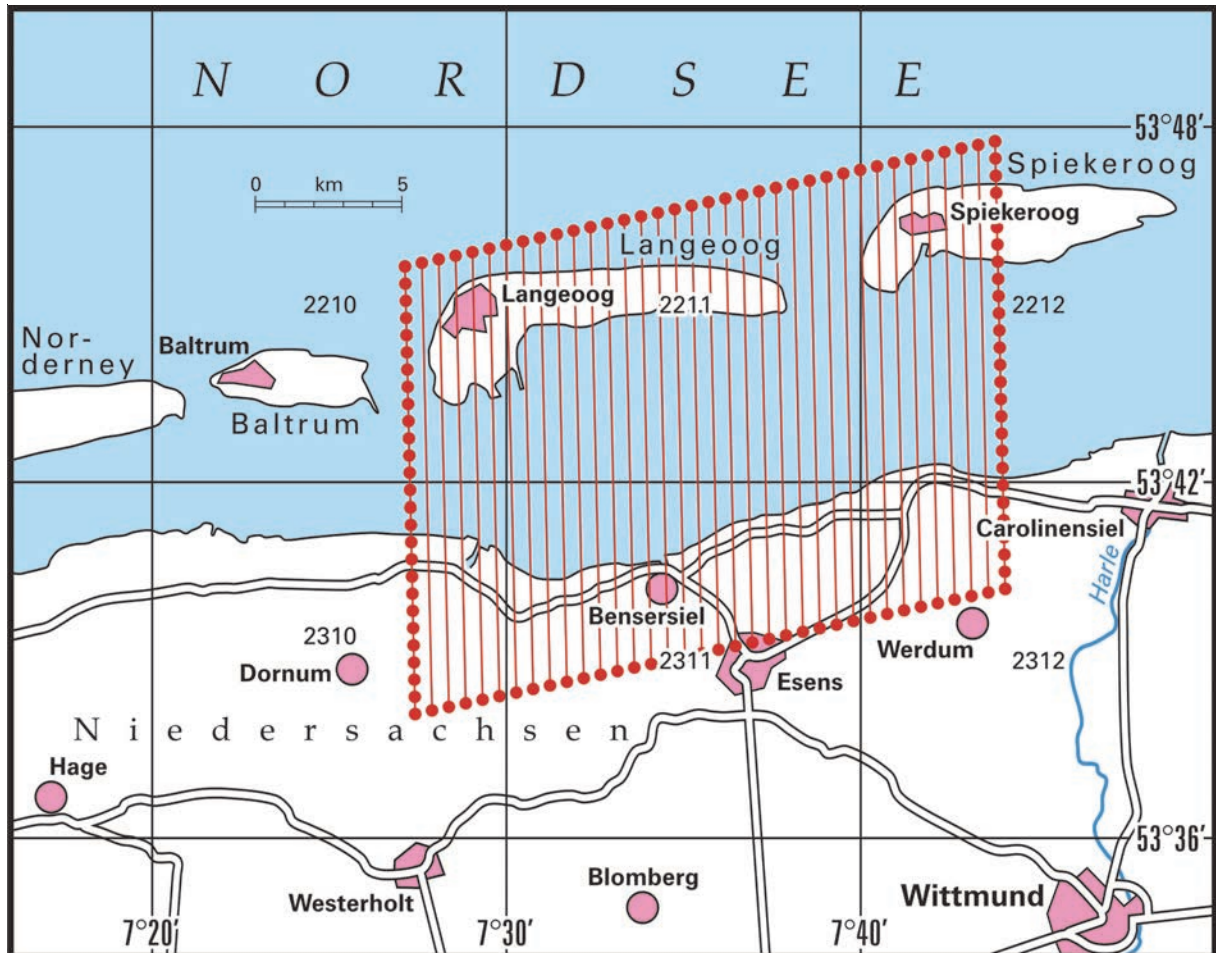
Das erste Untersuchungsgebiet war die Insel Borkum, die im März 2008 mit dem Hubschraubermesssystem der BGR befliegen wurde. Ziel der Befliegung der Insel Borkum war es, die bisher vorliegenden Informationen über die Ausdehnung und Beschaffenheit des Grundwasserkörpers zu erweitern und eine flächendeckende Datengrundlage für nachfolgende 3D-Modellierungen zu liefern (Siemon et al., 2009, Sulzbacher et al., 2012).

In den Jahren 2008, 2009 und 2010 erfolgten dann Messungen in den Gebieten Langeoog, Esens (Siemon et al., 2014a), Glückstadt (Steuer et al., 2013) sowie Nordenham (Miensopust et al., 2014). Weitere Messungen wurden im Jahr 2014 in den Gebieten Jever (Siemon et al., 2014b) und Varel (Siemon et al., 2014c) durchgeführt. Mit den Untersuchungen dieser Messgebiete konnten grundwasserführende Schichten, Grundwasserstauer und mögliche Versalzungszone kartiert werden.

Die Ergebnisse dieser sowie älterer Befliegungen in Deutschland sollen in das Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des LIAG ([www.geophysics-database.de](http://www.geophysics-database.de)) eingestellt werden.

### 3. Das Messgebiet

Das Messgebiet Langeoog umspannt das Areal von der Insel Langeoog im Westen bis zur Insel Spiekeroog im Osten, die noch mit einem guten Drittel ihrer Gesamtfläche zum Messgebiet gehört. Es umfasst die Wattflächen südlich dieser beiden Inseln und wird auf dem Festland in etwa durch die Ortschaften Dornum im Westen, Esens im Süden sowie Werdum im Osten begrenzt (Abb. 1). Es erstreckt sich von etwa 7°27' bis 7°44' östlicher Länge und 53°38' bis 53°48' nördlicher Breite.

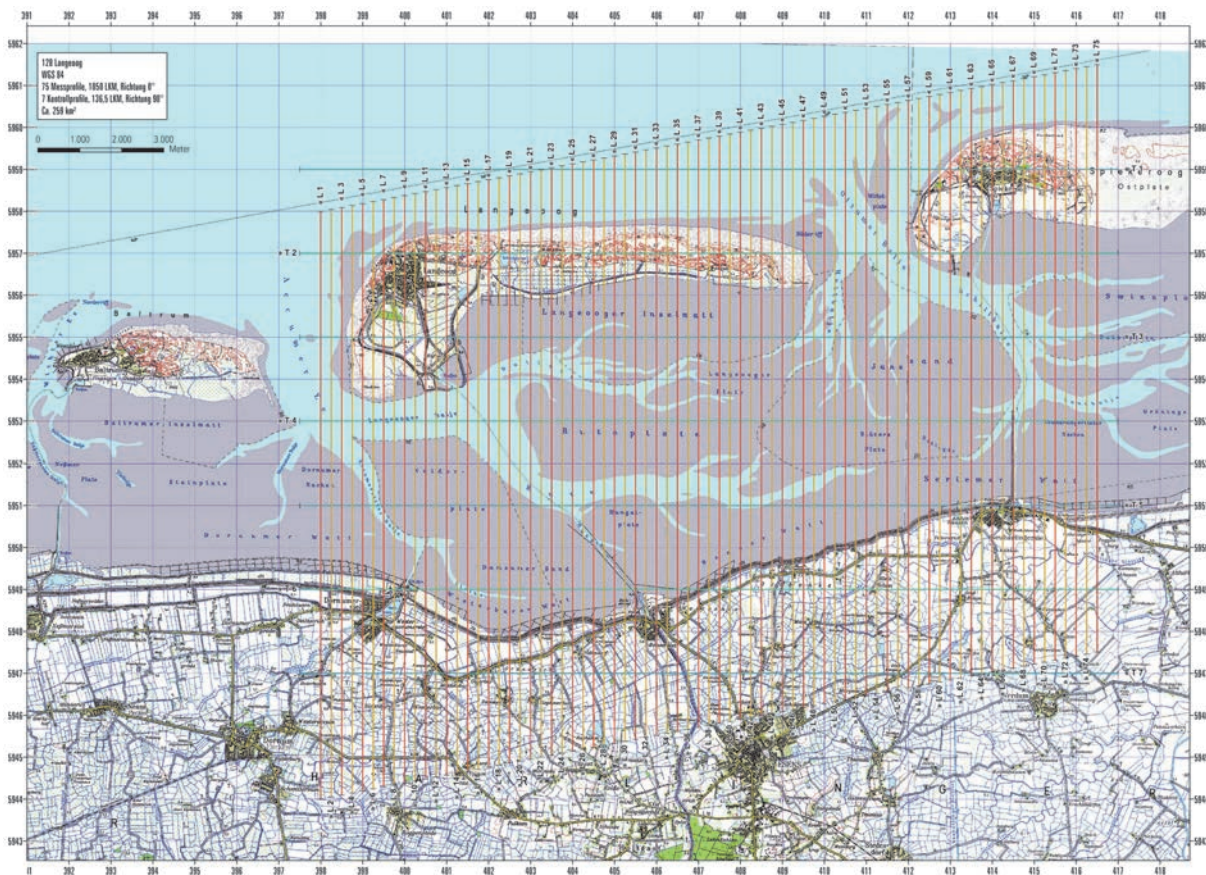


**Abb. 1:** Lageskizze des Messgebietes Langeoog

Die Befliegung des Messgebietes Langeoog mit drei geophysikalischen Verfahren (Elektromagnetik, Magnetik, Radiometrie) wurde von dem Hubschrauberteam der BGR im Februar, März und Dezember 2008 sowie im Februar und März 2009 vom Flughafen (JadeWeserAirport) in Wilhelmshaven-Mariensiel (EDWI) aus mit 12 Messflügen durchgeführt. Mit 68 N-S-Mess- und 7 W-O-Kontrollprofilen mit einer Gesamtlänge von 1081 Profilkilometern wurde eine Fläche von etwa 259 km<sup>2</sup> planmäßig vermessen. Daraus ergab sich eine Gesamtanzahl von 314.672 Messpunkten.



Die Messprofile sind durch L\*.1 und die Kontrollprofile durch T\*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L\*.2 gekennzeichnet (**Abb. 2**). Am Ende der Messflüge wurde – wenn möglich – ein etwa 6 km langer Abschnitt nordwestlich vom Flughafen als Referenzstrecke für Kalibrierzwecke überflogen. Einzelheiten zum Messgebiet und den Messflügen können der **Tab. 1** sowie **Tab. A-1** und **Tab. A-2** im **Anhang I** entnommen werden.



**Abb. 2:** Fluglinienkarte (Soll-Fluglinien) für das Messgebiet Langeoog

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

Messgebiet BGR-Gebietsnummer	Langeoog 128
Befliegungszeitraum	18.02.–14.03.2008 17.11.–20.11.2008 01.12.–10.12.2008 11.02.–19.02.2009 09.03.–13.03.2009
Größe des Messgebietes	259 km <sup>2</sup>
Gesamtprofilkilometer	1086 km
Gesamtanzahl der Messpunkte	314.672
Zahl der Messflüge	12
Bezeichnung der Messflüge	12801–12812 (12802, 12803 nicht existent)
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	33 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit über Grund	123,8 km/h
Mittlerer Messpunktabstand	3,4 m
Zahl der Messprofile	68
Länge der Messprofile	13 km
Richtung der Messprofile	0° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	250 m
Zahl der Kontrollprofile	7
Länge der Kontrollprofile	19 km
Richtung der Kontrollprofile	90° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	2000 m
Zahl der Sonderprofile „Referenzstrecke“	8

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Langeoog keine besonderen Ansprüche an den eingesetzten Piloten (M. Schütt) der Fa. Wiking Helikopter Service GmbH, Mariensiel. In dem Messgebiet gab es aber einige Hindernisse, wie Windparks, Hochspannungsleitungen, Radaranlagen und Ortschaften, denen ausgewichen werden musste. Die zum Teil starken Störungen der Messungen, z. B. durch Stromleitungen, Straßen oder über Ortschaften beeinträchtigten die Qualität der Messdaten. Der meist aus Westen kommende Wind führte dazu, dass die Fluggeschwindigkeiten über der Erdoberfläche und somit auch die Messpunktabstände leicht variieren. Bei den Messprofilen nach Norden bzw. Süden liegen die mittleren Punktabstände bei 3,5 m bzw. 3,3 m und bei den Kontrollprofilen nach Osten bzw. Westen bei 4,4 m und 3,3 m.

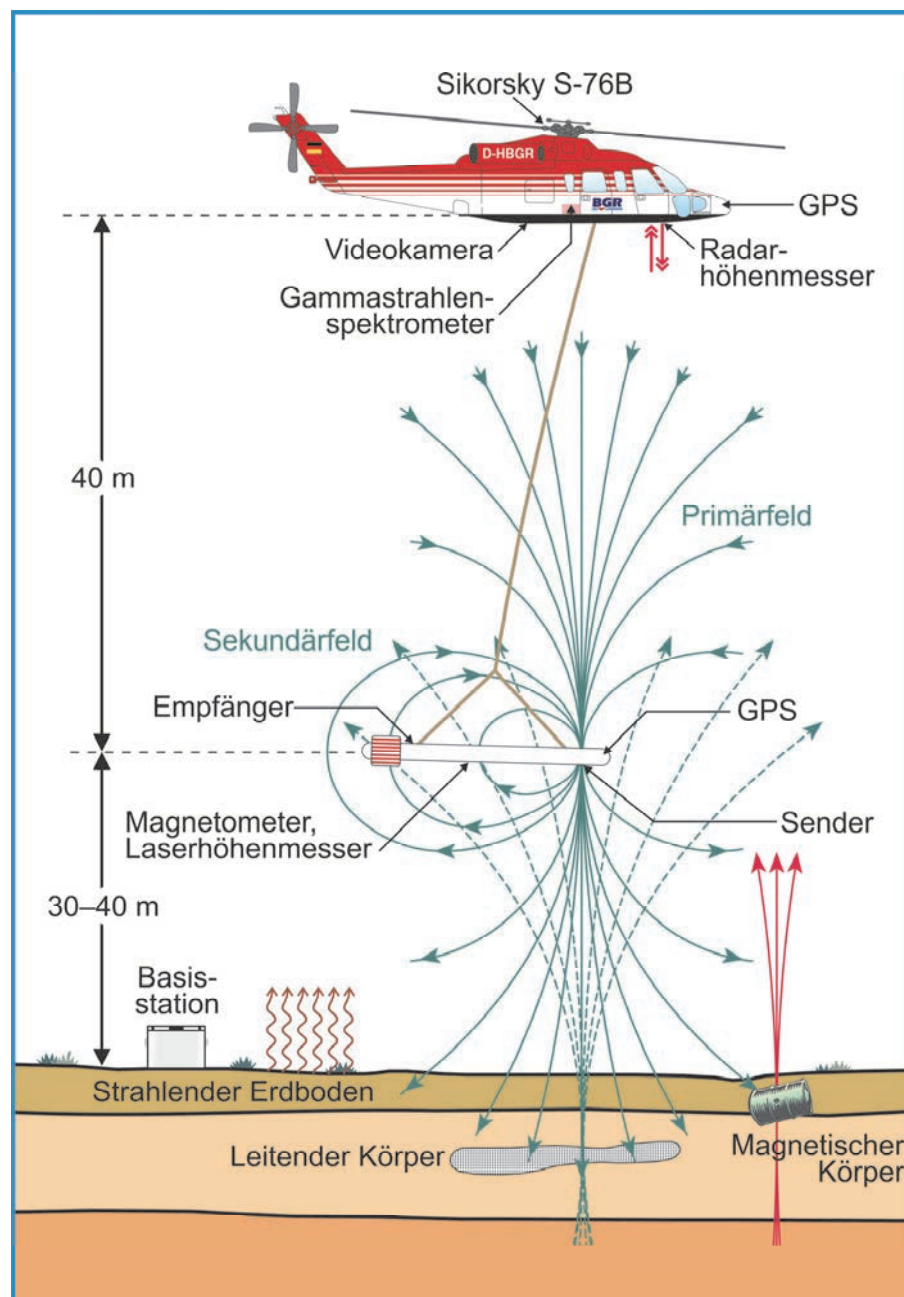
Die Sollflughöhe des Hubschraubers beträgt entlang der Messprofile 70 m über der Erdoberfläche. Über Wald, bebauten Gebieten und Hochspannungsleitungen kann die niedrige Flughöhe aus Sicherheitsgründen nicht immer eingehalten werden. Daher liegt die mittlere Flughöhe der Flugsonde meist oberhalb von 30 m. Bei der Befliegung des Messgebietes Langeoog liegt sie bei etwa 33 m über der Erdoberfläche. Während eines Messfluges, speziell vor dem ersten und nach dem letzten Profil, aber auch zwischen den Profilen, steigt der Hubschrauber mit dem Messsystem auf eine deutlich größere Höhe (>400 m), um fern von störenden Einflüssen die notwendigen Kalibrierungen des HEM-Systems durchführen zu können.

Die Bodenstation zur Aufzeichnung der magnetischen Tagesvariationen wurde auf dem Flughafengelände bei 8,04855° östlicher Länge und 53,50021° nördlicher Breite aufgestellt..



#### 4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR

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



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

#### 4.1. Messhubschrauber

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

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

Hubschrauber	
Typ	Sikorsky S-76B (Hersteller: Sikorsky, USA)
Baujahr	1986
Antrieb	2 Turbinen Pratt & Whitney PT6B-36A mit je 1.033 SHP (shaft horse power)
Maximales Abfluggewicht	11.700 pounds (5.363 kg)
Maximales Gewicht der Außenlast	3.300 pounds (1.500 kg)
Maximale Messflugzeit	2:45 Stunden
Kerosinverbrauch pro Stunde	300–350 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 (**Abb. 3**). Die Länge des Kabels ist so bemessen, dass die Messungen mit den hochempfindlichen Sensoren (Tab. 3) zur Bestimmung der Totalintensität des erdmagnetischen Feldes sowie zur Erfassung der im Untergrund erzeugten elektromagnetischen Felder durch den Hubschrauber möglichst wenig gestört werden. Die äußere Hülle der etwa 10 m langen, zigarrenförmigen Flugsonde, die einen Durchmesser von 0,5 m hat, ist aus Kevlar gefertigt, um eine möglichst hohe Biegesteifigkeit zu erhalten. Dieses Material zeichnet sich durch eine extrem hohe mechanische Festigkeit bei gleichzeitig geringer elektrischer Leitfähigkeit aus.

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

**Tab. 3:** Geophysikalische Messsysteme

Geophysikalische Messsysteme		
Flugsonde	<b>I. Elektromagnetisches 6-Frequenz-Messsystem (HEM)</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes bis zu Tiefen von etwa 150 m
	<b>Hersteller</b>	Fugro Airborne Surveys (FAS), Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Resolve BGR, BKS36a (intern: 61)
	<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 Kristalldetektor: GPX-1024/256

#### 4.3. Elektromagnetik

Bei dem elektromagnetischen (EM) Messverfahren werden von den Sendespulen zeitlich variierende magnetische Felder, die Primärfelder, mit diskreten Sendefrequenzen abgestrahlt. Die magnetischen Felder dringen in den Erduntergrund ein und induzieren dort, abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes, elektrische Wirbelströme. Die magnetischen Felder dieser Wirbelströme, die Sekundärfelder, induzieren ihrerseits sehr schwache Spannungen in den zugeordneten Empfängerspulen des EM-Systems (vgl. **Abb. 3**).

Bei dem hier verwendeten HEM-System wird für jede der sechs Messfrequenzen im Bereich von 386 Hz bis 133 kHz (BKS36a, **Tab. 4**) ein eigenes Spulensystem benutzt, das aus horizontal-koplanar bzw. vertikal-koaxial angeordneten Sende-, Empfangs-, Kompensations- und Kalibrierspulen besteht.

**Tab. 4:** HEM-Systemparameter für BKS36a

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
386	7,938	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.817	7,931	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
5.400	9,055	vertikal-koaxial	EM_6	3. Frequenz
8.372	7,925	horizontal-koplanar	EM_2	4. Frequenz
41.415	7,912	horizontal-koplanar	EM_1	5. Frequenz
133.200	7,918	horizontal-koplanar	EM_4	6. Frequenz

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

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

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

Das HEM-Messsystem ist nicht nur gegenüber dem elektrisch leitenden Untergrund empfindlich, sondern auch gegenüber anthropogenen Objekten, wie z. B. 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 (ca. 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 (**Tab. 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 Deutschland Variationen von etwa 10 bis 20 nT.

Zur Erfassung des magnetischen Tagesganges wird eine ebenfalls mit einem Cs-Magnetometer bestückte Bodenstation betrieben (**Tab. 5**). Sie zeichnet im Regelfall an einem magnetisch ungestörten Ort in der Nähe des Messgebietes die tageszeitlichen Variationen auf, welche zur Korrektur der mit der Flugsonde gemessenen Totalintensität des magnetischen Totalfeldes verwendet werden. Zur zeitlichen Synchronisation der Messreihen wird an der Basisstation die GPS-Zeit mitregistriert.

**Tab. 5:** *Bodenstation*

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

#### 4.5. Radiometrie

Die von natürlichen und künstlichen Radionukliden ausgehende Gammastrahlung wird mit Hilfe eines Kristalldetektors gemessen (**Tab. 3**). Der Detektor besteht aus insgesamt fünf Natriumiodid-Kristallen, die zusammengefasst in einer Aluminiumbox im Hubschrauber montiert sind. Jeder der NaI-Kristalle hat ein Volumen von vier 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. Während der Messung absorbiert jeder der fünf Kristalle die eintretende Gammastrahlung und wandelt sie dabei in Lichtimpulse, d. h. in die sogenannten Szintillationen, um. Die an den Kristallen installierten Fotokathoden reagieren auf diese Lichtimpulse mit der Freisetzung von Elektronen. Durch die Fotovervielfacherröhren werden diese elektrischen Impulse verstärkt, wobei deren Amplitude proportional zur Energie der einfallenden Gammastrahlung ist.

Das Gammastrahlenspektrometer besitzt einen Spektralbereich von 0 bis 3 MeV, der in 255 Kanäle aufgeteilt ist. Jeder Impuls im Detektor wird dem entsprechenden Spektralkanal zugeordnet und gezählt. In einem separaten Kanal erfolgt mit dem nach oben gerichteten Kristall zusätzlich die Registrierung der Intensität der hochenergetischen Strahlung (3 bis 6 MeV). 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. Die Gammastrahlung, die von atmosphärischem Radongas ausgeht, wird mit dem nach oben ausgerichteten Kristall aufgenommen und kann zur Korrektur dieses Einflusses auf die Zählraten von Uran und Thorium verwendet werden. **Tab. 6** zeigt die Zuordnung der Strahlungsquellen zu den einzelnen Kanälen. Die Registrierapparatur des Gammastrahlenspektrometers summiert die Spektren über jeweils ca. eine Sekunde auf und speichert das Ergebnis. Zusätzlich werden die Zählraten in den interessierenden Energiebereichen (vgl. **Tab. 6**) bestimmt. Für die Ermittlung der Gesamtstrahlung addiert die Registrierapparatur die Zählraten der Kanäle 34 bis 233.

Das Spektrometer besitzt für die Fotovervielfacherröhre eines jeden Kristalles eine permanente interne Verstärkungsstabilisierung. Die Grundlage dafür bildet die natürliche Thoriumstrahlung. Verschiebungen des Thoriumpeaks (2,62 MeV) gegenüber dem Sollwert (Kanal 218) werden durch die laufende Kontrolle der Kanäle 202 bis 233 erkannt. Wenn genügend Impulse erfasst worden sind, berechnet die Registrierapparatur automatisch die Position des Thoriumpeaks und korrigiert ggf. die Verstärkung der Fotovervielfacherröhre des entsprechenden Kristalls.

**Tab. 6:** Energiebereiche und Kanalzuordnungen registrierter Strahlungsquellen

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



#### 4.6. Navigations- und Positionierungssystem

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

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

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

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

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

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

Die genaue Höhe der Flugsonde (**Tab. 8**) über der Erdoberfläche wird zur Auswertung der elektromagnetischen Daten und zur Erstellung eines digitalen Geländemodells benötigt. Durch einen in die Flugsonde eingebauten Laserhöhenmesser wird diese Höhe auf  $\pm 0,2$  m genau bestimmt, 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, wie beim Radarhöhenmesser, den Abstand bis zu den Baumkronen.

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

**Tab. 8:** Höhenmesser

Höhenmesser		
Hubschrauber	<b>Radarhöhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über der Erdoberfläche
	<b>Hersteller</b>	Sperry, USA
	<b>Gerätebezeichnung</b>	AA-200
	<b>Barometrischer Höhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über NHN
	<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>	LD90-3800VHS



#### 4.7. Datenerfassung und -aufzeichnung

Die wichtigsten Informationen zur Flugführung und Datenaufzeichnung werden auf zwei Tablet-Computern grafisch dargestellt, um während des Fluges eine ständige Flug- (Navigator) und Datenkontrolle (Operator) zu ermöglichen. Gleichzeitig werden sämtliche Positions- und Messdaten während eines Messfluges digital auf einer Speicherkarte abgelegt (**Tab. 9**). Unmittelbar nach Beendigung eines Fluges werden die gespeicherten Daten auf PC überspielt, geprüft und weiterverarbeitet. Diese digitalen Aufzeichnungen dienen der Kontrolle der Messungen und liefern erste Hinweise auf interessante geophysikalische Ergebnisse, aber auch über evtl. technische Mängel am Messsystem.

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

Datenerfassung / Datenaufzeichnung		
Hubschrauber	Datenerfassungs- und Datenaufzeichnungssystem	
	Aufgabe	Digitalisierung analoger Signale; Zwischenspeicherung digitaler Daten; Zusammenstellung ausgewählter Daten und Speicherung der Positions- und Messdaten auf Speicherkarte
	Hersteller	FAS, Kanada
	Gerätebezeichnung	HeliDAS

#### 4.8. Videosystem

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

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

**Tab. 10:** *Videosystem*

Videosystem		
Hubschrauber	Videosystem	
	Aufgabe	Aufzeichnung des Flugweges sowie Kontrolle der Messsonde bei Start und Landung und während des Messfluges über einen Monitor
	Hersteller	Farbkamera: Sony, Japan Videorekorder: AXI, Schweden
	Gerätebezeichnung	Farbkamera: DC372P Videoserver: AXIS 241S

#### 4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber

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

**Tab. 11:** *Sonstige Ausrüstung*

Sonstige Ausrüstung		
Hubschrauber	<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, Magnetik und Radiometrie wird – je nach Anforderung – in verschiedenen Auswertungsebenen (Level) durchgeführt. **Tab. 12** zeigt diese Auswertungsebenen in der Übersicht für die Elektromagnetik.

**Tab. 12:** Auswertungsebenen für die HEM

Level	Bezeichnung	Umfang	Details	Produkte
1	Befliegung	Datenerfassung und Feldprozessierung	Daten- und Qualitätskontrolle automatische Prozessierung	HEM-Daten und Halbraumparame- terkarten
2	Standard- auswertung	Feinprozessierung	Niveauekorrektur (Stützstellen, Statistik, 2D-Filterung), auto- matische 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 interaktive 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 definier- ten Schnittstellen bzw. ge- meinsamen Modellraum	3D-Modelle (HEM- plus geo- logische bzw. Grundwasser- modelle)
5	Nutzerorien- tierte Para- metrisierung	Interpretation der elektrischen Leitfähig- keit bzgl. hydro-/geo- logischen 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 (Level) 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 werden bereits während des Feldbetriebes auf Plausibilität sowie technische und formale Korrektheit überprüft. Hierzu werden die Messdaten direkt nach Beendigung eines Messfluges von der Speicherkarte auf PC oder Laptop übertragen, mittels Oasis montaj von Geosoft visualisiert und erste Datenverarbeitungsschritte automatisch durchgeführt.

Nach Abschluss der Befliegung erfolgt zunächst eine Präprozessierung, die nur wenige grundlegende Bearbeitungsschritte enthält und die Rohdaten grafisch darstellt.

Die finale Datenbearbeitung beginnt mit der Bearbeitung der Positionsdaten:

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

Die folgenden Datenverarbeitungsschritte sind für alle Methoden gültig:

- Entfernung von offensichtlichen Ausreißern (Spikes);
- Digitale Filterung um hochfrequentes Rauschen zu unterdrücken;
- Umrechnung der Messdaten in die jeweiligen darzustellenden Parameter;
- Festlegung von Profilabgrenzungen 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

### 5.2.1. GPS-Koordinaten

Die im Fluge registrierten Koordinaten, die die Positionen des Hubschraubers und der Flugsonde angeben, beziehen sich auf das WGS84-System. Diese geografischen Koordinaten werden mittels Oasis montaj für die Flugsondenposition in ein lokales, kartesisches Koordinatensystem transformiert, wobei auch fehlende Koordinatenwerte durch lineare Interpolation ergänzt werden.

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

Da beim aerogeophysikalischen Messsystem der BGR alle relevanten Positionsparameter des Hubschraubers während eines Fluges aufgezeichnet werden, ist eine nachträgliche Verbesserung der Lageparameter möglich. Zur Genauigkeitssteigerung der Positionen wird mithilfe der Applikation CSRS, einem Service von Natural Resources Canada, eine Bearbeitung durchgeführt, bei der die Lagefehler für die drei Raumachsen im erdfesten System im Allgemeinen auf Werte <0,3 m minimiert werden können. Um diesen Dienst nutzen zu können, müssen die gemessenen GPS-Daten in das RINEX-Format konvertiert werden. Die korrigierten GPS-Daten können dann, nach Synchronisation

mit den Oasis-Daten und ggf. Interpolation mit Oasis montaj, wieder in das lokale Koordinatensystem transformiert werden.

Die korrigierten GPS-Daten des Hubschraubers (genauer: der GPS-Antenne) können auch genutzt werden, um zu der jeweiligen geografischen Breite und Länge (in Dezimalgrad) die zugehörige ellipsoidische Höhe im ETRS89-System, die berechnete Normalhöhe  $H^N$  (altes NN) im System DHHN92 sowie die Geoidundulation oder Quasigeoidhöhe zu berechnen. Hierzu wird ein Programm zur Berechnung der Normalhöhen für Deutschland zusammen mit einem Quasigeoidmodell (GCG2011) verwendet, das der BGR vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie zur Verfügung gestellt worden ist.

Für die Flugsonde stehen nicht alle GPS-Parameter, die für die oben beschriebene Korrektur notwendig sind, zur Verfügung. Daher konnte lediglich ein fehlerhafter Bezugswert korrigiert werden, um die Höhe der Flugsonde zu anzupassen.

Aus der Differenz der GPS-Höhen des Hubschraubers ( $H_{GPS}$ ) und der Flugsonde ( $h_{GPS}$ ) wird die effektive Kabellänge ( $c_l$ ) berechnet:

$$c_l [m] = H_{GPS} [m \text{ NHN}] - h_{GPS} [m \text{ NHN}].$$

Im Mittel lag die effektive Kabellänge im Messgebiet Langeoog bei  $c_l = 41,50 \text{ m}$ .

### 5.2.2. Radarhöhen

Die Radarhöhenwerte, die vom Hubschrauber aus gemessen werden, liegen zunächst in der Einheit „feet“ vor und müssen in Meter über Gelände (m üG) umgerechnet werden. Zum Vergleich mit der Laserhöhe wird die Radarhöhe der Flugsonde benötigt. Hierzu wird die effektive Kabellänge abgezogen:

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

wobei fehlende Radarhöhen durch Laserhöhen ersetzt werden.

Bei der Befliegung Langeoog traten Probleme bei der Registrierung der Radarhöhen auf. Bei den Flügen 12804 bis 12806 war der analoge Eingang für das Radarsignal im HeliDAS ausgefallen, sodass die Werte für Radarhöhen komplett durch die Laserhöhen ersetzt werden mussten.

### 5.2.3. Laserhöhen

Die mit einem Laserhöhenmesser gemessenen Höhen der Flugsonde über Gelände können – wie auch die Radarhöhe – Fehler (Ausreißer, Lücken) enthalten, die linear interpoliert werden. Ferner können zu große Werte (z. B. Neigung oder seitliche Auslenkung der Flugsonde) oder zu kleine Werte (Bewuchs, Bebauung) auftreten.

Die zu kleinen Werte werden standardmäßig durch eine Kombination von Filtern korrigiert. Hierzu wird zunächst eine reduzierte Laserhöhe ( $\Delta h_l$ ), deren Mittelwert bei Null liegt, berechnet, indem eine Basislinie der Laserhöhe bestimmt (Tiefpass-Abschneideperiode = 5 s, d. h. 50 Werte) und von dieser abgezogen wird. Danach erfolgt die Berechnung der Standardabweichungen ( $\Delta h_{l_{\text{noise}}}$ ) und der Maximalwerte ( $\Delta h_{l_{\text{max}}}$ ) der reduzierten Laserhöhe in vorgegebenen Intervallen mit Fensterbreiten von jeweils 7 bzw. 21 Messwerten, wobei einzelne Ausreißer der Standardabweichung durch Anwen-

derung eines schmalen (3 Werte) nicht-linearen Filters eliminiert werden. Anschließend werden die Laserhöhenwerte durch die Maximalwerte ersetzt, falls die Abweichung beider Werte nicht zu groß (2 m) ist und die Standardabweichung über einem vorzugebenden Schwellwert (0,4) liegt. Zur Vermeidung von Sprüngen der gegenüber den reduzierten Laserhöhen stets größeren Maximalwerte werden die Maximalwerte auf das Niveau der angrenzenden reduzierten Laserhöhen bezogen. Abschließend erfolgt eine leichte Glättung (Tiefpass-Abschneideperiode = 3 s, d. h. 30 Werte) der korrigierten reduzierten Laserhöhe ( $\Delta h_{l_{kor}}$ ) und die Addition der Basislinie, um die korrigierte Laserhöhe ( $h_{l_{kor}}$ ) zu erhalten. **Tab. 13** fasst die verwendeten Filterparameter zusammen.

**Tab. 13:** Filterparameter für die Korrektur der Laserhöhe in Bereichen mit Vegetation

Filter	Filterparameter	Bezugsparameter
Tiefpass	Abschneideperiode: 5 s ( $\approx 200$ m)	$h_l$
Nicht-linear	Filterlänge: 1 Wert ( $\approx 4$ m), Toleranz: 1.0	$\Delta h_l$
Standardabweichung	Filterlänge: 7 Werte ( $\approx 28$ m)	$\Delta h_l$
Nicht-linear	Filterlänge: 3 Werte ( $\approx 12$ m), Toleranz: 1.0	$\Delta h_{l_{noise}}$
Tiefpass	Abschneideperiode: 1 s ( $\approx 40$ m)	$\Delta h_{l_{noise}}$
Nicht-linear	Filterlänge: 1 Wert ( $\approx 4$ m), Toleranz: 2.0	$\Delta h_l$
Schwellwert	Schwellwert ( $\Delta h_{l_{noise}}$ ): 0,4 m	$\Delta h_l$
Maximum	Filterlänge: 21 Werte ( $\approx 84$ m)	$\Delta h_l$
Schwellwert	Schwellwert ( $\Delta h_{l_{max}} - \Delta h_l$ ): 2 m	$\Delta h_l$
Tiefpass	Abschneideperiode: 3 s ( $\approx 120$ m)	$\Delta h_{l_{kor}}$

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

Die zu großen, durch die Neigung der Flugsonde (durchschnittlich etwa  $10^\circ$ ) verursachten Laserhöhen sind leicht durch Anwendung der Kosinusfunktion zu korrigieren. Laserhöhenfehler in Kurven können aufgrund der zu großen Abweichung von der zugehörigen Radarhöhe erkannt und ggf. eliminiert werden. Schwieriger ist es jedoch, die Fehler, die durch Pendelbewegungen verursacht sind, zu reduzieren.

Im relativ ebenen Messgebiet Langeoog wurden die Laserhöhenfehler der Flugsonde korrigiert, indem die Laserhöhe ( $h_l$ ) mit den Differenzen von der GPS-Höhe der Flugsonde ( $h_{GPS}$ ) und einem Geländemodell (DGM25) abgeglichen und gegebenenfalls korrigiert wurde. Verbliebene Fehler wurden per Hand nachkorrigiert.

Bei den Flügen 12810 und 12811 ist die Aufzeichnung der Laserhöhe teilweise bzw. ganz ausgefallen; hier wurde sie durch die Radarhöhe ersetzt.

#### 5.2.4. Topografische Höhen

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

$$\text{topo [m NHN]} = h_{\text{GPS [m NHN]}} - h_{\text{Lkor [m]}}.$$

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

Wie bei den geophysikalischen Daten ist auch bei den topografischen Daten eine Anpassung der Profildaten untereinander notwendig. Die Ursache hierfür ist die Ungenauigkeit der GPS-Höhendaten. Zunächst können die topografischen Höhen auf Basis der Messwerte über der Referenzstrecke flugweise korrigiert werden, wobei die topografischen Höhen eines Fluges um einen konstanten Wert verschoben werden, sodass die mittlere topografische Höhe entlang der Referenzstrecke des jeweiligen Fluges mit der wahren Höhe der Referenzstrecke übereinstimmt. Besser ist es jedoch, ein digitales Geländemodell (DGM25) zu nutzen, um die berechneten topographischen Höhen anzupassen. Danach kann ähnlich zu **Abschnitt 5.3.6** ein Microlevelling erfolgen.

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

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

### 5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik

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

- Berücksichtigung der Kalibrierung;
- Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur;
- Datenkorrektur;
- Korrektur von anthropogenen Effekten;
- 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 und im Zuge der Datenverarbeitung eliminiert oder geglättet werden müssen.

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

Diese grundlegenden wie auch die nachfolgenden Datenverarbeitungsschritte wurden zunächst mit Geosoft Oasis montaj durchgeführt. Die in dieser Programmumgebung entwickelten Routinen wurden anschließend in eine eigene Software (EM\_view) übertragen und durch weitere Routinen ergänzt. Alle notwendigen Parameter sind in Konfigurationsdateien abgelegt.

### 5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems

Das HEM-System wurde von dem Hersteller Fugro Airborne Surveys mit Hilfe von externen Spulen auf schlecht leitendem Untergrund in Kanada (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. Da Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht auszuschließen sind, wurden die Kalibrierfaktoren mit einem Flug über die Nordsee vor Helgoland im Februar 2009 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  $\rho_w = 0,29 \Omega\text{m}$  (bei einer Wassertemperatur von etwa  $4^\circ\text{C}$ ) und der Laserhöhe, verglichen.

Die Befliegung des Messgebietes Langeoog bot die Möglichkeit, bei jedem Messflug auch über tieferes Meerwasser nördlich der Insel zu fliegen, um für eine evtl. Korrektur die über diesen Flächen berechneten spezifischen Widerstände an den spezifischen Widerstand von Meerwasser anzupassen. Zunächst jedoch wurden die Korrekturen für die Kalibrierwerte verwendet, die über der Nordsee vor Helgoland bestimmt wurden (Tab. 14).



**Tab. 14:** Kalibrierwerte für das HEM-System (BKS36a)

Frequenz in Hz	Kalibrierwerte FAS		Kalibrierwerte BGR	
	I [ppm]	Q [ppm]	I [ppm]	Q [ppm]
386	-205,3	-205,3	-209,8	-210,8
1.817	-175,4	-174,7	-174,7	-174,3
5.400	76,6	76,8	81,9	81,2
8.372	-144,4	-144,2	-209,4	-189,8
41.415	-667,3	-665,2	-657,4	-664,9
133.200	-1404,2	-1406,4	-685,5	-911,0

Zu Beginn eines Messfluges werden in großer Flughöhe die durch die internen Kalibrierspulen hervorgerufenen Ausschläge überprüft und das Messsystem wird automatisch anhand von Sollwerten nachjustiert. Temperaturänderungen während des Fluges haben Einfluss auf die Messelektronik. Daher werden die internen Kalibrierspulen mehrmals während eines Messfluges eingeschaltet, um Phasenlagen und Verstärkungen der zugehörigen Ausschläge für alle Frequenzen zu kontrollieren. Diese in großer Flughöhe mehrmals aufgezeichneten Signale werden automatisch bei der Datenverarbeitung in den Messdaten erkannt. Aus dem Vergleich der Amplituden und Phasen der Messdaten mit den Erwartungswerten erhält man für jede Messfrequenz kleine Korrekturen, die – über den gesamten Flug stark geglättet – an die Rohdaten angebracht werden können.

Anstelle des Standardverfahrens wurde in diesem Messgebiet ein neues Verfahren angewendet, das eine iterative Amplituden- und Phasenkorrektur ermöglicht. Zunächst wurden in EM\_view die Phasen und auch die Amplituden der höchsten Frequenz modifiziert, sodass plausible Werte über tieferem Wasser nördlich von Langeoog und auch in wasserführenden Bereichen im Wattenmeer erzielt werden konnten. Anschließend wurde, ebenfalls in EM\_view, manuell für alle Frequenzen eines jeden Fluges oder Teilen davon eine individuelle Phasen- und Amplitudenkorrektur durchgeführt, bis die Unterschiede der Halbraumparameter an den Kreuzungspunkten von Mess- und Kontrollprofilen minimal wurden. Diese Korrekturwerte sind in den Konfigurationsdateien abgelegt.

### 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 Flughöhen >350 m, da in diesen Höhen das Sekundärfeld weitgehend abgeklungen ist. In den Bereichen mit großer Flughöhe und möglichst ruhigem Messsignalverlauf werden so genannte Stützstellen gesetzt, an denen Messwerte erfasst werden, die das Nullniveau repräsentieren. Die Interpolationsgeraden zwischen jeweils benachbarten Stützstellen liefern die Bezugsniveaus, von denen aus die Messamplituden der Sekundärfelder zu bestimmen sind. Die Nullniveaubestimmung wird für jeden Messkanal (I und Q für sechs Frequenzen) durchgeführt.

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

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

### 5.3.3. Datenkorrektur

Störungen, die durch externe EM-Signale hervorgerufen werden (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen, Sferics, Ortschaften, Bahnlinien), werden durch geeignete Filterung bzw. Elimination unterdrückt. Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen elektrischen Installationen beruhen, werden für das Microlevelling manuell aus den Daten entfernt (vgl. **Abschnitt 5.3.5**). Unterschreitet ein Amplitudenwert den relativen Standardfehler (rel. STF) der Messamplituden (I und Q) in einem Intervall um diesen Messwert (**Tab. 15**), so wird dieser Wert eliminiert und später auf Basis der in der Fläche interpolierten Halbraumparameter neu berechnet (vgl. **Abschnitt 5.3.7**). Zur Unterdrückung von Ausreißern werden nicht-lineare (NL) Filter benutzt und zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die HEM-Daten anschließend mit einer Spline-Funktion geglättet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität sind unterschiedliche Filterparameter für die Daten der jeweiligen Frequenzen erforderlich (**Tab. 15**).

**Tab. 15:** Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung

Frequenz [Hz]	STF [Werte]	Schwellwert für rel. STF	NL-Filter Werte/Toleranz	Spline Glätte/Spannung
386	30	0,05 / 0,03	10 / 3,0	0,70 / 0,5
1.817	30	0,03	10 / 3,0	0,70 / 0,5
5.400	30	0,03	10 / 3,0	0,66 / 0,5
8.372	30	0,03	10 / 3,0	0,65 / 0,5
41.415	30	0,03	10 / 3,0	0,65 / 0,5
133.200	30	0,02	10 / 3,0	0,65 / 0,5

#### 5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter

Das relative magnetische Sekundärfeld  $Z = (I, Q)$  für eine horizontal-koplanare (HCP) Spulenanordnung mit einem Spulenabstand  $r$ , einer Sensorhöhe  $h$  und einer Messfrequenz  $f$  lautet (z. B. Ward & Hohmann, 1988):

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

wobei  $\alpha_0^2 = \lambda^2 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0$  mit  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ ,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$  und  $\rho_0 > 10^8 \Omega\text{m}$ ;  $J_0$  ist eine Bessel-Funktion der ersten Art und nullten Ordnung, und  $R_1$  ist der komplexe Reflexionsfaktor, der die Materialparameter (spezifischer Widerstand  $\rho$ , magnetische Permeabilität  $\mu$  und dielektrische Permittivität  $\epsilon$ ) 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, wird das Integral mittels partieller Integration gelöst (Siemon, 2012). Eine ähnliche Formel besteht für die vertikal-koaxiale Spulenanordnung (VCX), die auf kleine Sekundärfelder führt ( $\text{VCX} \approx -0,25 \cdot \text{HCP}$ ). Nach Weidelt (1991) lässt sich der Reflexionsfaktor  $R_1$  für einen Halbraum mit  $N_L$  Schichten rekursiv berechnen:

$$R_1 = \frac{B_1 - \alpha_0 \mu / \mu_0}{B_1 + \alpha_0 \mu / \mu_0}$$

mit

$$B_n = \alpha_n \frac{B_{n+1} + \alpha_n \tanh(\alpha_n d_n)}{\alpha_n + B_{n+1} \tanh(\alpha_n d_n)} \quad n = 1, 2, \dots, N_L - 1 \quad \text{und} \quad B_{N_L} = \alpha_{N_L}$$

$$\alpha_n = \sqrt{\lambda^2 - \omega^2 \epsilon_n \mu_n + i\omega \mu_n / \rho_n} \quad n = 1, 2, \dots, N_L$$

wobei  $\rho_n$ ,  $\mu_n$ ,  $\epsilon_n$  und  $d_n$  spezifischer Widerstand, Permeabilität, Permittivität und Mächtigkeit der  $n$ -ten Schicht ( $d_{N_L}$  wird als unendlich angenommen) sind. Wenn die magnetischen Effekte und die Verschiebungsströme vernachlässigbar sind, d. h.  $\mu_n = \mu_0$  und  $\epsilon_n = \epsilon_0$ , werden nur die spezifischen Widerstände und die Mächtigkeiten berücksichtigt.

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

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

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

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

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  $\delta_p(\epsilon)$ , an die Polynome angepasst wurden, können die Halbraumparameter für die Messwerte  $I$  und  $Q$  abgeleitet werden:

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

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

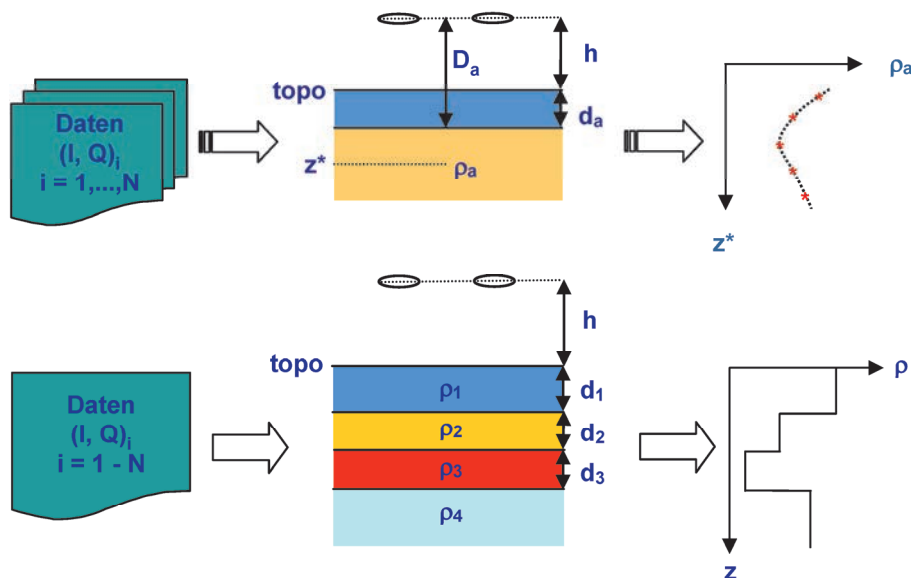
$$d_a = D_a - h$$

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 (**Abb. 4**).



**Abb. 4:** Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen (oben) und geschichteten (unten) Halbräumen

Die berechneten Halbraumparameter werden vor der Weiterverarbeitung auf Plausibilität überprüft, d. h. bei zu großen Flughöhen ( $h > 100$  m) und extremen Werten ( $\rho_a > 1000 \Omega\text{m}$ ,  $d_a > 100$  m) werden die Halbraumparameter gelöscht.

Abweichend von diesem bei Siemon (2001) beschriebenen Verfahren wurde hier eine genauere Ausbreitung der elektromagnetischen Felder berücksichtigt und für jede Messfrequenz eigene Polynomkoeffizienten für die Funktionen  $A'(\delta_p)$  und  $\delta_p(\epsilon)$  bestimmt (Siemon, 2012). Es ergaben sich im All-

gemeinen nur geringfügige Änderungen, vor allem bei den beiden höchsten Frequenzen. Über sehr gut leitenden Untergrund (Salzwasser) sind die Abweichungen insbesondere für die Q-Komponente der sekundären Magnetfelder jedoch erheblich, sodass die Neuberechnung der Polynomkoeffizienten notwendig war.

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

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

Der anthropogene Einfluss wirkt sich durch eine Verringerung des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunktstiefe aus. In den Karten 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.

Die Erkennung von anthropogen beeinflussten HEM-Daten ist durch deren typische Form oder durch Korrelation mit den Magnetikdaten möglich. Die Identifizierung kann durch einen Vergleich mit topografischen Karten, Luftbildern, einer Videofilmauswertung oder einer Ortsbegehung erfolgen.

Die Entfernung der anthropogen betroffenen Bereiche erfolgte rein manuell. Mit Hilfe von topografischen Karten und Google Maps wurden Hochspannungsleitungen, Windparks, Eisenbahnschienen und teilweise größere Häuseransammlungen (z.B. die Ortschaft Langeoog) identifiziert und entsprechende Bereiche in den Daten gelöscht.

Die dadurch entstandenen Datenlücken wurden durch das flächenhafte Interpolieren der Halbraumparameter größtenteils geschlossen.

#### **5.3.6. Statistische Niveaueinpassung**

Im Messgebiet Langeoog war die herkömmliche Niveaueinpassung (nach **Abschnitt 5.3.2**) nicht ausreichend, da aufgrund der Überfliegung von Ortschaften, Hochspannungsleitungen, Windparks, Radarstationen und Wäldern barometrische Höhenänderungen und folglich auch spürbare Temperaturschwankungen auf das Messsystem und somit auf das Nullniveau einwirkten. Die Nivellierung der logarithmierten Halbraumwiderstände und der scheinbaren Tiefen parallel zu den Messprofilen (Microlevelling) wird mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft vorgenommen.

Das Microlevelling basiert auf dem Gitter der Messprofilaten, in welchem Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpassfilters (Grenzwellenlänge 1000 m, Ordnung 8) und eines direktionalen Kosinusfilters (Azimut 0°, Grad 2) identifiziert werden. Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Niveaufehlerwerte liefert. Die abgetasteten Fehlerwerte werden mit einem Spline-Filter (Glätte 1,0, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den ursprünglichen Halbraumparametern abgezogen.

Die Kontrollprofile werden nivelliert, indem die stark geglätteten Differenzen aus den entlang der Kontrollprofile abgetasteten Halbraumparametern der Messprofile und den Halbraumparametern der Kontrollprofile von Letzteren abgezogen werden.

Da bei diesem Verfahren aufgrund der lateralen Filterung der Halbraumparametergitter normalerweise lokale Anomalien geglättet werden, was das gewünschte Ergebnis verfälschen kann, wurden diese Anomalien zuvor (wie in **Abschnitt 5.3.5** beschrieben) entfernt.

Aus den stark geglätteten Differenzen der originären HEM-Daten (I und Q) und der aus den nivellierten Halbraumparametern rückgerechneten HEM-Daten ( $I_c$  und  $Q_c$ ) werden abschließend die variablen Korrekturwerte für jedes Mess- und Kontrollprofilprofil abgeleitet (Siemon, 2009). Hierzu werden Bereiche ausgewählt, in denen die Datenfehler ( $I_{noise}$  und  $Q_{noise}$ ) klein genug sind. Auch die anthropogen beeinflussten Bereiche werden entfernt. Diese verbliebenen Differenzen ( $\Delta I = I - I_c$  und  $\Delta Q = Q - Q_c$ ) werden nicht-linear gefiltert, geglättet und von den originären HEM-Daten (I und Q) abgezogen. Die Filterparameter für die Bereichsauswahl und Glättung sind in **Tab. 16** aufgelistet.

**Tab. 16:** Filterparameter für die HEM-Niveaurektur

Filter	Filterparameters	Bezugsparameter
Schwellwert	Schwellwert: 300 m	( $h_{I_{kor}}$ )
Schwellwert	Schwellwert: 0,02-0,05	( $I_{noise}$ , $Q_{noise}$ )
Nicht-linear	Filterlänge: 50 Werte ( $\approx 200$ m), Toleranz: 10,0	$\Delta I$ , $\Delta Q$
Spline	Glätte: 0,85-0,90; Spannung: 0,2	$\Delta I$ , $\Delta Q$

### 5.3.7. Dateninterpolation und -glättung

Die Lücken in den HEM-Daten, die durch die Eliminierung von Daten, deren relative Rauschniveaus über einem Schwellwert lagen, bzw. durch die Berücksichtigung der anthropogenen Effekte entstanden sind, werden durch flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter mit nachfolgender Neuberechnung der relativen Sekundärfelder geschlossen. Die relativen Rauschniveaus werden jeweils aus 30 benachbarten Werten bestimmt und auf die (Modell-) Amplituden normiert. Abschließend werden die korrigierten Daten analog zu **Abschnitt 5.3.3** gefiltert, aber evtl. mit leicht modifizierten Filterparametern. Somit liegen als finale Daten, die in die Inversion (vgl. **Abschnitt 5.3.8**) eingehen, korrigierte (nivellierte, interpolierte und geglättete) Messwerte an den Messpunkten für jede Messfrequenz vor.



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

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

Die prozessierten HEM-Daten zu allen Messfrequenzen werden in die Parameter eines geschichteten Halbraums, spezifischer Widerstand und Mächtigkeit, invertiert. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig. Dieses Startmodell wird automatisch aus den  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet. Standardmäßig wird das Startmodell aus ebenso vielen Schichten aufgebaut wie Messfrequenzen vorhanden sind, wobei die Schichtwiderstände auf die scheinbaren spezifischen Widerstände und die Schichtgrenzen auf das logarithmische Mittel zweier benachbarter Schwerpunktstiefen gesetzt werden. Alternativ kann das Startmodell auch eine frequenzunabhängige Anzahl von Schichten besitzen. Hierzu wird die interpolierte Sondierungskurve in Schichten unterteilt, die 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.

Für die Inversion der HEM-Daten im Messgebiet Langeoog wurden nivellierte Daten (vgl. **Abschnitt 5.3.6**) und ein Startmodell mit sechs Schichten ansteigender Mächtigkeiten inklusive einer variabel mächtigen Deckschicht verwendet. Da die Daten der dritten Messfrequenz (5.400 Hz) mit einem vertikal-koaxialen Spulensystem erfasst werden, das empfindlich gegenüber steil stehenden Leitfähigkeitsstrukturen (aber auch gegenüber externen Quellen) ist, während alle anderen Frequenzen horizontal-koplanare Systeme verwenden, die empfindlich für die lateralen Leitfähigkeitsstrukturen sind, wurden diese Daten für die Inversion nicht benutzt.

Im Messgebiet Langeoog sind viele Datenbereiche aufgrund der anthropogenen Störungen interpoliert worden. Die Inversionsergebnisse in diesen Bereichen sind daher mit Vorsicht zu betrachten. Des Weiteren sind die Amplituden der niedrigen Frequenzen gelegentlich sehr klein, da der Untergrund in einigen Bereichen relativ hohe spezifische Widerstände aufweist. Daher können auch sehr kleine Niveauunterschiede in den Daten eine große Wirkung haben und zu unsicheren Werten, insbesondere für die unterste Modellschicht, führen.

### 5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten (siehe **Anhang IV**) und Vertikalschnitte (siehe **Anhang V**) präsentiert. Karten (vgl. **Abschnitt 6**) im Maßstab von 1:50.000 wurden für die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand  $\rho_a$  (in  $\Omega\text{m}$ ) und Schwerpunktstiefe  $z^*$  (in m unter GOK) für sechs Messfrequenzen und die spezifischen Widerstände  $\rho$  (in  $\Omega\text{m}$ ) in zehn Tiefen (0–60 m unter NHN), abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen, produziert.



Die für die Produktion der Karten der Halbraumparameter verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte dargestellt. Die weißen Punkte markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind.

In den Tiefenschnitten ab 40 m unter NHN treten in Bereichen hoher Leitfähigkeit Lücken in den Widerstandskarten auf, da dort aufgrund der geringen Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder keine verlässlichen Informationen über die Höhe des spezifischen Widerstandes abgeleitet werden konnten. Außerdem wurden Bereiche mit großen Flughöhen (> 100 m) als nicht glaubwürdig eingestuft und entfernt, sodass in diesen Karten nur Areale dargestellt werden, in denen die Anzahl der Modelle ausreichend für eine flächenhafte Darstellung ist.

Graue Linien markieren die Bereiche mit Lücken im Modell, die im Gitter interpoliert wurden. Die weißen Punkte markieren wieder Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind. Diese Punkte sind umso dicker, je mehr Frequenzen betroffen sind.

Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:50.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:2.500 wurden basierend auf den 1D-Inversionsergebnissen von jedem der 68 Messprofile und der 7 Kontrollprofile hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen Modellen mit sechs Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topografischen Höhe längs eines Profils nebeneinandergestellt werden. Die Modelloberkante liegt in der Regel unterhalb der wahren Geländehöhe, da die oberste Bodenschicht, insbesondere wenn sie dünn oder relativ trocken ist, bei der Inversion der Luftschicht zugeordnet wird, die nicht farblich dargestellt wird. Die Mächtigkeit der untersten Schicht (Substratum) wird in Abhängigkeit vom spezifischen Widerstand dieser Schicht berechnet, beträgt aber mindestens 0,5 m. Bei geringen Widerstandskontrasten verschwindet die Bedeutung der Schichtgrenzen, sodass Schichtmächtigkeiten auch zu groß oder verschwindend klein werden können. Dies kann dazu führen, dass die dargestellten Widerstandssäulen in relativ homogenen Bereichen stark variieren können. Über den Modellen sind zusätzlich die Höhe der Flugsonde, der Anpassungsfehler der Inversion und die Messdaten dargestellt, die in einer Legende erklärt werden.

## 5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik

Die Datenverarbeitung in der Magnetik erfolgte mit den unkorrigierten Positionsdaten, die der GPS-Empfänger in der Messsonde während des Fluges registrierte. Eventuell vorhandene Lücken in der Datenaufzeichnung wurden durch Interpolation geschlossen. Die Abweichungen zwischen den GPS-Höhen und den korrigierten Höhen laut **Abschnitt 5.2.4** sind relativ gering. Untersuchungen für die Messungen in Langeoog ergaben, dass diese Höhenunterschiede nur einen sehr geringen Einfluss (maximal 1%) auf die berechneten magnetischen Anomalien haben. Die Längen der einzelnen Profile entsprechen den für die Auswertung der Hubschrauberelektromagnetik festgelegten optimalen Bereichen.

### 5.4.1. Magnetisches Totalfeld

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

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

mit

- $F(r)$  = magnetisches Hauptfeld (IGRF = International Geomagnetic Reference Field),
- $\Delta T(r)$  = anomaler, lokaler Anteil des erdmagnetischen Feldes im Messgebiet,
- $\Delta V(t)$  = Tagesvariation des erdmagnetischen Feldes während der Messung,
- $\delta(r,t)$  = sonstige Anteile (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. Sie überlagern die Anomalien  $\Delta T(r)$ , d. h. in den abgeleiteten  $\Delta T$ -Werten sind sowohl die gesuchten geogenen als auch die störenden anthropogenen Anteile enthalten, deren Quellen (z. B. Gebäude) sich meist an der Erdoberfläche befinden.

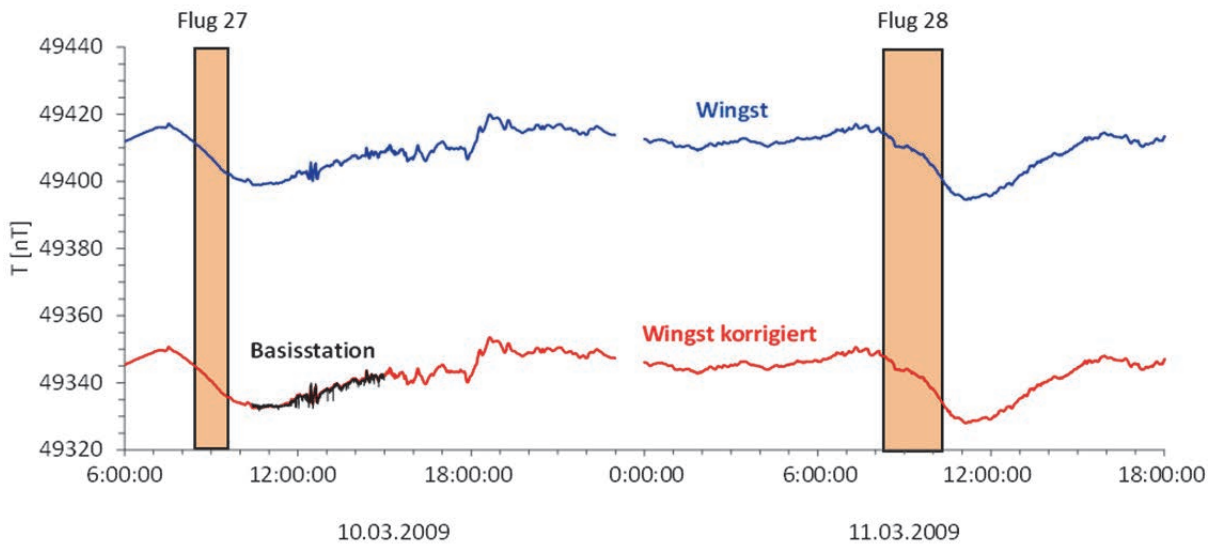
#### **5.4.2. Berechnung des IGRF**

Für die Bestimmung der Anomalien der Totalintensität des erdmagnetischen Feldes ( $\Delta T$ ) wird das alle fünf Jahre von der IAGA (1992) in Kugelfunktionsdarstellung zur Verfügung gestellte „International Geomagnetic Reference Field“ (IGRF) verwendet, mit dem für jeden Punkt auf und oberhalb der Erdoberfläche und für einen bestimmten Zeitpunkt ein Feldwert berechnet werden kann. Das aktuell gültige Modell IGRF-11 aus dem Jahr 2010 (IAGA, 2010) diente zur Berechnung des magnetischen Hauptfeldes an jedem Messpunkt zur entsprechenden Messzeit.

#### **5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen**

Die Referenzstation zur Erfassung der magnetischen Tagesvariationen  $\Delta V(t)$  befand sich auf dem JadeWeserAirport (EDWI).  $\Delta V(t)$  ergibt sich aus dem Messwert der Bodenstation abzüglich des IGRF-Feldes am Ort der Bodenstation und zum Zeitpunkt der Messung. Kurzzeitige Störeinflüsse in den Daten der Bodenstation könnten durch die Anwendung eines Tiefpassfilters beseitigt werden. Da allerdings ein Großteil der erfassten Werte von starken Störsignalen überlagert war und zahlreiche, länger andauernde Aussetzer in den Zeitreihen enthalten waren, wurde stattdessen auf die Daten des ca. 100 km vom Messgebiet entfernten Erdmagnetischen Observatoriums Wingst zurückgegriffen. Das Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) als Betreiber dieses Observatoriums stellt die Messdaten über INTERMAGNET ([www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)) bereit.

Die Werte des Observatoriums Wingst konnten erst nach der Korrektur des zeitlichen Versatzes von 30 s und des Niveauversatzes der Messdaten von 66,5 nT in die Berechnungen einfließen (Abb. 5).



**Abb. 5:** Anpassung der Observatoriumsdaten an das Niveau der Bodenstationsdaten

#### 5.4.4. Statistische Niveauanpassung

Nach Abzug des Hauptfeldes und der Tagesvariationen von den gemessenen magnetischen Werten erfolgt eine statistische Niveauanpassung. Dazu werden die Differenzen zwischen den magnetischen Anomalien der Mess- und Kontrollprofile an den Kreuzungspunkten berechnet und profilweise gemittelt (Kreuzungspunktstatistik). Die gemittelten Werte definieren demzufolge die Niveauunterschiede zwischen den Profilen und stellen somit gleichzeitig die Korrekturwerte für die statistische Niveauanpassung dar. Abweichungen im Niveau der Daten können immer dann auftreten, wenn sich während der Kampagne Änderungen in der Konfiguration der Sensoren von der Bodenstation oder der Flugsonde ergeben haben.

Verbleibende, meist geringe Niveauunterschiede können, abhängig von der Flugrichtung, von dem Eigenfeld des Hubschraubers hervorgerufen werden (heading error). Diese Unterschiede minimieren sich durch das nachfolgende Microlevelling deutlich. Das Microlevelling basiert auf dem Gitter der Messprofilaten, in welchem Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpassfilters (Grenzwellenlänge 2000 m, Ordnung 4) und eines direktionalen Kosinusfilters (Azimut 0°, Grad 1) identifiziert werden. Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Fehlerwerte liefert. Diese werden wiederum mit einem Spline-Filter (Glättung 0,95, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den bis dahin nur mittels der Kreuzungspunktstatistik korrigierten Daten abgezogen. Das daraus resultierende  $\Delta T$ -Gitter weist praktisch keine Niveaufehler mehr auf. Abschließend erfolgt auch die Berechnung der Abweichungen der Kontrollprofilaten von den aus dem niveaufokorrigierten Gitter entlang der Kontrollprofile abgetasteten Daten. Diese Fehlerwerte werden ebenfalls mit einem Spline-Filter (Glättung 0,95, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den Kontrollprofilaten abgezogen.

In (teilweise) besiedelten Gebieten dominieren in den Karten der magnetischen Anomalien oft die durch anthropogene Quellen hervorgerufenen Effekte. Diese starken Signale wirken sich störend auf das Microlevelling und die Identifizierung schwacher geogener Anomalien aus. Daher wird vor dem Microlevelling ein halbautomatischer Filterprozess zur Eliminierung starker, kleinräumiger Anoma-

lien im  $\Delta T$ -Gitter angewendet. Um die zu löschenden Bereiche zu lokalisieren, erfolgt die Berechnung der Differenzen zwischen dem zuvor Median-gefilterten Gitter und dem ungefilterten Gitter. Die Messpunkte, an denen die Differenz einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, sind in dem resultierenden Gitter nicht mehr enthalten. In diesen Filterprozess kann bei Bedarf manuell eingegriffen werden. Das so erzeugte Gitter ist demnach weitgehend von anthropogenen Einflüssen befreit und dient als Basis für das Microlevelling. Bereiche, die durch die Filterung entfernt wurden, können während des Microlevellings wieder eingefügt werden, indem dort die aus den umliegenden Bereichen interpolierten Fehlerwerte verwendet werden. Das aus den niveauekorrigierten Daten erzeugte Gitter enthält jedoch noch einige schwächere anthropogene Störanteile.

#### **5.4.5. Präsentation der Magnetikergebnisse**

Die Kartendarstellungen der Magnetfeldanomalien sind in **Abschnitt 6** beschrieben. Es sind zwei Karten produziert worden, einmal mit anthropogenen Effekten und einmal ohne. Die für die Produktion der Karten verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Linie (Fluglinie) dargestellt. Die weißen Punkte markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind.

### **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 dennoch 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 sind eine Reihe von Arbeiten zur Kalibrierung des Spektrometers sowie in der Datenverarbeitung erforderlich:

Spektrometerkalibrierung:

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

Datenverarbeitung:

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

- Korrektur der Compton-Streuung;
- Reduktion auf die Standardflughöhe;
- Berechnung der Radioelementgehalte und der Dosisleistung.

Die Datenverarbeitung in der Radiometrie erfolgte mit den unkorrigierten GPS-Positionsdaten. Eventuell vorhandene Lücken in der Datenaufzeichnung wurden durch Interpolation geschlossen. Die Längen der einzelnen Profile entsprechen den für die Auswertung der Hubschrauberelektromagnetik festgelegten optimalen Bereichen.

#### 5.5.1. Energiekalibrierung

Da die automatische Verstärkungsstabilisierung von Gammaskpektrometern infolge von Temperaturveränderungen nicht immer optimal funktioniert, kann die Energie-Kanal-Zuordnung während eines Fluges leicht driften. Es wird daher nachträglich eine Energiekalibrierung der aufgezeichneten Spektren durchgeführt.

Die Energie-Kanal-Zuordnung eines Spektrometers ist folgendermaßen definiert:

$$ch = E / G + offs$$

mit:

- ch = Kanalnummer,
- E = Energie (keV),
- G = Verstärkungskonstante des Spektrometers (keV/Kanal),
- offs = offset bzw. Kanalversatz.

Ein 256-Kanal-Spektrometer besitzt eine nominelle Verstärkung von 12 keV/Kanal und einen Versatz von 0 Kanälen. Die tatsächliche Verstärkung und der vorliegende Kanalversatz des Instrumentes können aus den Kanalpositionen der bekannten Energiemaxima (K, U, Th) in dem für jede Fluglinie gemittelten Spektrum berechnet werden. Die korrigierten Spektren entstehen dann durch das Abbilden der Originalspektren auf ein nominelles 12 keV/Kanal-Raster. Dieser Abbildungsprozess wird durch die lineare Interpolation benachbarter Spektralwerte ermöglicht.

Da die automatische Verstärkungsstabilisierung des Spektrometers während der Flüge 12804 bis 12809 komplett ausgefallen war, fließen diese Daten nicht in die weitere Auswertung ein.

#### 5.5.2. Verminderung des Rauschens

Aufgrund des relativ großen Abstandes zwischen den Quellen der radioaktiven Strahlung nahe der Erdoberfläche und dem Strahlungsdetektor im Hubschrauber sind die Zählraten in der Aerogammaskpektrometrie allgemein gering. Dies führt dazu, dass die aufgenommenen Gammaskpektren, und damit auch die daraus ermittelten Radionuklidgehalte, starkes statistisches Rauschen aufweisen. In der Datenaufbereitung kommt daher ein von Hovgaard & Grasty (1997) entwickeltes Verfahren zur Reduktion des Rauschens zur Anwendung. Das NASVD-Verfahren (Noise Addjusted Singular Value Decomposition) basiert auf einer statistischen Analyse sämtlicher Spektren eines Messgebietes und einer Rekonstruktion der Spektren mit vermindertem Rauschen. „Noise Adjusted“ bedeutet, dass die Spektren zunächst einer kanalspezifischen, varianzabhängigen Skalierung unterzogen werden, damit eine gleichmäßige Wichtung über das gesamte betrachtete Spektrum vorherrscht. Die Grundlage für

diese Skalierung bildet ein a priori-Modell des Rauschens, welches die Varianz für jeden Kanal liefert. Durch das Zusammenführen der skalierten Spektren entsteht eine Matrix, für die anschließend die Singulärwertzerlegung erfolgt. Die dabei ermittelten Hauptkomponenten werden entsprechend der Größe des Eigenwertes, d. h. entsprechend der Stärke ihres Einflusses auf die Kurvenform der skalierten Spektren, sortiert. Da das Nutzsignal zwischen den Kanälen für Uran, Thorium und Kalium korreliert, basieren die Hauptkomponenten geringer Ordnung in erster Linie auf den geogenen Daten und sind damit maßgeblich für die Kurvenform der Spektren verantwortlich. Die unkorrelierten Signale des statistischen Rauschens spiegeln sich dagegen gleichmäßig in allen Hauptkomponenten wider. Um das Rauschen zu minimieren, werden für die Rekonstruktion der Spektren nur die Hauptkomponenten verwendet, die die Nutzsignale enthalten. Die Rekonstruktion erfolgt demnach durch die Linearkombination der ersten fünf Hauptkomponenten. Als Ergebnis erhält man geglättete Spektren, aus denen die Zählraten der drei interessierenden Energiefenster (vgl. **Tab. 6**) neu bestimmt werden. Weiterhin kommt ein von Mathis (1987) vorgestelltes adaptives Filterverfahren zur Glättung der Zählratenkanäle zur Anwendung.

### **5.5.3. Detektorhöhe über der Erdoberfläche und effektive Höhe**

Für die korrekte Bestimmung von Radioelementgehalten aus Hubschrauberradiometriemessungen ist die Kenntnis des Abstandes zwischen der Strahlungsquelle am Boden und dem Detektor im Hubschrauber von entscheidender Bedeutung. Das von der BGR verwendete Hubschraubermesssystem ist mit zwei Höhenmessern ausgestattet: einem Radarhöhenmesser im Hubschrauber und einem Laserhöhenmesser in der Flugsonde. Grundsätzlich werden die Daten des Radarhöhenmessers zur Bestimmung der Detektorhöhe über der Erdoberfläche verwendet, da sich dieser auf der gleichen Plattform wie der Detektor befindet. Allerdings sind die Daten des Laserhöhenmessers genauer und enthalten auch Informationen über das Vorhandensein und ggf. die Dicke von Vegetationsschichten (meist Wald) unterhalb des Systems. Während der Radarhöhenmesser in bewaldeten Gebieten die Höhe der Baumkronen anzeigt und den Abstand zum Boden unterschätzt, erlaubt der Laserhöhenmesser sowohl eine Bestimmung des wahren Abstandes zum Boden als auch eine Abschätzung der Vegetationsdicke.

Da der Radarhöhenmesser gleich bei mehreren Flügen ausfiel, wurden die Höhenwerte einheitlich für alle radiometrischen Daten komplett aus den Laserhöhen ermittelt. Die verwendbaren Höhenwerte aus den Radarmessungen dienten damit nur der Berechnung der mittleren Kabellänge der Sonde. Die Abweichungen zwischen den während des radiometrischen Prozessierens ermittelten Höhenwerten und den korrigierten Höhenwerten laut den **Abschnitten 5.2.2** und **5.2.3** sind relativ gering. Untersuchungen für die Messungen in Langeoog ergaben, dass diese Höhenunterschiede nur einen sehr geringen Einfluss (kleiner als 1%) auf die berechneten Zählraten und die Gehalte bzw. Äquivalentgehalte haben.

Für die Anwendung der Datenanalysetechniken der Radiometrie ist es notwendig, die gemessenen Daten an Standardbedingungen (STD) anzupassen. Dazu gehört auch die Umrechnung der Spektrometerhöhe über der Erdoberfläche in eine effektive Höhe, die für die Standardtemperatur und den Standardluftdruck gilt, da beide Größen die Dichte und damit die Dämpfung in der Luft beeinflussen. Die Höhenkorrektur wird 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 Spektrometers über der Erdoberfläche unter STD-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),

$P_0$  = 101,325 kPa; mittlerer Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe,

$P$  = im Hubschrauber gemessener Luftdruck (kPa).

Obwohl für die Flüge 12810 bis 12813 keine Luftdruckmesswerte zur Berechnung der effektiven Höhe zur Verfügung standen, konnte der Druck  $P$  aus der jeweiligen Höhe  $h_r$  des Spektrometers durch Anwendung der internationalen barometrischen Höhenformel abgeschätzt werden.

#### 5.5.4. 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 werden 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).

#### 5.5.5. Hintergrundstrahlung

Die kosmische Strahlung (Höhenstrahlung) ist eine hochenergetische (> 3 MeV) Partikelstrahlung aus dem Weltall, die auf die äußere Erdatmosphäre auftrifft und dort durch Wechselwirkung mit Gasmolekülen Partikelschauer mit einer hohen Anzahl von Sekundärteilchen auslöst. Die Strahlung dieser Teilchen streut in das gemessene Gammaskpektrum ein. Weiterhin geht vom Hubschrauber und vom Messsystem eine geringe, als konstant angenommene radioaktive Strahlung aus. Die Summe der Strahlung dieser beiden Komponenten bezeichnet man als Hintergrundstrahlung. Sie verfälscht die Messung der vom Erdboden ausgehenden Gammastrahlung und muss korrigiert werden. Die erforderlichen Korrekturfaktoren werden durch Messflüge in unterschiedlichen Höhen zwischen etwa 100 und 3500 m über ausgedehnten Wasserflächen ermittelt. Die 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 im Jahr 2008 Messflüge in verschiedenen Höhen über der Nordsee durchgeführt (Tab. 17). Mit diesen Messdaten erfolgte die Berechnung der Korrekturgrößen mittels linearer Regression der gegen die Zählraten der kosmischen Strahlung aufgetragenen Zählraten der Kanäle K, U, Th und TC (Gesamtstrahlung).

**Tab. 17:** Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung

Kanal	Messsystem a [cps]	kosmische Einstreuung b
TC	31,09	0,7224
K	5,51	0,0405
U	0,48	0,0326
Th	0,33	0,0412

### 5.5.6. Korrektur der Compton-Streuung

Der Compton-Effekt beschreibt die Wechselwirkung von Gammaquanten mit Elektronen der äußeren Atomschale 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 Einstreuraten (stripping ratios) wurden im Jahr 2008 über Kalibrierkörper der BGR (Grasty et al., 1991) bestimmt (Tab. 18) und sind entsprechend den Empfehlungen der IAEA (2003) auf die Messwerte anzuwenden.

**Tab. 18:** Koeffizienten der Einstreuraten

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

Die Einstreuratens steigen jedoch mit der Entfernung des Messgerätes 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:

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

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

$$N_{K(corr)} = N_K - \beta_e N_{Th(corr)} - \gamma_e N_{U(corr)}$$

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

#### 5.5.7. 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. Im Urkanal ist sie zusätzlich von veränderlichen Radonkonzentrationen in der Luft beeinflusst. Die energiespezifischen Absorptionskoeffizienten  $\mu$  wurden mit Hilfe von Testflügen in unterschiedlichen Höhen über einer Eichstrecke in Allentsteig, Österreich, im Jahr 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 (**Tab. 19**).

**Tab. 19:** Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen

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

Mit den Absorptionskoeffizienten  $\mu$  werden die in einer Höhe  $h$  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  $h_0$ .

### 5.5.8. Berechnung der Radioelementgehalte und der 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 Zählrate im jeweiligen Energiefenster,  
 $S$  = Sensitivität der Strahlungsquelle im Energiefenster.

Die erforderlichen Sensitivitäten wurden anhand von Testmessungen über einer Eichstrecke mit bekannten Radioelementgehalten im Boden in Allenstein, Österreich, ermittelt (Tab. 20).

**Tab. 20:** Sensitivitäten

Sensitivität		
1 % K	=	28,42 cps
1 ppm eU	=	2,916 cps
1 ppm eTh	=	1,962 cps

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. Weiterhin kann der Radongehalt der Luft während einer Messung stark schwanken. Radon wirkt störend auf die radiometrischen Messungen, vor allem bei der Bestimmung von Urangelhalten, da die Radonstrahlung im Uran-Energiefenster registriert wird. Aktuell ist in der Datenverarbeitung keine Korrektur der Radonstrahlung implementiert, d. h. die angegebenen Absolutwerte in den Karten der Urangelhalte sind unter Vorbehalt zu betrachten.

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

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

mit:

- $C_0$  = Elementgehalt am Boden,
- $C_D$  = Elementgehalt, beeinflusst von der Vegetation,
- $D$  = Vegetationshöhe (**Abschnitt 5.5.3**),
- $\mu_V$  = linearer Abschwächungskoeffizient der Vegetation.

Die Werte für die linearen Abschwächungskoeffizienten  $\mu_V$  (**Tab. 21**) wurden empirisch – unter Verwendung umfangreicher Datensätze aus Norddeutschland – bestimmt.

**Tab. 21:** Lineare Abschwächungskoeffizienten  $\mu_V$  der Vegetation

Element	$\mu_V$
K	0,012
U	0,012
Th	0,011
TC	0,010

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

### 5.5.9. Statistische Niveaue Anpassung und Glättung

Vor der Vegetationskorrektur wird eine statistische Niveaue Anpassung für die Äquivalentgehalte der beiden Radioelemente Uran und Thorium, den Gehalt des Radioelementes Kalium und die korrigierten Gesamtzählraten vorgenommen. Dazu werden die Differenzen zwischen den Werten der Mess- und Kontrollprofile an den Kreuzungspunkten berechnet und flugweise gemittelt. Die gemittelten Werte definieren demzufolge die Niveauunterschiede zwischen den Flügen und stellen somit gleichzeitig die Korrekturwerte für die statistische Niveaue Anpassung dar. Niveauunterschiede können immer dann auftreten, wenn sich während der Kampagne Änderungen in den Umweltbedingungen (z.B. Bodenfeuchte, Luftfeuchtigkeit, Radongehalt in der Luft) ergeben haben.

Verbleibende, meist geringe Niveauunterschiede minimieren sich durch das nachfolgende Microlevelling. Das Microlevelling basiert auf dem Gitter der Messprofilaten, in welchem Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpassfilters (Grenzwellenlänge 2000 m, Ordnung 8) und eines direktionalen Kosinusfilters (Azimut 0°, Grad 1) identifiziert werden. Das Ergebnis der

Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Fehlerwerte liefert. Diese werden wiederum mit einem Spline-Filter (Glättung 0,65, Spannung 0,5) geglättet und dann von den Messprofildaten abgezogen. Die resultierenden Gitter weisen praktisch keine Niveaufehler mehr auf. Danach erfolgt auch die Korrektur der Kontrollprofil-  
daten. Hierzu werden die Differenzen aus prozessierten Messdaten und den bereits mit Microlevelling korrigierten Gittern entlang der Kontrallprofile berechnet. Diese Fehlerwerte werden ebenfalls mit einem Spline-Filter (Glättung 0,65, Spannung 0,5) bearbeitet und dann von den Kontrollprofil-  
daten abgezogen.

Abschließend glättet ein zweidimensionaler Medianfilter mit dem Radius 1 die Gitter für Kalium, Thorium und die Gesamtstrahlung bzw. mit dem Radius 2 das Gitter für Uran leicht. Die gefilterten Gitter werden entlang des Flugweges abgetastet und diese Daten als Grundlage für die Vegetations-  
korrektur und die Berechnung der Ionendosisleistung verwendet.

#### **5.5.10. Präsentation der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der radiometrischen Messungen werden in Form von Karten der Äquivalentgehalte der Radioelemente Uran und Thorium, des Gehaltes des Radioelementes Kalium sowie der Gesamtstrahlung und der Ionendosisleistung am Erdboden (vgl. **Abschnitt 6**) dargestellt. Die für die Produktion der Karten verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte in den Karten implementiert. Die weißen Punkte markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind.

## 6. Kartografische Arbeiten

### 6.1. Topografische Karten 1:50.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurden vier Teilblätter einer topografische Karte mit Sonderblattschnitten auf Grundlage von Rasterdaten der DTK50-V (Topographische Karte 1:50.000) hergestellt. Zur Abdeckung des Messgebietes ergab sich ein Blatt mit der Ausdehnung von je 27 km × 20 km. **Tab. 22** enthält die Eckpunktkoordinaten der Blätter.

**Tab. 22:** Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Langeoog

Karteneckpunkt	Gauß-Krüger-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
NW	3395000	5964000
NO	3422000	5964000
SW	3395000	5944000
SO	3422000	5944000

Die Ergebniskarten 1:50.000 basieren auf Rasterdaten der DTK50-V, Blätter L2310 Langeoog, L2312 Wangerland, L2510 Aurich, L2512 Jever. Herausgeber ist das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). Dargestellt wird ein Bereich, der im Kartenbild etwa die Fläche zwischen Dornum im Südwesten, Altharlingersiel im Südosten, der Insel Baltrum im Nordwesten und den westlichen Teil der Insel Spiekeroog im Nordosten abdeckt. Digital wurde dazu ein Kartenrahmen mit Gauß-Krüger-Eckpunktkoordinaten im 3°-Meridian-Streifensystem mit 9° als Mittelmeridian (Zone 3), basierend auf dem Bessel-Ellipsoid, und ergänzenden geografischen Koordinaten erstellt. Der Grauton der topografischen Darstellung wird durch eine fünfzigprozentige Aufrasterung der digitalen Topografie erreicht.

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

Für die Herstellung der geophysikalisch-thematischen Karten und der ihnen zugrunde liegenden Gitter wird das Softwarepaket Oasis montaj 7.3 von Geosoft verwendet. **Tab. 23** zeigt die Gitterparameter, die für das Messgebiet Langeoog verwendet wurden. Für jeden Ergebnisparameter werden Karten auf Grundlage der in **Abschnitt 6.1** beschriebenen topografischen Karten hergestellt. Des Weiteren sind die Fluglinien als Datenpunkte ebenfalls auf den Ergebniskarten enthalten. Die Zusammenstellung von Geophysik, Topografie und Legendeninformationen erfolgt mit dem Programm ArcGIS 10.2 von ESRI. Hierfür wurde u. a. das Geosoft Plug-in für ArcGIS verwendet, um die Geosoft-Daten importieren zu können. Die Erstellung von PDF-Dokumenten wird mit Adobe Acrobat vorgenommen.

**Tab. 23:** *Gitterparameter*

Parameter	Wert
Methode zur Flächeninterpolation	minimale Krümmung
Gitterzellengröße [m]	50
Extrapolationsbereich [m]	200
Suchradius [m]	200
Zellen außerhalb der Datenpunkte speziell für HMG gefiltert	7 45
Log-Option	linear, (außer: $\log \rho$ , $\log z^*$ )

### 6.3. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Langeoog wurden 29 geophysikalische Ergebniskarten sowie ein digitales Höhenmodell jeweils mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:50.000 hergestellt (siehe Kartenverzeichnis und **Anhang IV**). 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 produziert, die die Lage der Messprofile auf der Grundlage der topografischen Karten zeigen. Die Fluglinien sind mit Liniennummern versehen, die am Anfang eines Profils in Fluglinienrichtung geplottet sind. Die Positionen der Zeitmarken sind durch kurze bzw. lange Querstriche „|“ gekennzeichnet, d. h. entsprechend jede 10. oder 100. Zeitmarke. Jede 500. Zeitmarke ist mit der dazugehörigen Zeitmarkennummer (Record) in Fluglinienrichtung beschriftet. Die Fluglinienkarten gestatten eine schnelle Zuordnung der Daten von Profilen und Vertikalsektionen zur Position im Messgebiet.



## 7. Archivierung

Alle Daten und Plots wurden auf DVD gespeichert und im Fachbereich „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 (**Tab. 24** und **Anhang III**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Die ArcGIS-Projekte beinhalten die Kartendarstellung als mxd-Daten für ArcGIS 10.2 inklusive der Legendenteile (Import als bmp) und der Rasterdaten DTK50-V (Datenformat GRID, Typ Integer, mit Color File, Auflösung 200 Pixel/cm [508 dpi]).

**Tab. 24:** *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 der Rohdaten (HEM128_RAW.xyz) ASCII-Datei der bearbeiteten Daten (HEM128_DAT.xyz) ASCII-Datei der abgeleiteten Parameter (HEM128_APP.xyz) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM128_INV.xyz)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Bodenstationsdaten etc. (HMG128.xyz)
	\HRD	ASCII-Datei der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Ionendosisleistung etc. (HRD128.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 Schwerpunktstiefen für die Frequenzen 386, 1.817, 5.400, 8.370, 41.400 und 133.200 Hz sowie der spezifischen Widerstände bei 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 60 m unter NHN
	\HMG	PDF-Karten 1:50.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT mit und ohne anthropogene Effekte
	\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	Kartenprojekte für ArcGIS 10.2 (*.mxd) inklusive Legenden (*.bmp) und Rasterdaten DTK50-V (GRID)
\VRS		PDF-Vertikalschnitte des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnisse mit 6 Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:50.000 und Vertikalmaßstab 1:2.500

## 8. Literatur

- Anderson, W.L., 1989. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling. *Geophysics* 54, 263–266.
- DGM25. Geoinformationen © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie ([www.bkg.bund.de](http://www.bkg.bund.de))
- Grasty, R.L., Holman, P.B. & Blanchard, Y.B., 1991. Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers. Geological survey of Canada, Paper 90–23, 25p.
- Hovgaard, J. & Grasty, R.L., 1997. Reducing statistical noise in airborne gamma ray data through spectral component analysis. In “Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration” edited by A.G. Gubins, 753–764.
- IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1363AEA, Vienna.
- IGA, 1992: International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group 8: Analysis of the main field and secular variation. *Geophys. J. Int.*, 108, 945–946.
- IGA, 2010: International Geomagnetic Reference Field: the 11<sup>th</sup> generation. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD.  
<http://www.ngdc.noaa.gov/IGA/vmod/igrf.html>
- Johansen, H.K. & Sørensen, K., 1979. The fast Hankel transform. *Geophysical Prospecting* 27, 876–901.
- Mathis, G.L., 1987. Smoothing spectral gamma logs: A simple but effective technique. *Geophysics*, 52, 363–367.
- Miensopust, M., Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J., 2014. Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Nordenham 2009/2010. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132100, Hannover.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 2000. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 65, 1983–1992, doi:10.1190/1.1444882.
- 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.

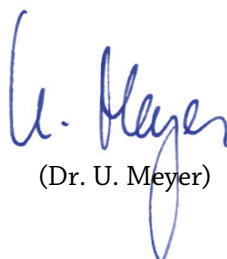
- 
- Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J. & Voß, W., 2014a. Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Esens 2008/2009. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131805, Hannover.
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Meyer, U., Pielawa, J., Steuer, A., Voss, W. & Wiederhold, H., 2009. Technischer Bericht zur Befliegung der Insel Borkum, März 2008, Archiv-Nr. 0128656, BGR.
- Siemon, B., Pielawa, J., Miensopust, M., Petersen, H., Voß, W., Balzer, H.-U. & Plath, C., 2014b. Zwischenbericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Jever 2009/2014. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132072, Hannover.
- Siemon, B., Pielawa, J., Miensopust, M., Steuer, A., Petersen, H., Voß, W., Balzer, H.-U. & Plath, C., 2014c. Zwischenbericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Varel 2014. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132073, 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.
- Sulzbacher, H., Wiederhold, H., Siemon, B., Grinat, M., Igel, J., Burschil, T., Günther, T. & Hinsby, K., 2012. Numerical modelling of climate change impacts on freshwater lenses on the North Sea Island of Borkum using hydrological and geophysical methods. Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 3621–3663, doi:10.5194/hess-16-3621-2012.
- 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.
- Weidelt, P., 1991, Introduction into electromagnetic sounding. Lecture manuscript. Technical University of Braunschweig, Germany.

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



(Dr. M. Kosinowski)

Leiter der Abteilung  
„Grundwasser und Boden“



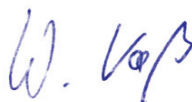
(Dr. U. Meyer)

Leiter des Fachbereichs  
„Geophysikalische Erkundung –  
Technische Mineralogie“



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs  
„Aerogeophysik und  
Luftfahrttechnischer Betrieb“



(W. Voß)

Sachbearbeiter im Arbeitsbereich  
„Aerogeophysik und  
Luftfahrttechnischer Betrieb“



## Anhang I

### Messgebiet 128 – Langeoog

<b>Basis:</b>	JadeWeserAirport (EDWI)	Flugplatzhöhe: 19 ft / 5.8 m
<b>Bodenstation:</b>	8,04855° östliche Länge,	53,50021° nördliche Breite
<b>Profilabstand:</b>	Messprofile – 250 m	Kontrollprofile – 2000 m
<b>Profilrichtung:</b>	Messprofile – 0°	Kontrollprofile – 90°
<b>Profile:</b>	Messprofile – 68	Querprofile – 7
<b>Profilkilometer:</b>	Messprofile– 953 km	Kontrollprofile–133 km
<b>Größe des Messgebietes:</b>	ca. 259 km <sup>2</sup>	

#### Allgemeine Anmerkungen:

- 1) Die Messprofile sind durch L\*.1 und die Kontrollprofile durch T\*.9 gekennzeichnet. Profile, die n-mal wiederholt wurden, sind durch L\*.n gekennzeichnet.
- 2) Die 900ter Liniennummern kennzeichnen die Testlinie, die am Ende jedes Messfluges auf dem Rückweg zum JadeWeserAirport (EDWI) überflogen wurde.
- 3) HeliDAS-Konsole: SYS03 bzw. SYS14, Flugsonde: BKS36a
- 4) Beim Flug 12801 fehlt die Barohöhe (ALTB).
- 5) Beim Flug 12801 ist die automatische Verstärkungsstabilisierung des Spektrometers ausgefallen.
- 6) Für die Flüge 12802 und 12803 existieren keine Daten
- 7) Bei den Flügen 12804 – 12806 fehlen die analogen Messdaten Radarhöhe, Barohöhe und kpa .
- 8) Beim Flug 12811 fehlt die Laserhöhe.
- 9) GPS\_Antenne unter Rotor, ab 28.02.08 am Staurohr.

**Tab. A-1:** Flugprotokoll

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
12801	26.02.08	07:36 – 09:47	T7.9 T6.9 T5.9 T4.9 T3.9 T2.9 T1.9	<b>Kontrollprofilflug</b> Helidas: SYS14 Barometrischer Höhenmesser defekt MAG-Sensor gedreht Sprünge bei EM4Q 31808, 60625 EM4I 60625 EM6Q 10147 EM6I 10147, 10234, 26505 Der Flug wurde in Helidas als 12903 gespeichert Wetter: regnerisch, starker Wind Niedrigwasser: 08:13 UTC Tiefwasser bei Fid 4676
12802	27.02.08	09:14 – 10:15	keine	<b>Messprofilflug</b> Helidas: SYS14 Wetter: bewölkt, Wind 15-30 Kn W Niedrigwasser 1,5m höher als normal „Pilot indicator“ defekt. Keine Linienführung möglich!
12803	19.11.08	08:06 – 08:53	keine	<b>Messprofilflug</b> Helidas: SYS03 MIT CPU von SYS14 Keine analogen Kanäle aufgezeichnet (Radarhöhe, Barohöhe und kpa) EM: über Wasser ist EM4Q negativ Wetter: windig, bewölkt Niedrigwasser: 09.24 UTC Sicht zu schlecht, keine Linie



12804	20.11.08	08:55 – 11:32	L74.1 L71.1 L68.1 L65.1 L62.1 L59.1 L56.1 L53.1 L904.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas: SYS03 mit CPU von SYS14 Keine analogen Kanäle aufgezeichnet EM: über Wasser ist EM4Q negativ Wetter: windig, bewölkt Niedrigwasser: 10:38 UTC Watt weitgehend wasserbedeckt Tiefwasser von Fid 1630-1750
12805	04.12.08	07:50-09:56	L50.1 L47.1 L44.1 L41.1 L38.1 L35.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas: SYS03 mit CPU von SYS14 Keine analogen Daten aufgezeichnet EM: über Wasser ist EM4Q negativ Wetter: Felder schneebedeckt Niedrigwasser: 08:52 UTC Tiefwasser von Fid 1340-1430
12806	08.12.08	10:42 – 13:11	L32.1 L29.1 L26.1 L23.1 L20.1 L17.1 L14.1 L11.1 L906.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas: SYS03 mit CPU von SYS14 Keine analogen Daten aufgezeichnet EM: über Wasser ist EM4Q negativ Wetter: leicht bewölkt Niedrigwasser: 12:13 UTC Tiefwasser von Fid 1560-1630
12807	10.12.08	12:34 – 15:07	L8.1 L5.1 L2.1 L1.1 L4.1 L7.1 L10.1 L13.1 L16.1 L19.1 L907.1	Messprofilflug Helidas: SYS14 mit CPU von SYS14 Alle Kanäle wieder aufgezeichnet Wetter: sonnig, 4°C Niedrigwasser : 14:30 UTC Tiefwasser von Fid 1506-1584

12808	12.02.09	07:12 – 8:32	L22.1 L25.1 L28.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas: SYS14, serielle Verbindung ausgefallen. Sicherung durchgebrannt, deshalb keine Schlusseichung: evtl. L28 neu, da starke Drift in EM2 Wetter: sonnig Niedrigwasser: 07:15 UTC Tiefwasser bei Fid 1340
12809	17.02.09	09:05 – 11:40	L31.1 L34.1 L37.1 L40.1 L43.1 L46.1 L49.1 L52.1 L55.1 L58.1 L909.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas:SYS14 AUTOCAL nicht am Boden Wetter: bewölkt,-1°C, starker Wind Niedrigwasser: 09:59 UTC Tiefwasser von Fid 662-?
12810	18.02.09	08:57 – 11:28	L61.1 L64.1 L67.1 L70.1 L73.1 L72.1 L69.1 L66.1 L63.1 L60.1 L910.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas:SYS14 AUTOCAL am Boden Wetter: bewölkt, -2°C Niedrigwasser: 10:49 UTC Tiefwasser von Fid 820-895

12811	11.02.09	15:43 – 17:20	L57.1 L54.1 L51.1 L48.1 L45.1 L911.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas:SYS14 Keine Laserhöhe aufgezeichnet Videoaufzeichnung in Ordnung. Wetter: sonnig, 8°C Niedrigwasser: 17:44 UTC Tiefwasser von Fid 1488-1556
12812	13.03.09	07:03 – 09:12	L42.1 L39.1 L36.1 L33.1 L30.1 L27.1 L24.1 L21.1 L912.1	<b>Messprofilflug</b> Helidas: SYS14 Wetter: sonnig, 1°C Niedrigwasser: 06:50 UTC Tiefwasser von Fid 1435-1527

**Tab. A-2:** Gebietsdateien

Methode	Name	# Profi- le/Flüge	# Werte	Größe [MB]	Bemerkungen
HEM	HEM128_RAW.xyz	10 (Flüge)	655.885	208,8	
HEM	HEM128_DAT.xyz	68 (L) + 7 (T)	314.672	67,6	
HEM	HEM128_APP.xyz	68 (L) + 7 (T)	314.672	79,3	
HEM	HEM128_INV.xyz	68 (L) + 7 (T)	314.672	62,4	
HMG	HMG128.xyz	68 (L) + 7 (T)	314.596	57,8	Wingst Bodenstations- daten bis auf 12804
HRD	HRD128.xyz	68 (L)	27.882	8,6	12801 unbrauchbar



## Anhang II

### Beschreibung der Datenformate

#### A) Elektromagnetik

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

##### Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):
/
/AREANAME
/LANGEORG
/AREACODE
/128
/C_MERIDIAN, ZONE and GEOID
/ 9 3 BESSEL
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT
/WGS84
/BIRD
/61 (BKS36a)
/NUMFREQ
/ 6
/FREQUENCY
/ 386.00 1817.00 5399.00 8372.00 41415.00 133200.00
/COILGEOMETRY
/ 1.00 1.00 4.00 1.00 1.00 1.00
/COILSEPERATION
/ 7.94 7.93 9.06 7.93 7.91 7.92
/IFREQUENCY
/ 1 1 1 1 1 1
/TOWCABLE
/ 41.50
/DUMMY
/ -999.990
/DECIMATIONVALUE
/ 1
/PRIVTEXT
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```



## 1) Rohdaten: HEM128\_RAW.XYZ

Beispiel:

/Unprocessed data

/ XYZ EXPORT [04/12/2014]

/ DATABASE [.\128\_HEM\_RAW1.gdb]

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

//Flight 12801

//Date 2008/02/26

Random 0

3426200	5948615	7.8824743	53.6636222	0	74631.0	1110.76	310.33	304.50	351.74	-3124.24	-2.17	2.24	...	-8.14	19.21	0	...	0	0.0014	0.0016
3426197	5948616	7.8824315	53.6636302	1	74631.1	1113.97	310.90	305.09	352.32	-3124.54	-2.14	2.30	...	-7.92	19.00	4144	...	0	0.0016	0.0019
3426194	5948617	7.8823887	53.6636382	2	74631.2	1114.88	311.61	305.68	352.90	-3124.24	-2.17	2.29	...	-7.76	18.65	8287	...	0	0.0009	0.0015

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m, "3" als Zonennummer vorangestellt
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALTR	ft	Messwert des Radarhöhenmessers, teilweise defekt
ALTL_FP	m	Messwert des Laserhöhenmessers
ZHG_BIRD_RAW	m	GPS-Höhe über NHN der Flugsonde
ZHG_HELI_RAW	m	GPS-Höhe über NHN des Hubschraubers
ALTB	ft	barometrische Höhe des Hubschraubers (nach x8 - 1000), teilweise defekt
EM1I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41415 Hz
EM1Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41415 Hz
EM2I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8372 Hz
EM2Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8372 Hz
EM3I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
EM3Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
EM4I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=133200 Hz
EM4Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=133200 Hz
EM5I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1817 Hz
EM5Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1817 Hz
EM6I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5399 Hz
EM6Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5399 Hz
EM1_FREQ	Hz	Frequenz für EM1-Kanäle (etwa f=41415 Hz)
EM2_FREQ	Hz	Frequenz für EM2-Kanäle (etwa f=8372 Hz)
EM3_FREQ	Hz	Frequenz für EM3-Kanäle (etwa f=386 Hz), meist nicht aufgezeichnet
EM4_FREQ	Hz	Frequenz für EM4-Kanäle (etwa f=133200 Hz), meist nicht aufgezeichnet
EM5_FREQ	Hz	Frequenz für EM5-Kanäle (etwa f=1817 Hz), meist nicht aufgezeichnet
EM6_FREQ	Hz	Frequenz für EM6-Kanäle (etwa f=5399 Hz), meist nicht aufgezeichnet
CPPL	V	Powerline-Detektor
CPSP	V	Sperics-Detektor



Anmerkungen:

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

/COILGEOMETRY

/ 1.00 1.00 -0.25 1.00 1.00 1.00

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

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

Zeilen, die mit "Random" beginnen, kennzeichnen die Flüge.

## 2) Daten: HEM128\_DAT.XYZ

Beispiel:

/Programme: Em\_View und Geosoft Oasis

/BEREINIGTE UND GEFILTERTE DATEN

/NIVEAUKORREKTUR DER HALBRAUMPARAMETER UND DER PRIMÄRFELDER

/ÜBERTRAGEN AM 02-JUL-14

/Processed by W.Voß (BGR)

/	X	Y	LON	LAT	RECORD	UTC_TIME	TOPO	H_RADAR	H_LASER	BIRD_NN	H_BARO	REAL_1	QUAD_1	...	REAL_6	QUAD_6
---	---	---	-----	-----	--------	----------	------	---------	---------	---------	--------	--------	--------	-----	--------	--------

//Flight 12807

//Date 2008/12/10

Line 1.1

3398020	5959910	7.452596	53.760326	33570	133454.0	-0.83	28.75	28.66	27.85	27.43	1252.24	1452.54	...	5186.96	191.01
3398020	5959907	7.452597	53.760300	33571	133454.1	-0.87	28.73	28.57	27.73	27.35	1253.36	1454.42	...	5199.09	191.73
3398020	5959904	7.452597	53.760273	33572	133454.2	-0.91	28.40	28.48	27.60	27.26	1255.18	1457.47	...	5218.42	192.85

In dieser Datei sind alle relativen Sekundärfelder in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m, "3" als Zonennummer vorangestellt
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
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	korrigierte topografische Höhe über NHN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe der Flugsonde abzüglich der korrigierten Laserhöhe
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	korrigierter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde
H_BARO	m	geglättete barometrische Höhe der Flugsonde über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
REAL_1	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
QUAD_1	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
REAL_2	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1817 Hz
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1817 Hz
REAL_3	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5399 Hz auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
QUAD_3	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5399 Hz auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
REAL_4	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8372 Hz
QUAD_4	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8372 Hz
REAL_5	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41415 Hz
QUAD_5	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41415 Hz
REAL_6	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=133200 Hz
QUAD_6	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=133200 Hz

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.

### 3) Halbraumparameter: HEM128\_APP.XYZ

Beispiel:

/Programme: Em\_View und Geosoft Oasis

/BEREINIGTE UND GEFILTERTE DATEN

/NIVEAUKORREKTUR DER HALBRAUMPARAMETER UND DER PRIMAERFELDER

/UEBERTRAGEN AM 02-JUL-14

/Processed by W.Voß (BGR)

/	X	Y	LON	LAT	RECORD	UTC_TIME	TOPO	H_RADAR	H_LASER	BIRD_NN	H_BARO	RHOA_1	KDA_1	ZST_1	...	RHOA_6	KDA_6	ZST_6
---	---	---	-----	-----	--------	----------	------	---------	---------	---------	--------	--------	-------	-------	-----	--------	-------	-------

//Flight 12807

//Date 2008/12/10

Line 1.1

3398020	5959910	7.452596	53.760326	33570	133454.0	-0.83	28.75	28.66	27.85	27.43	1.22	-3.98	10.18	...	0.31	-0.49	0.13
3398020	5959907	7.452597	53.760300	33571	133454.1	-0.87	28.73	28.57	27.73	27.35	1.22	-3.97	10.18	...	0.31	-0.48	0.13
3398020	5959904	7.452597	53.760273	33572	133454.2	-0.91	28.40	28.48	27.60	27.26	1.22	-3.96	10.20	...	0.31	-0.46	0.13

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m, "3" als Zonennummer vorangestellt
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
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	korrigierte topografische Höhe über NHN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe der Flugsonde abzüglich der korrigierten Laserhöhe
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	korrigierter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde
H_BARO	m	geglättete barometrische Höhe der Flugsonde über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHOA_1	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=386 Hz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=386 Hz
ZST_1	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=386 Hz
RHOA_2	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=1817 Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=1817 Hz
ZST_2	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=1817 Hz
RHOA_3	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=5399 Hz
KDA_3	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=5399 Hz
ZST_3	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=5399 Hz
RHOA_4	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=8372 Hz
KDA_4	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=8372 Hz
ZST_4	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=8372 Hz
RHOA_5	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=41415 Hz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=41415 Hz
ZST_5	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=41415 Hz
RHOA_6	Ωm	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=133200 Hz
KDA_6	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=133200 Hz
ZST_6	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=133200 Hz

Anmerkungen: siehe 2)

#### 4) Inversionsdaten HEM128\_INV.XYZ

Beispiel:

/Processing by W. Voss (BGR) using Oasis montaj and EM\_view

/Levelled and corrected data

/MODELL-HALBRAUM-PARAMETER

/INVERSIONSMODELLE, STEUERPARAMETER VON AUTOINV.DAT

/UEBERTRAGEN AM 03-JUL-14 17:27:38

/ X Y LON LAT RECORD UTC\_TIME TOPO H\_RADAR H\_LASER BIRD\_NN H\_BARO RHO\_I\_1 D\_I\_1 ... RHO\_I\_6 QALL

//Flight 12807

//Date 2008/01/10

Line 1.1

3398020	5959910	7.452596	53.760326	33570	133454.0	-0.83	28.75	28.66	27.85	27.43	0.10	0.42	...	1.83	9.47
3398020	5959907	7.452597	53.760300	33571	133454.1	-0.87	28.73	28.57	27.73	27.35	0.10	0.40	...	1.89	8.80
3398020	5959904	7.452597	53.760273	33572	133454.2	-0.91	28.40	28.48	27.60	27.26	0.10	0.36	...	1.94	7.88

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m, "3" als Zonennummer vorangestellt
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
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	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe der Flugsonde abzüglich der berechneten Laserhöhe
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	berechneter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde
H_BARO	m	geglättete barometrische Höhe der Flugsonde über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHO_I_1	$\Omega m$	spezifischer Widerstand der ersten (oberen) Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
D_I_1	m	Mächtigkeit der ersten (oberen) Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_2	$\Omega m$	spezifischer Widerstand der zweiten Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
D_I_2	m	Mächtigkeit der zweiten Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_3	$\Omega m$	spezifischer Widerstand der dritten Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
D_I_3	m	Mächtigkeit der dritten Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_4	$\Omega m$	spezifischer Widerstand der vierten Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
D_I_4	m	Mächtigkeit der vierten Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_5	$\Omega m$	spezifischer Widerstand der fünften Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
D_I_5	m	Mächtigkeit der fünften Schicht des 6-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_6	$\Omega m$	spezifischer Widerstand der sechsten Schicht (Substratum) des 6-Schicht-Inversionsmodells
QALL	%	Anpassungsfehler der Inversion (L1-Norm)

Anmerkungen: siehe 2) und  
im Header steht zusätzlich:

/NUMLAYER

/ 6

/MUELAYER

/ 0

und abweichend:

/IFREQUENCY

/ 1 1 0 1 1 1



## B) Magnetik

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

### Magnetikdaten HMG128.XYZ

```
/BGR HEADER:  
/  
/AREANAME  
/LANGEORG  
/AREACODE  
/128  
/C_MERIDIAN, ZONE and GEOID FOR X AND Y  
/9 3 BESSEL  
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/G-822A  
/IGRF  
/2010  
/LON_BASE  
/8.04855  
/LAT_BASE  
/53.50021  
/ALT_BASE  
/1  
/TOWCABLE  
/41.50  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```



**Beispiel:**

/ XYZ EXPORT [08/19/2014]

/ DATABASE [.\128\_mag.gdb]

/ Processed by M. Bock

/ X Y LON LAT RECORD UTC\_DATE UTC\_TIME ALT\_BIRD H\_RADAR\_RAW H\_LASER\_RAW T\_BASE\_RAW T\_BASE\_F T\_RAW DELTA\_T DELTA\_T\_LEV DELTA\_T\_LEV\_CE

//Flight 12807

//Date 2008/12/10

Line 1.1

3398020	5959909	7.452596	53.760326	33570	20081210	133454.0	16.0	225.1	28.7	49339.74	49339.74	49353.72	-27.96	-26.70	-26.70
3398020	5959906	7.452597	53.760299	33571	20081210	133454.1	15.9	225.0	28.7	49339.74	49339.74	49353.69	-27.98	-26.72	-26.72
3398020	5959903	7.452597	53.760272	33572	20081210	133454.2	15.8	225.0	28.8	49339.74	49339.74	49353.65	-27.99	-26.72	-26.72

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m, "3" als Zonennummer vorangestellt
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
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 NHN der Flugsonde
H_RADAR_RAW	ft	Messwert der Radarhöhe des Hubschraubers über Grund
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Flugsonde über Grund
T_BASE_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_BASE_F	nT	bereinigte Daten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Flugsonde
DELTA_T	nT	Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes nach Abzug des IGRF und der Tagesvariation sowie Korrektur des richtungsabhängigen Fehlers (heading error)
DELTA_T_LEV	nT	niveauekorrigierte Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes
DELTA_T_LEV_CE	nT	niveauekorrigierte Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes, anthropogene Effekte entfernt

**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.



## C) Radiometrie

Beschreibung der ASCII-Datei mit den niveauekorrigierten (gelevelten) Ergebnissen der Hubschrauberradiometrie.

### Radiometriedaten HRD128.xyz

```
/BGR HEADER:
/
/AREANAME
/LANGEORG
/AREACODE
/128
/C_MERIDIAN, ZONE and GEOID FOR X AND Y
/9 3 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)
/31.09, 0.7224, 5.51, 0.0405, 0.48, 0.0326, 0.33, 0.0412
/STRIPPING (IAEA 2003, S.65) alpha, beta, gamma, a
/0.2485, 0.3852, 0.6599, 0.0395
/ATTENUATION (IAEA 2003, S.67) mue(TC), mue(K), mue(U), mue(Th)
/-0.006468, -0.007733, -0.008132, -0.005784
/SENSITIVITY (IAEA 2003, S.68) S(K), S(U), S(Th)
/28.42, 2.916, 1.962
/TOWCABLE
/ 41.50
/DUMMY
/-9999
/PRIVTEXT
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```

Beispiel:

```
/ XYZ EXPORT [08/28/2014]
/ DATABASE [.\128_hrd.gdb]
/ Processed by M. Bock
```

/ Da die automatische Verstärkungsstabilisierung des Spektrometers während des Fluges 12801 komplett ausgefallen war, sind diese Daten nicht in die Auswertung eingeflossen.

```
/      X      Y      LON      LAT      RECORD UTC_DATE  UTC_TIME  ALT_BIRD  H_RADAR_RAW  H_LASER_RAW  HAG  PRESSURE  TEMP  LIVE_T  COSMIC_RAW
Fortsetzung der letzten Zeile:
      TOT_RAW  POT_RAW  URA_RAW  THO_RAW  URAUP_RAW  TOT      POT      URA      THO      TOT_LEV  POT_LEV  URA_LEV  THO_LEV  EXPO
```



//Flight 12807

//Date 2008/12/10

Line 1.1

3398020	5959909	7.452596	53.760326	33570	20081210	133454.0	16.0	225.1	28.7	69.4	100.806	4.2	946	70
3398020	5959880	7.452602	53.760060	33580	20081210	133455.0	15.2	221.3	27.4	68.5	100.830	4.2	951	69
3398020	5959850	7.452609	53.759793	33590	20081210	133456.0	13.4	217.2	26.4	67.5	100.840	4.2	945	62

Fortsetzung der letzten drei Zeilen:

92	11	2	4	0	14.9	0.07	0.07	0.13	7.23	0.03	0.08	0.01	0.09
104	14	2	2	2	26.0	0.08	0.05	0.13	4.26	0.02	0.07	0.00	0.08
78	8	4	0	0	1.3	0.04	0.00	0.14	1.12	0.02	0.06	0.00	0.06

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
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 NHN der Flugsonde
H_RADAR_RAW	ft	Messwert der Radarhöhe des Hubschraubers über der Erdoberfläche
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Flugsonde über der Erdoberfläche
HAG	m	Höhe des Hubschraubers über der Erdoberfläche
PRESSURE	kPa	Luftdruck
TEMP	°C	Lufttemperatur
LIVE_T	ms	Registrierzeitintervall
COSMIC_RAW	cps	Kosmische Strahlung > 3 MeV
TOT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Gesamtstrahlung
POT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Kaliumstrahlung
URA_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung
THO_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Thoriumstrahlung
URAUP_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung im upward-looking Kristall
TOT	cps	korrigierte Gesamtstrahlung
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	Gesamtstrahlung (niveauekorrigiert und geglättet)
POT_LEV	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden (niveauekorrigiert und geglättet)
URA_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden (niveauekorrigiert und geglättet)
THO_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden (niveauekorrigiert und geglättet)
EXPO	µR/h	Ionendosisleistung am Erdboden, ermittelt aus niveauekorrigierten und geglätteten Gehalten

Anmerkungen: siehe Magnetik





## Anhang III

### DVD-Inhalt

\Bericht\ Technischer Bericht 128 Langeoog.pdf	128 Langeoog Widerstand 20m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 30m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 40m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 50m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 60m unter NHN.mxd Langeoog ÜK.jpg
\Daten\ \HEM\ Format_description_HEM128.txt HEM128_APP.XYZ HEM128_DAT.xyz HEM128_INV.xyz HEM128_RAW.XYZ  \HMG\ Format_description_HMG128.txt HMG128.XYZ  \HRD\ Format_description_HRD128.txt HRD128.XYZ	ArcGis\ArcGIS-Plugin\ Geosoft Software Suite 8.3.1 65015 update- 2014.12.23.exe  ArcGis\Legenden\ 128 Langeoog Fluglinien.bmp 128 Langeoog Gesamtstrahlung.bmp 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa1.bmp 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa2.bmp 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa3.bmp 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa4.bmp 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa5.bmp 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa6.bmp 128 Langeoog Höhenmodell DEM.bmp 128 Langeoog Ionendosisleistung.bmp 128 Langeoog Kalium.bmp 128 Langeoog Magnetik gefiltert.bmp 128 Langeoog Magnetik.bmp 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst1.bmp 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst2.bmp 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst3.bmp 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst4.bmp 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst5.bmp 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst6.bmp 128 Langeoog Thorium.bmp 128 Langeoog Uran.bmp 128 Langeoog Widerstand 00m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 02m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 05m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 10m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 15m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 20m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 30m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 40m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 50m unter NHN.bmp 128 Langeoog Widerstand 60m unter NHN.bmp
\Karten\ liesmich.txt  \ArcGis\ 128 Langeoog Fluglinien.mxd 128 Langeoog Gesamtstrahlung.mxd 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa1.mxd 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa2.mxd 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa3.mxd 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa4.mxd 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa5.mxd 128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa6.mxd 128 Langeoog Höhenmodell DEM.mxd 128 Langeoog Ionendosisleistung.mxd 128 Langeoog Kalium.mxd 128 Langeoog Magnetik gefiltert.mxd 128 Langeoog Magnetik.mxd 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst1.mxd 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst2.mxd 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst3.mxd 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst4.mxd 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst5.mxd 128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst6.mxd 128 Langeoog Thorium.mxd 128 Langeoog Uran.mxd 128 Langeoog Widerstand 00m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 02m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 05m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 10m unter NHN.mxd 128 Langeoog Widerstand 15m unter NHN.mxd	ArcGis\Oasis\ 128_hrd_final.map 128_hrd_final.map.xml 128_Langeoog_final.map

128_Langeoog_final.map.xml	RHO_015mbsl_LEV.grd
128_Langeoog_final_CE.map	RHO_015mbsl_LEV.grd.gi
128_Langeoog_final_CE.map.xml	RHO_015mbsl_LEV.grd.xml
128_Rhoatz_TB.map	RHO_020mbsl_LEV.grd
128_TB.map	RHO_020mbsl_LEV.grd.gi
128_TB.map.xml	RHO_020mbsl_LEV.grd.xml
DA1_IBS_LEV_IQ.grd	RHO_030mbsl_LEV.grd
DA1_IBS_LEV_IQ.grd.gi	RHO_030mbsl_LEV.grd.gi
DA1_IBS_LEV_IQ.grd.xml	RHO_030mbsl_LEV.grd.xml
DA2_IBS_LEV_IQ.grd	RHO_040mbsl_P.grd
DA2_IBS_LEV_IQ.grd.gi	RHO_040mbsl_P.grd.gi
DA2_IBS_LEV_IQ.grd.xml	RHO_040mbsl_P.grd.xml
DA3_IBS_LEV_IQ.grd	RHO_050mbsl_P.grd
DA3_IBS_LEV_IQ.grd.gi	RHO_050mbsl_P.grd.gi
DA3_IBS_LEV_IQ.grd.xml	RHO_050mbsl_P.grd.xml
DA4_IBS_LEV_IQ.grd	RHO_060mbsl_P.grd
DA4_IBS_LEV_IQ.grd.gi	RHO_060mbsl_P.grd.gi
DA4_IBS_LEV_IQ.grd.xml	RHO_060mbsl_P.grd.xml
DA5_IBS_LEV_IQ.grd	RHOA1_IBS_LEV_IQ.grd
DA5_IBS_LEV_IQ.grd.gi	RHOA1_IBS_LEV_IQ.grd.gi
DA5_IBS_LEV_IQ.grd.xml	RHOA1_IBS_LEV_IQ.grd.xml
DA6_IBS_LEV_IQ.grd	RHOA2_IBS_LEV_IQ.grd
DA6_IBS_LEV_IQ.grd.gi	RHOA2_IBS_LEV_IQ.grd.gi
DA6_IBS_LEV_IQ.grd.xml	RHOA2_IBS_LEV_IQ.grd.xml
da-Keil.tif	RHOA3_IBS_LEV_IQ.grd
DELTA_T.tifw	RHOA3_IBS_LEV_IQ.grd.gi
DELTA_T.tif	RHOA3_IBS_LEV_IQ.grd.xml
EXPO.grd	RHOA4_IBS_LEV_IQ.grd
EXPO.grd.gi	RHOA4_IBS_LEV_IQ.grd.gi
EXPO.grd.xml	RHOA4_IBS_LEV_IQ.grd.xml
MAG_LEV_CE_final_c.grd	RHOA5_IBS_LEV_IQ.grd
MAG_LEV_CE_final_c.grd.gi	RHOA5_IBS_LEV_IQ.grd.gi
MAG_LEV_CE_final_c.grd.xml	RHOA5_IBS_LEV_IQ.grd.xml
MAG_LEV_final.grd	RHOA6_IBS_LEV_IQ.grd
MAG_LEV_final.grd.gi	RHOA6_IBS_LEV_IQ.grd.gi
MAG_LEV_final.grd.xml	RHOA6_IBS_LEV_IQ.grd.xml
POT_LEV_M1.grd	rhoa-Keil.tif
POT_LEV_M1.grd.gi	THO_LEV_M1.grd
POT_LEV_M1.grd.xml	THO_LEV_M1.grd.gi
readme.txt	THO_LEV_M1.grd.xml
RHO_000mbsl_LEV.grd	TOT_LEV_M1.grd
RHO_000mbsl_LEV.grd.gi	TOT_LEV_M1.grd.gi
RHO_000mbsl_LEV.grd.xml	TOT_LEV_M1.grd.xml
RHO_002mbsl_LEV.grd	URA_LEV_M2.grd
RHO_002mbsl_LEV.grd.gi	URA_LEV_M2.grd.gi
RHO_002mbsl_LEV.grd.xml	URA_LEV_M2.grd.xml
RHO_005mbsl_LEV.grd	ZST1_IBS_LEV_IQ.grd
RHO_005mbsl_LEV.grd.gi	ZST1_IBS_LEV_IQ.grd.gi
RHO_005mbsl_LEV.grd.xml	ZST1_IBS_LEV_IQ.grd.xml
RHO_010mbsl_LEV.grd	ZST2_IBS_LEV_IQ.grd
RHO_010mbsl_LEV.grd.gi	ZST2_IBS_LEV_IQ.grd.gi
RHO_010mbsl_LEV.grd.xml	ZST2_IBS_LEV_IQ.grd.xml

ZST3_IBS_LEV_IQ.grd	128 Langeoog Thorium.pdf
ZST3_IBS_LEV_IQ.grd.gi	128 Langeoog Uran.pdf
ZST3_IBS_LEV_IQ.grd.xml	
ZST4_IBS_LEV_IQ.grd	\VRS\
ZST4_IBS_LEV_IQ.grd.gi	VRS1280011.pdf
ZST4_IBS_LEV_IQ.grd.xml	VRS1280019.pdf
ZST5_IBS_LEV_IQ.grd	VRS1280021.pdf
ZST5_IBS_LEV_IQ.grd.gi	VRS1280029.pdf
ZST5_IBS_LEV_IQ.grd.xml	VRS1280039.pdf
ZST6_IBS_LEV_IQ.grd	VRS1280041.pdf
ZST6_IBS_LEV_IQ.grd.gi	VRS1280049.pdf
ZST6_IBS_LEV_IQ.grd.xml	VRS1280051.pdf
zst-Keil.tif	VRS1280059.pdf
ArcGis\Topografie\	VRS1280069.pdf
Topografie.zip	VRS1280071.pdf
\DEM\	VRS1280079.pdf
128 Langeoog Höhenmodell DEM.pdf	VRS1280081.pdf
\Fluglinien\	VRS1280101.pdf
128 Langeoog Fluglinien.pdf	VRS1280111.pdf
\HEM\	VRS1280131.pdf
128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa1.pdf	VRS1280141.pdf
128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa2.pdf	VRS1280161.pdf
128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa3.pdf	VRS1280171.pdf
128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa4.pdf	VRS1280191.pdf
128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa5.pdf	VRS1280201.pdf
128 Langeoog Halbraumwiderstand rhoa6.pdf	VRS1280211.pdf
128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst1.pdf	VRS1280221.pdf
128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst2.pdf	VRS1280231.pdf
128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst3.pdf	VRS1280241.pdf
128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst4.pdf	VRS1280251.pdf
128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst5.pdf	VRS1280261.pdf
128 Langeoog Schwerpunktstiefe zst6.pdf	VRS1280271.pdf
128 Langeoog Widerstand 00m unter NHN.pdf	VRS1280281.pdf
128 Langeoog Widerstand 02m unter NHN.pdf	VRS1280291.pdf
128 Langeoog Widerstand 05m unter NHN.pdf	VRS1280301.pdf
128 Langeoog Widerstand 10m unter NHN.pdf	VRS1280311.pdf
128 Langeoog Widerstand 15m unter NHN.pdf	VRS1280321.pdf
128 Langeoog Widerstand 20m unter NHN.pdf	VRS1280331.pdf
128 Langeoog Widerstand 30m unter NHN.pdf	VRS1280341.pdf
128 Langeoog Widerstand 40m unter NHN.pdf	VRS1280351.pdf
128 Langeoog Widerstand 50m unter NHN.pdf	VRS1280361.pdf
128 Langeoog Widerstand 60m unter NHN.pdf	VRS1280371.pdf
\HMG\	VRS1280381.pdf
128 Langeoog Magnetik gefiltert.pdf	VRS1280391.pdf
128 Langeoog Magnetik.pdf	VRS1280401.pdf
\HRD\	VRS1280411.pdf
128 Langeoog Gesamtstrahlung.pdf	VRS1280421.pdf
128 Langeoog Ionendosisleistung.pdf	VRS1280431.pdf
128 Langeoog Kalium.pdf	VRS1280441.pdf
	VRS1280451.pdf
	VRS1280461.pdf
	VRS1280471.pdf
	VRS1280481.pdf

VRS1280491.pdf  
VRS1280501.pdf  
VRS1280511.pdf  
VRS1280521.pdf  
VRS1280531.pdf  
VRS1280541.pdf  
VRS1280551.pdf  
VRS1280561.pdf  
VRS1280571.pdf  
VRS1280581.pdf  
VRS1280591.pdf  
VRS1280601.pdf  
VRS1280611.pdf

VRS1280621.pdf  
VRS1280631.pdf  
VRS1280641.pdf  
VRS1280651.pdf  
VRS1280661.pdf  
VRS1280671.pdf  
VRS1280681.pdf  
VRS1280691.pdf  
VRS1280701.pdf  
VRS1280711.pdf  
VRS1280721.pdf  
VRS1280731.pdf  
VRS1280741.pdf

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.