

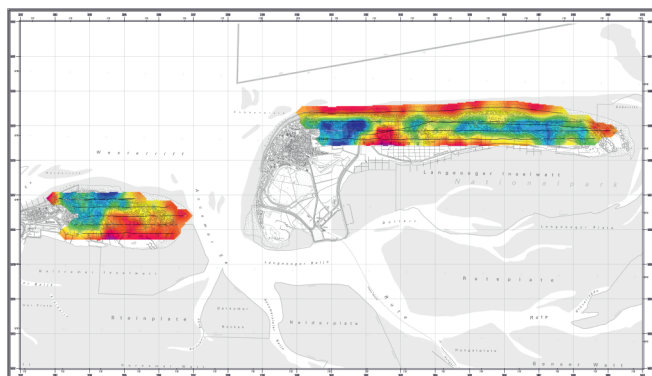
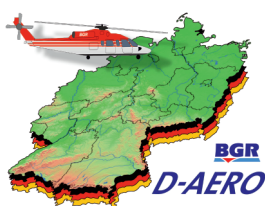
B. Siemon, M. Ibs-von Seht, A. Ullmann,  
J. Pielawa



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

# Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Befliegung Baltrum / Langeoog 2

Oktober 2014







**Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe**

**Technischer Bericht  
Hubschraubergeophysik  
Befliegung  
Baltrum / Langeoog 2  
Oktober 2014**



Autoren: B. Siemon  
M. Ibs-von Seht  
A. Ullmann  
J. Pielawa

Datum: 31.03.2017



## 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>7</b>
4.1. Messhubschrauber .....	8
4.2. Messausrüstung.....	8
4.3. Elektromagnetik.....	9
4.4. Magnetik.....	10
4.5. Radiometrie .....	11
4.6. Navigations- und Positionierungssystem .....	12
4.7. Datenerfassung.....	14
4.8. Videosystem .....	15
4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber .....	15
<b>5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten</b> .....	<b>16</b>
5.1. Prozessabläufe .....	17
5.2. Positionsdaten.....	17
5.2.1. GPS-Koordinaten .....	17
5.2.2. Radarhöhen .....	18
5.2.3. Laserhöhen .....	18
5.2.4. Barometrische Höhen .....	20
5.2.5. Topografische Höhen .....	20
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik.....	21
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems .....	21
5.3.2. Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur.....	22
5.3.3. Datenauswahl und -korrektur.....	23
5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter.....	24
5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten .....	26
5.3.6. Statistische Niveaueinpassung.....	27
5.3.7. Dateninterpolation und -glättung .....	28
5.3.8. Datenfehler und Qualitätsparameter .....	28
5.3.9. 1D-Inversion der HEM-Daten.....	29
5.3.10. Präsentation der HEM-Ergebnisse .....	30

5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik.....	31
5.4.1. Magnetisches Totalfeld.....	31
5.4.2. Berechnung des IGRF .....	31
5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen .....	31
5.4.4. Statistische Niveaueinpassung.....	31
5.4.5. Präsentation der Magnetikergebnisse.....	32
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie .....	32
5.5.1. Energiekalibrierung .....	33
5.5.2. Verminderung des Rauschens .....	33
5.5.3. Effektive Höhe .....	34
5.5.4. Registrierzeitkorrektur.....	34
5.5.5. Hintergrundstrahlung .....	35
5.5.6. Radonkorrektur .....	35
5.5.7. Compton-Streuung .....	36
5.5.8. Zählraten in Standardflughöhe .....	37
5.5.9. Radioelementgehalte und Dosisleistung.....	38
5.5.10. Filterung und statistische Niveaueinpassung.....	39
5.5.11. Präsentation der Ergebnisse .....	40
<b>6. Kartografische Arbeiten.....</b>	<b>41</b>
6.1. Topografische Karten 1:25.000 .....	41
6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software.....	41
6.3. Ergebniskarten.....	42
<b>7. Archivierung.....</b>	<b>43</b>
<b>8. Referenzen .....</b>	<b>44</b>
8.1. Literatur.....	44
8.2. Internetverknüpfungen.....	46
<b>Unterschriften.....</b>	<b>47</b>
<b>Anhang I:</b> Befliegungsdaten Messgebiet Langeoog 2 / Messgebiet Baltrum .....	<b>49</b>
<b>Anhang II:</b> Beschreibung der Datenformate .....	<b>51</b>
<b>Anhang III:</b> DVD-Inhalt .....	<b>71</b>
<b>Anhang IV:</b> Karten.....	<b>75</b>
<b>Anhang V:</b> Vertikalsektionen .....	<b>107</b>
<b>Anlage: DVD</b> (DVD+R)	

## **Personal:**

### **Projektleitung und Management**

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

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

### **Auswertung und Interpretation**

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

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

Angelika **Ullmann**, Geophysikerin, Positionsdatenauswertung, B2.1, BGR

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

### **Messgruppe**

Hauke **Petersen**, Geophysiker, Navigator, B2.1, BGR

Hans-Ulrich **Balzer**, Elektroingenieur, Systembetreuer, B2.1, BGR

Carsten **Plath**, Hubschrauberingenieur, B2.1, BGR

Martin **Klenke**, Pilot, HeliJet Charter 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 der Messgebiete Baltrum und Langeoog
2. Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR
3. Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen und geschichteten Halbräumen

### **Tabellenverzeichnis:**

1. Technische Daten der Befliegung Baltrum / Langeoog 2
  2. Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
  3. Geophysikalische Messsysteme
  4. HEM-Systemparameter für BKS36a
  5. Bodenstation
  6. Energiebereiche und Kanaluordnungen registrierter Strahlungsquellen
  7. Navigations- und Positionierungssysteme
  8. Höhenmesser
  9. Datenerfassung und -aufzeichnung
  10. Sonstige Ausrüstung
  11. HEM-Auswertung (Übersicht)
  12. Filterparameter für die Korrektur der Laserhöhe in Bereichen mit Vegetation
  13. Kalibrierwerte für das HEM-System (BKS36a)
  14. Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung
  15. Filterparameter für die HEM-Niveauekorrektur
  16. Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung
  17. Konstanten für die Radonkorrektur
  18. Koeffizienten der Einstreuratzen
  19. Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen
  20. Sensitivitäten
  21. Filterbreiten für die HRD-Gitter
  22. Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Baltrum / Langeoog 2
  23. Gitterparameter
  24. Inhalt der DVD
- A-1:** Flugprotokoll  
**A-2:** Gebietsdateien



---

**Kartenverzeichnis (1:25.000):**

1. Topografie und Fluglinien
2. Digitales Höhenmodell in m NHN
3. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 133.200 Hz ( $\rho_{a6}$ ) in  $\Omega\text{m}$
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 41.420 Hz ( $\rho_{a5}$ ) in  $\Omega\text{m}$
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8.370 Hz ( $\rho_{a4}$ ) in  $\Omega\text{m}$
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 5.400 Hz ( $\rho_{a3}$ ) in  $\Omega\text{m}$
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1.820 Hz ( $\rho_{a2}$ ) in  $\Omega\text{m}$
8. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 387 Hz ( $\rho_{a1}$ ) in  $\Omega\text{m}$
9. Schwerpunktstiefe bei 133.200 Hz (zst6) in m unter GOK
10. Schwerpunktstiefe bei 41.420 Hz (zst5) in m unter GOK
11. Schwerpunktstiefe bei 8.370 Hz (zst4) in m unter GOK
12. Schwerpunktstiefe bei 5.400 Hz (zst3) in m unter GOK
13. Schwerpunktstiefe bei 1.820 Hz (zst2) in m unter GOK
14. Schwerpunktstiefe bei 387 Hz (zst1) in m unter GOK
15. Spezifischer Widerstand bei 1m unter NHN
16. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter NHN
17. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter NHN
18. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter NHN
19. Spezifischer Widerstand bei 20 m unter NHN
20. Spezifischer Widerstand bei 25 m unter NHN
21. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter NHN
22. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter NHN
23. Spezifischer Widerstand bei 50 m unter NHN
24. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter NHN
25. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
26. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT, bezüglich anthropogener Signale korrigiert
27. Gesamtstrahlung in cps
28. Gehalte von Kalium im Boden in %
29. Äquivalentgehalte von Thorium im Boden in ppm
30. Äquivalentgehalte von Uran im Boden in ppm
31. Dosisleistung am Boden in  $\mu\text{R/h}$

---

**Liste der Vertikalsektionen:**

Messprofile auf Baltrum:

1. VRS 1.1
2. VRS 1.2
3. VRS 2.1
4. VRS 3.1
5. VRS 4.1
6. VRS 5.1

Messprofile auf Langeoog:

7. VRS 101.9
8. VRS 102.9
9. VRS 102.8
10. VRS 103.9
11. VRS 104.9

## Abkürzungen

° , ' , "	Grad, Sekunde, Minute
°C	Grad Celsius
%	Prozent
∞	unendlich
1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, 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
$a_x$	Korrekturfaktoren für Radonstrahlung
A/D	analog/digital
Ah	Amperestunden
ALT	transformierte Sensorhöhe
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
CF	Compact Flash
$C_H$	Zählrate im Höhenstrahlungskanal
$c_l$	effektive Kabellänge
cm	Zentimeter
cps	counts per second
Cs	Cäsium
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CHECK	Marker für gelöschte Datenbereiche
$\Delta h_l$	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-AERO	Projekt: Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche
$D_a$	scheinbarer Abstand
$d_a$	scheinbare Tiefe
DC	Gleichstrom
DEM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DH	Differenz zwischen topo und DEM
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
$d_n$	Schichtmächtigkeiten
dpi	dots per inch (Pixel pro Zoll)
DTK	Digitale Topographische Karte (z. B. DTK25-V)
DVD	Digital Versatile Disc
$\varepsilon$	Komponentenverhältnis (= $Q/I$ )
$\varepsilon, \varepsilon_n$	dielektrische Permittivität ( $n = 0$ : Luft, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
E	Dosisleistung am Erdboden
e	Basis des natürlichen Logarithmus ( $1/e \approx 0.37$ )
EDWI	ICAO-Flughafen-Code: Wilhelmshaven-Mariensiel
EM	Elektromagnetik
eTh	Äquivalentgehalt von Thorium
eU	Äquivalentgehalt von Uran
EU	Europäische Union
F	IGRF
f	Frequenz
FAS	Fugro Airborne Surveys (heute: CGG)
FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik
G	Verstärkungskonstante des Gammastrahlenspektrometers
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
h	Höhe des EM-Systems in Meter über der Erdoberfläche (Birdhöhe)

---

H_GPS	GPS-Höhe des Hubschrauber
h_GPS	GPS-Höhe der Flugsonde
h_GPS_kor	korrigierte GPS-Höhe der Flugsonde
h_kpa	barometrischer Höhenkanal
h_l	Laserhöhe der Flugsonde
h_l_kor	korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_l_DEM_kor	bezüglich eines DEM korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_r	Radarhöhe der Flugsonde
h <sub>0</sub>	Normhöhe des Spektrometers (h <sub>0</sub> = 80 m)
HCP	horizontal-koplanar
h <sub>e</sub>	effektive Höhe
HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HMG	Hubschraubermagnetik
hPa	Hektopascal
h <sub>r</sub>	Höhe des Hubschraubers
HRD	Hubschrauberradiometrie
Hz	Hertz
IAEA	International Atomic Energy Association
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
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
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation
I <sub>noise</sub>	Fehler der Inphase-Komponente
J <sub>0</sub>	Bessel-Funktion (1. Art, 0. Ordnung)
K	Grad Kelvin
K	Kalium
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
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
log	Logarithmus

$\mu$	Absorptionskoeffizient
$\mu, \mu_n$	magnetische Permeabilität ( $n = 0$ : Luft, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am)
$\mu\text{R/h}$	Mikroröntgen pro Stunde
m	Meter
m NHN	Meter über Normalhöhennull
MeV	Megaelektronenvolt
MHz	Megahertz
ms	Millisekunde
mxd	ArcGIS-Datenformat
NO, NW	Nordosten, Nordwesten
N	Anzahl Frequenzen
n	Laufparameter (Modellparameter)
$N_c$	Zählrate der Hintergrundstrahlung
NaI	Natriumiodid
NASVD	noise adjusted singular value decomposition
NHN	Normalhöhennull (Höhe nach DHHN92)
NL	nicht-linear
$N_L$	Anzahl Schichten
$N_m$	Zählraten $N_{\text{Th(corr)}}$ , $N_{\text{U(corr)}}$ , $N_{\text{K(corr)}}$ und $N_{c,\text{TC}}$ 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 STP-Bedingungen korrigierte Zählraten ( $x = K, U, \text{Th}$ )
$N_{x(\text{corr})}$	bzgl. der Einstreuraten korrigierte Zählraten ( $x = K, U, \text{Th}$ )
O	Osten
$\Omega\text{m}$	Ohmmeter ( $\text{Ohm} \cdot \text{m}$ )
$\omega$	Kreisfrequenz
$\pi$	Kreiszahl (= 3,14159265...)
P	im Hubschrauber gemessener Luftdruck
p	Skintiefe
$P_0$	mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe ( $P_0 = 101,325$ kPa)
PC	Personalcomputer
PDF	Portable Document Format
ppm	parts per million
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
$Q_c$	berechnete Quadrature-Komponente
$Q_{\text{noise}}$	Fehler der Quadrature-Komponente
QCP, QCPM	Datenqualitätsparameter und -marker

---

$\rho, \rho_n$	spezifischer (Schicht-)Widerstand ( $n = 0$ : Luft, $\rho_0 > 10^8 \Omega\text{m}$ )
$\rho_a$	scheinbarer spezifischer Widerstand
$\rho_w$	scheinbarer spezifischer Widerstand von (Meer-)Wasser
$r$	Abstands- oder Ortsparameter
$R_1$	komplexer Reflexionsfaktor
$R_n$	Radon
$S$	Sensitivität
$s$	Sekunde
$\text{SHP}$	Shaft Horse Power
$\text{SO, SW}$	Südosten, Südwesten
$\text{STD}$	Gesamtrauschen (Summe aller rel. STF)
$\text{STP}$	Standardbedingungen (Standardtemperatur und -druck)
$\text{STF}$	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
$\text{TC}$	Gesamtstrahlung
$\text{Th}$	Thorium
$\text{Tl}$	Thallium
$t_L$	aktive Registrierzeit des Spektrometers
$\text{topo}$	topografische Höhe
$U$	Uran
$U_R$	Anteil Radon im Urkanal
$\text{USB}$	Universal Serial Bus
$\text{UTC}$	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
$V$	Volt
$\text{VCX}$	vertikal-koaxial
$V_m$	Voltmeter
$\text{VRS}$	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
$V_s$	Voltsekunde
$W$	Westen
$\text{WGS}$	World Geodetic System
$X, Y, Z$	kartesische Koordinaten, $X = N$ , $Y = O$ , $Z = \text{Tiefenachse}$
$\text{xyz}$	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) führte von 2008 bis 2014 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 statt.

Die letzten im Rahmen des D-AERO-Projektes beflogenen Messgebiete umfassen Teile der Ostfriesischen Inseln Baltrum und Langeoog. Die Gebietsgrößen betragen etwa 4 km<sup>2</sup> bzw. 10 km<sup>2</sup> und beinhalten Gesamtprofilängen von etwa 17 km bzw. 40 km. Die 6 bzw. 5 W-O Messprofile wurden in einem Abstand von 250 m beflogen. Zur Abdeckung der beiden Messgebiete war nur ein Messflug notwendig, der durch einen zweiten Hubschrauber mit einem Filmteam begleitet wurde, um einen Beitrag für die ZDF-Sendung „Terra X“ zu produzieren.

Ziel der Befliegung Baltrum / Langeoog 2 war es, zum Verständnis der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse beizutragen. Dabei lag der Fokus auf der Abschätzung des Gefährdungspotentials für die Versalzung der Süßwasservorkommen auf den Inseln. Die Ergebnisse können damit auch zur zukünftigen nachhaltigen und wirtschaftlichen Nutzung verwendet werden, z. B. der Wasserentnahme aus den Süßwasservorkommen sowie der Auswirkungen 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 Fluge gemessenen Daten benötigt werden.

Während des Fluges wurden die HEM- und HMG-Daten zehnmal und die HRD-Daten einmal pro Sekunde aufgezeichnet, was auf einen Messpunktabstand von etwa 3–4 m bzw. 30–40 m führte. Die mittlere Höhe der Flugsonde lag bei etwa 48 m über Gelände. Die Flugsonde befand sich während der Messung im Mittel etwa 40 m unter dem Hubschrauber. Die Messdaten und die dazugehörigen Positionsdaten wurden im Flug auf einer CF-Karte gespeichert und unmittelbar nach der Befliegung einer ersten Qualitätskontrolle unterzogen. Die vorläufige Datenverarbeitung im Gelände beschränkte sich auf die flugweise Darstellung der Rohdaten der Magnetik (Totalfeld in nT), 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“, der im Rahmen des Projektes „D-AERO-Auswertung“ erstellt worden ist, 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, die in Form von farbigen Isolinienplänen mit unterlegter Topografie vorliegen, sind im Maßstab 1:25.000 erstellt worden:

- Fluglinienkarte der vermessenen Profile (Ist-Flugwege),
- Digitales Geländemodell,
- Scheinbare spezifische Widerstände (Halbraumwiderstände) und Schwerpunktstiefen für sechs Messfrequenzen 387, 1.820, 5.400, 8.370, 41.420 und 133.200 Hz,
- Spezifische Widerstände in den Tiefen 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 und 60 m unter NHN, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten,
- Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes,
- Gesamtstrahlung, Gehalte von Kalium im Boden, Äquivalenzgehalte von Thorium und Uran im Boden, und Dosisleistung am Boden.

Ferner sind für alle Fluglinien Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes im Maßstab 1:10.000 erstellt worden.

Die Ergebnisse dieser sowie älterer Befliegungen in Deutschland sind in die Geodateninfrastruktur der BGR (abrufbar über [Produktcenter](#) und [Geoviewer](#)) sowie in das Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des LIAG eingestellt 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.

Bei Nordseeinseln, wie beispielsweise Baltrum oder Langeoog, kann ein potenzieller Meeresspiegelanstieg zu besonders drastischen Konsequenzen führen, da kein Ausweichen in höher gelegene Regionen möglich ist. Ein höherer Meeresspiegel würde somit einerseits die Gefahrenlage bei Sturmfluten erhöhen und insbesondere die Trinkwassergewinnungsgebiete bedrohen, und andererseits das Volumen der Süßwasserlinsen durch Verschiebung der Salz-/Süßwassergrenzen verringern. Bei beiden Inseln gab es in der Vergangenheit solch dramatische Überflutungsereignisse, zuletzt auf Baltrum im Jahr 1962 (Post & Houben, 2017).

Als technisch-wissenschaftliche Oberbehörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) führte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Rahmen des Projektes „Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche“ (D-AERO) flächenhafte Befliegungen an der deutschen Nordseeküste durch, die 2014 abgeschlossen wurden. In den Jahren 2008 und 2009 unterstützte das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) das BGR-Projekt durch Mitfinanzierung der BGR-Befliegungen (Wiederhold et al., 2010). Hierbei standen drei Regionen im Vordergrund:

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

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

Das erste Untersuchungsgebiet war die Insel Borkum (Siemon et al., 2009), 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 (Sulzbacher et al., 2012).

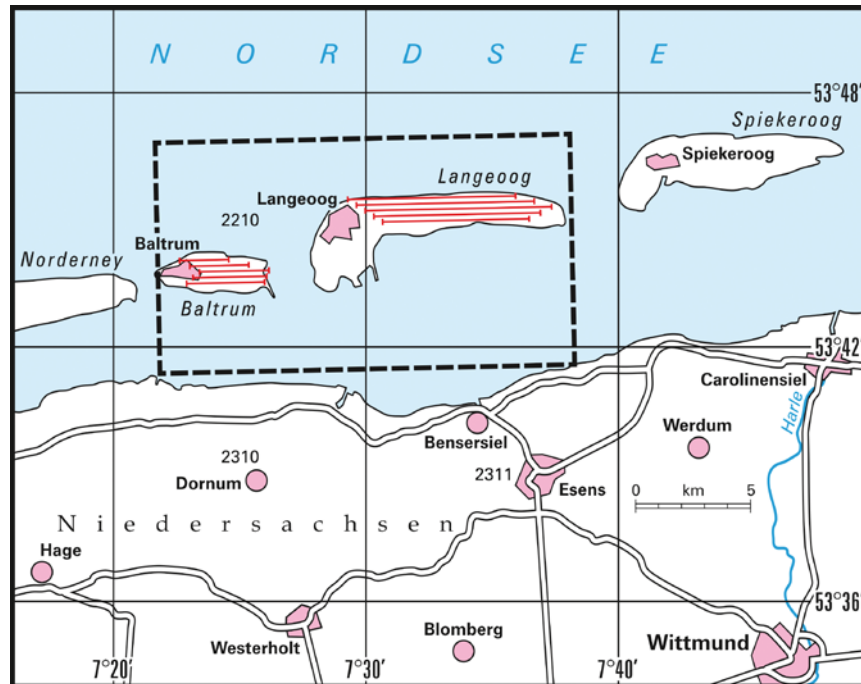
In den Jahren 2008 und 2009 folgten dann die Messgebiete Langeoog (Voß et al., 2015), Esens (Siemon et al., 2014a) und Glückstadt (Steuer et al., 2013). Hier konnten grundwasserführenden Schichten, Grundwasserstauer und mögliche Versalzungszonen kartiert werden (Siemon et al., 2012; Siemon et al., 2015; Steuer et al., 2010). Als vorläufig letztes Gebiet wurde in 2009 und 2010 das Messgebiet Nordenham (Miensopust et al., 2014) befliegen. Nach Wiederinbetriebnahme des Messhubschraubers im Jahr 2012 konnten im Frühjahr 2014 auch die bereits eingeplanten Gebiete Jever (Siemon et al., 2014a) und Varel (Siemon et al., 2014b) westlich und südlich des Jadebusens nachgeholt werden.

Der aktuelle Bericht wurde im Rahmen des Projektes D-AERO-Auswertung erstellt und beschreibt die Durchführung und Auswertung der aerogeophysikalischen Vermessung über den Ostfriesischen Inseln Baltrum und Langeoog. Während Baltrum erstmalig befliegen worden ist, sind über Langeoog einige Messprofile ergänzt worden. Die Vermessung beider Inseln erfolgte mit nur einem Messflug, der zudem auch noch zwei Ergänzungsprofile im Messgebiet Varel enthält.

Die Befliegung mit dem BGR-Hubschrauber über der Insel Langeoog wurde in Absprache mit der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer durch einen zweiten Hubschrauber mit einem Filmteam der Firma **colourFIELD** begleitet, die einen Beitrag für die ZDF-Sendung „Terra X“ produzierte (**Erstsendung: 31.05.2015**).

### 3. Das Messgebiet

Das Messgebiet Baltrum/Langeoog 2 liegt an der deutschen Nordseeküste und erfasst Teile der beiden Ostfriesischen Inseln Baltrum und Langeoog (**Abbildung 1**). Es erstreckt sich von etwa 7°22' bis 7°37' östlicher Länge und 53°43' bis 53°46' nördlicher Breite.



**Abbildung 1:** Lageskizze der Messgebiete Baltrum und Langeoog

Die Befliegung des Messgebietes mit drei geophysikalischen Verfahren (Elektromagnetik, Magnetik, Radiometrie) wurde von dem Hubschrauberteam der BGR am 1. Oktober 2014 mit einem Messflug, der vom Flughafen (JadeWeserAirport) in Wilhelmshaven-Mariensiel (EDWI) aus startete, durchgeführt. Die Lage der Messprofile auf Baltrum bzw. Langeoog beschränkte sich aufgrund von Auflagen der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer auf den Inselbereich. Da über Langeoog bereits in 2008/09 eine Befliegung stattfand (Voß et al., 2015), ist das Messgebiet als Langeoog 2 bezeichnet worden. Auf Baltrum sind insgesamt 5 W–O-Profile im Abstand von 250 m geflogen worden, wobei das nördlichste Profil doppelt erfasst wurde. Auf Langeoog sind insgesamt 4 W–O-Profile im Abstand von 250 m geflogen worden und zusätzlich ein Überführungsprofil in nahezu W–O-Richtung. Somit ergaben sich in den Teilmessgebieten Baltrum und Langeoog 2 Gesamtlängen von 17 bzw. 40 Profilkilometern und Flächen von etwa 4 bzw. 10 km<sup>2</sup>. Da für die Vermessung der beiden Inseln nur etwa eine Stunde benötigt wurde, konnte der Messflug im Gebiet Varel fortgesetzt werden, wo noch einige Messprofile ausstanden (Siemon et al., 2014c). Mit dem Messflug wurde 342 km weit geflogen und 89.290 Messpunkte erfasst, was einer Gesamtregistrierzeit von knapp 2,5 Stunden entspricht.

Die Messprofile sind durch L\*.1 (Baltrum) und T10\*.9 (Langeoog 2) gekennzeichnet. Die W–O-Profile auf Langeoog sind in Anlehnung an die vorhergehende Befliegung als Kontrollprofile deklariert worden. Profile, die wiederholt bzw. zusätzlich geflogen wurden, sind durch L\*.2 bzw. T\*.8 gekennzeichnet. Zu Beginn des Messfluges wurde in Messflughöhe die Fahrrinne der Jade und am

Ende des Messfluges ein etwa 2 km langer Abschnitt auf dem Flughafen parallel zur Landebahn als Referenzstrecken für Kalibrierzwecke überflogen. Die Bodenstation zur Aufzeichnung der magnetischen Tagesvariationen wurde auf dem Flughafengelände aufgestellt bei 8°03'31" östlicher Länge und 53°30'47" nördlicher Breite. Einzelheiten zum Messgebiet und dem Messflug können der **Tabelle 1** und **Tabelle A-1** im **Anhang I** entnommen werden. Alle Karten in diesem Bericht haben als Hintergrund georeferenzierte Rasterdaten der Topographischen Karte 1:25.000 (DTK25-V).

**Tabelle 1:** Technische Daten der Befliegung Baltrum / Langeoog 2

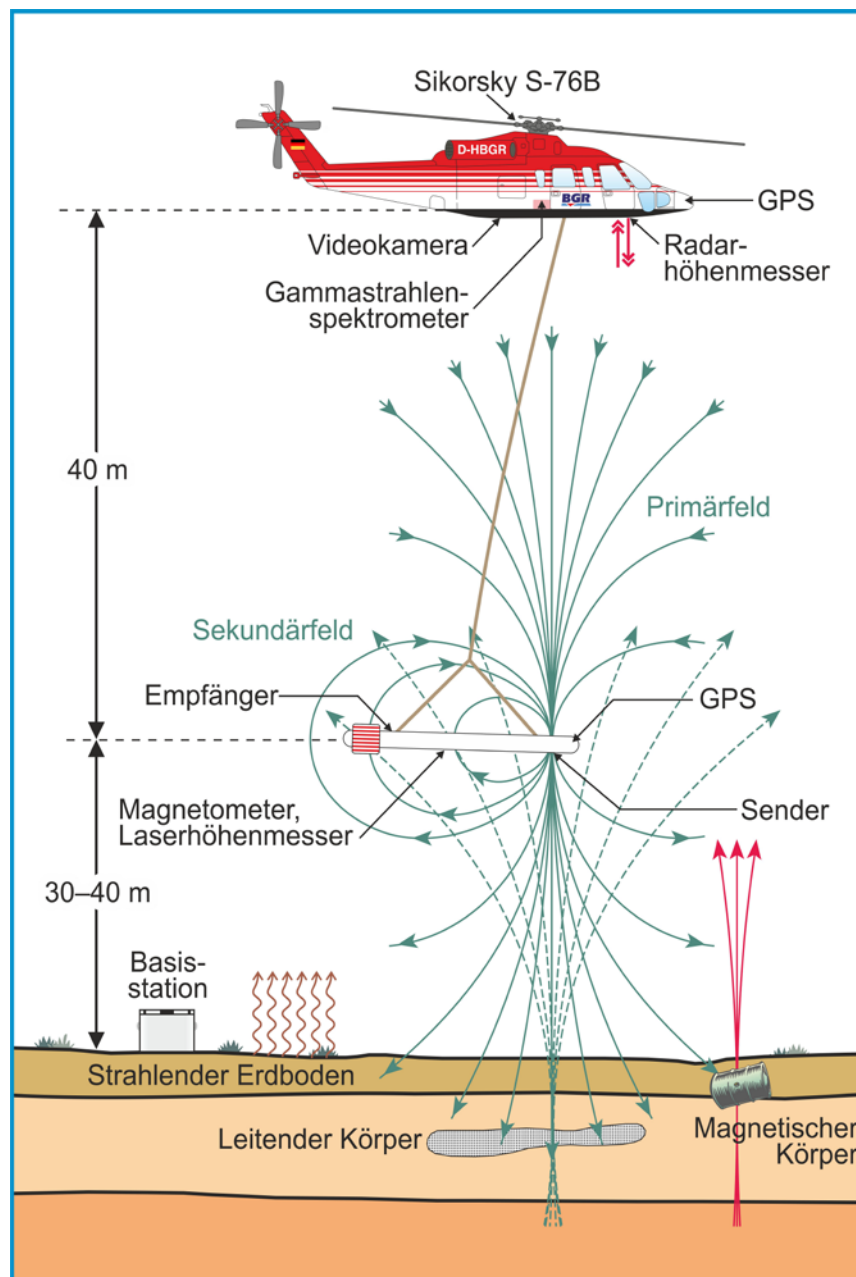
Messgebiete BGR-Gebietsnummern	Baltrum 155	Langeoog 2 149
Befliegungszeitraum	01.10.2014	
Größe des Messgebietes	4 km <sup>2</sup>	10 km <sup>2</sup>
Gesamtprofilkilometer:	17 km	40 km
Gesamtanzahl der Messpunkte	89.290	
Zahl der Messflüge	1	
Bezeichnung der Messflüge	15501	
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	48 m	48 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit über Grund	136 km/h	115 km/h
Mittlerer Messpunktabstand	3,8 m	3,2 m
Zahl der Messprofile	5 + 1	4 + 1
Länge der Messprofile	2,5–3,5 km	7,5–8,3 km
Richtung der Messprofile	90° bzw. 270°	90° bzw. 270°
Abstand der Messprofile	250 m	250 m
Zahl der Sonderprofile „Referenzstrecken“	1	1

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung der Gebiete keine besonderen Ansprüche an den eingesetzten Piloten (M. Klenke, HeliJet Charter GmbH). Die zum Teil geringen Störungen der Messungen, z. B. durch Stromleitungen, Straßen oder über Ortschaften, beeinträchtigten die Qualität der Messdaten, die aber – abgesehen von Systemausfällen – generell gut ist.

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 der Messgebiete lag sie bei etwa 48 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.

#### 4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR

Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR erfasst Daten für die 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 (Abbildung 2).



**Abbildung 2:** 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 **Tabelle 2**) angeschafft und der BGR als Messhubschrauber zur Verfügung gestellt. Im November 2013 wurde der Hubschrauber an die BGR als nachgeordnete Behörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) übergeben.

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

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

Die geophysikalischen Messgeräte werden zentral durch das HeliDAS-System (**Kapitel 4.7**) 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.



**Tabelle 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; in 2013 übernommen von CGG (Compagnie Générale de Géophysique)
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Resolve BGR, BKS36a (intern: 61)
	<b>II. Cäsiummagnetometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung des erdmagnetischen Totalfeldes
	<b>Hersteller</b>	Geometrics, USA
Hubschrauber	<b>Gerätebezeichnung</b>	G-822A
	<b>III. Gammastrahlenspektrometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
	<b>Hersteller</b>	Radiation Solutions Inc., Kanada
<b>Gerätebezeichnung</b>	Spektrometer: RS-500 (inklusive Kristalldetektor: RSX-5)	

### 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. **Abbildung 2**).

Bei dem hier verwendeten HEM-System wird für jede der sechs Messfrequenzen im Bereich von 387 Hz bis 133 kHz (BKS36a, **Tabelle 4**) ein eigenes Spulensystem benutzt, das aus horizontal-koplanar bzw. vertikal-koaxial angeordneten Sende-, Empfangs-, Kompensations- und Kalibrierspulen besteht.

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

**Tabelle 4:** HEM-Systemparameter für BKS36a

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
387	7,938	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.820	7,931	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
5.400	9,055	vertikal-koaxial	EM_6	3. Frequenz
8.370	7,925	horizontal-koplanar	EM_2	4. Frequenz
41.420	7,912	horizontal-koplanar	EM_1	5. Frequenz
133.200	7,918	horizontal-koplanar	EM_4	6. Frequenz

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 387 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 Daten der niedrigen Messfrequenzen 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 (**Tabelle 3**) gemessen und in der Einheit Nanotesla (nT) angegeben. Die Funktion eines Cs-Magnetometers basiert auf der Messung der so genannten 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 gut 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 (**Tabelle 5**). Sie zeichnet im Regelfall an einem magnetisch ungestörten Ort in der Nähe des Messgebietes die tageszeitlichen Variationen auf, welche zur Korrektur der in der Flugsonde aufgenommenen magnetischen Daten verwendet werden. Zur zeitlichen Synchronisation der Messreihen wird an der Bodenstation die GPS-Zeit mitregistriert.

**Tabelle 5:** *Bodenstation*

<b>Bodenstation</b>	
<b>Aufgabe</b>	Automatische Registrierung des magnetischen Totalfeldes
<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 (**Tabelle 3**). Zur Verwendung kommt ein digitales Gammastrahlenspektrometer neuester Bauart vom Typ RS-500 der Firma Radiation Solutions (Kanada). Der Kristalldetektor vom Typ RSX-5 besteht aus fünf Natriumiodid(NaI)-Kristallen. Das komplette Spektrometer ist in einem Leichtgewichtgehäuse aus Carbonfaser mit geringer Dämpfung eingebaut und fest im Hubschrauber montiert. Jeder der NaI-Kristalle hat ein Volumen von 4 Litern. Vier der Kristalle registrieren die von unten und von den Seiten einfallende Strahlung, der fünfte Kristall dient zur Aufzeichnung der von oben eintreffenden Strahlung. Eintretende Gammastrahlung wird durch die Kristalle absorbiert und dabei in Lichtimpulse umgewandelt. Diese werden über Photovervielfacherrohren in elektrische Impulse gewandelt, wobei die Amplitude der Impulse proportional zur Energie der einfallenden Gammastrahlung ist. Die Umwandlung erfolgt über fünf separate 60 MHz A/D-Wandler und Signalprozessoren. Das Spektrometer besitzt einen Spektralbereich von 0 bis 3 MeV, der in 1024 Kanäle aufgeteilt ist. Jeder Impuls des Detektors wird dem entsprechenden Spektralkanal zugeordnet und gezählt. Zusätzlich wird die Intensität der Höhenstrahlung (3 bis 6 MeV) in ei-

nem separaten Kanal registriert (**Tabelle 6**). Die Stabilisierung des Spektrometers erfolgt während des Messbetriebs laufend automatisch über einen statistischen Vergleich der aufgenommenen Spektren mit einem intern gespeicherten Referenzspektrum. Für geowissenschaftliche Untersuchungen sind insbesondere die Zählraten der natürlich vorkommenden Radionuklide (bzw. deren Isotope oder Tochterprodukte) Kalium (K-40), Uran (Bi-214) und Thorium (Tl-208) von Interesse. Der nach oben ausgerichtete Kristall ist gegen von unten eintreffende Strahlung abgeschirmt und dient zur Erfassung der Strahlung, die von radioaktivem atmosphärischem Radongas ausgeht und bei der Bestimmung der natürlichen Radionuklide im Boden störend wirkt.

**Tabelle 6:** *Energiebereiche und Kanalzuordnungen registrierter Strahlungsquellen (Spektrometer RS-500, reduziert auf 256 Kanäle)*

Strahlungsquelle	Energiebereich in MeV	Energiepeak in MeV	Kanäle
Gesamtstrahlung	0,41–2,81	—	34–235
Kalium (K-40)	1,37–1,57	1,46	115–131
Uran (Bi-214)	1,66–1,86	1,76	139–155
Thorium (Tl-208)	2,41–2,81	2,62	201–235
Höhenstrahlung	3,0–6,0	—	256

Das Gammastrahlenspektrometer summiert die Spektren über jeweils eine Sekunde auf, daher wird als Einheit für die Zählraten cps (*counts per second*) verwendet. Für die Datenerfassung mit dem HeliDAS-System (**Kapitel 4.7**) werden die 1024-kanaligen Spektren auf 256 Kanäle abgebildet. Mit diesen Daten erfolgt die Standardprozessierung. Für spezielle Anwendungen kann auch auf die vollen 1024-kanaligen Spektren zugegriffen werden, welche auf einen USB-Stick gespeichert werden. **Tabelle 6** zeigt die Zuordnung der Strahlungsquellen zu den Kanälen in den aufgezeichneten Spektren. Die Aufzeichnung des Energiebereichs von Uran erfolgt getrennt für die nach unten gerichteten und den nach oben gerichteten Kristallen.

#### 4.6. Navigations- und Positionierungssystem

Ein GPS-Empfänger, dessen Antenne außen am Hubschrauber montiert ist, liefert laufend Positionsangaben an das Navigationssystem. Die GPS-Daten werden zusammen mit den geophysikalischen Daten im HeliDAS-System (**Kapitel 4.7**) gespeichert.

Aufgabe des Navigationssystems (**Tabelle 7**) ist es, dem Piloten alle zur Durchführung eines Messfluges notwendigen Informationen zur Verfügung zu stellen. Hierzu werden zunächst mit dem Programm LiNav von AG-NAV Inc. die Koordinaten der Anfangs- und Endpunkte sämtlicher Mess- bzw. Kontrollprofile aus den Messgebietsgrenzen, der Profilrichtung und dem Abstand der Messprofile berechnet. Diese werden 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.

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

**Tabelle 7:** Navigations- und Positionierungssysteme

Systeme zur Navigation und Positionierung		
<b>Hubschrauber</b>	<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
<b>Flugsonde</b>	<b>Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)</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

Die genaue Höhe der Flugsonde (**Tabelle 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 den Abstand bis zu den Baumkronen.

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

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

**Tabelle 8:** Höhenmesser

Höhenmesser		
<b>Hubschrauber</b>	<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 NNH
	<b>Hersteller</b>	FAS, Kanada
<b>Flugsonde</b>	<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

Die Erfassung und Aufzeichnung der geophysikalischen und Positionsdaten erfolgt über das HeliDAS-System (**Tabelle 9**). Die Daten werden auf einer Compact Flash (CF) Karte gespeichert. Das HeliDAS-System ist mit zwei Tablett-Computern verbunden. Auf diesen werden während des Messfluges die eingehenden Mess- und Positionsdaten grafisch dargestellt. Die Darstellungen dienen dem Operator zur Kontrolle der Messdaten und dem Navigator zur Kontrolle des Flugweges.

**Tabelle 9:** Datenerfassung und -aufzeichnung

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

#### 4.8. Videosystem

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

#### 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 (**Tabelle 10**). Die Steuerungs- und Aufzeichnungsgeräte des aerogeophysikalischen Messsystems befinden sich in einem 19-Zoll-Geräteschrank. Der Geräteschrank ist über Schwingungsdämpfer mit einer Metallplatte verbunden, die fest mit dem Boden des Hubschraubers verschraubt ist.

**Tabelle 10:** Sonstige Ausrüstung

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

## 5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten

Die Ziele der Datenverarbeitung können wie folgt zusammengefasst werden:

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

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

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

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

Für die Magnetik und Radiometrie gelten analoge Auswertungsebenen. Der wesentliche Unterschied in den ersten drei Ebenen (Level) besteht darin, dass für HMG und HRD keine 1D-Inversionen durchgeführt und somit auch keine 1D-Modelle als Karten oder 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. Diese Feldprozessierung enthält nur wenige grundlegende Bearbeitungsschritte und stellt die Rohdaten grafisch dar (Level 1 in **Tabelle 11**).

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

Die Bearbeitung der Positionsdaten erfolgt vor der Auswertung der geophysikalischen Daten und wird mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft sowie ergänzenden eigenen Programmen vorgenommen.

### 5.2.1. GPS-Koordinaten

Die während des Fluges registrierten Koordinaten, die die Positionen des Hubschraubers und der Flugsonde angeben, beziehen sich auf das WGS84-System. Diese geografischen Koordinaten 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 Baltrum / Langeoog 2 sind auf 3°-Gauß-Krüger-Koordinaten (Germany Zone 3, DHDN, Bessel 1841 Ellipsoid) bezogen.

Von dem im Hubschrauber installierten GPS-Empfänger werden laufend GPS-Rohdaten aufgezeichnet. Diese Rohdaten eignen sich dazu, in einer Nachprozessierung wesentlich genauere Positionen (im Allgemeinen <0,3 m) zu erhalten. Die Nachprozessierung der GPS-Rohdaten erfolgt über den Web-Dienst *Precise Point Positioning* des geologischen Dienstes von Kanada (*Natural Resources Canada*). Die vom Dienst gelieferten Ellipsoidhöhen der präzisen Koordinaten werden unter Verwendung des Geoid-

undulationsmodells EGM2008 (Pavlis et al., 2012) auf in der Kartografie übliche Geoidhöhen umgerechnet und anschließend ebenfalls in das lokale Gauß-Krüger-Koordinatensystem transformiert.

Für die Flugsonde stehen nicht alle GPS-Parameter, die für die oben beschriebene Korrektur notwendig sind, zur Verfügung, daher konnten lediglich fehlerhafte Bezugswerte korrigiert werden, um die Höhe der Flugsonde anzupassen.

Aus der Differenz der korrigierten GPS-Höhen des Hubschraubers ( $H_{GPS}$ ) und der Flugsonde ( $h_{GPS}$ ) wird die effektive Kabellänge ( $c_1$ ) berechnet:

$$c_1 [m] = H_{GPS} [m \text{ NHN}] - h_{GPS} [m \text{ NHN}].$$

Im weiteren Verlauf der Auswertung wurde die GPS-Höhe der Flugsonde unter Verwendung eines digitalen Geländehöhenmodells (DEM, hier: DGM-D25, BKG) und der gemessenen Laserhöhen ( $h_{GPS\_kor}$ , siehe **Kapitel 5.2.3**) korrigiert. Hierzu wurden die topografischen Höhen aus den Messdaten abgeleitet (siehe **Kapitel 5.2.5**) und mit dem Geländemodell verglichen. Die geglättete Differenz aus beiden diente schließlich als Korrektur. Im Mittel lag die effektive Kabellänge im Messgebiet bei  $c_1 = 39,5$  m.

### 5.2.2. Radarhöhen

Die Radarhöhenwerte, die vom Hubschrauber aus gemessen werden, sind nur bis 2010 der Datenerfassung zugeführt worden. Daher wurden bei der Befliegung Baltrum / Langeoog 2 neue Höhen, die der Radarhöhe der Flugsonde entsprechen sollen, aus der Differenz der korrigierten GPS-Höhen der Flugsonde ( $h_{GPS\_kor}$ ) und einem digitalen Geländemodell (DEM) berechnet:

$$h_r [m] = h_{GPS\_kor} [m \text{ NHN}] - DEM [m \text{ NHN}].$$

### 5.2.3. Laserhöhen

Die mit einem Laserhöhenmesser gemessenen Höhen der Flugsonde über Gelände können Fehler (Ausreißer, Lücken) enthalten, die linear interpoliert werden. Ferner können zu große Werte (z. B. durch Neigung oder seitliche Auslenkung der Flugsonde) oder zu kleine Werte (z. B. durch Bewuchs oder 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 ( $\Delta h_{l\_noise}$ ) und der Maximalwerte ( $\Delta h_{l\_max}$ ) der reduzierten Laserhöhe in vorgegebenen Intervallen mit Fensterbreiten von jeweils 7 bzw. 21 Messwerten, wobei einzelne Ausreißer der Standardabweichung durch Anwendung eines schmalen (2 Werte) nicht-linearen (NL) Filters eliminiert werden. Anschließend werden die reduzierten Laserhöhenwerte, nach der Entfernung einzelner Ausreißer (NL-Filter mit einem Wert), durch die Maximalwerte ersetzt, falls die Abweichung beider Werte zu groß (2 m) ist und die Standardabweichung über einem vorzugebenden Schwellwert (0,2) 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 = 1 s, d. h. 10 Werte) der korrigierten reduzierten

Laserhöhe ( $\Delta h_{l_{kor}}$ ) und die Addition der Basislinie, um die korrigierte Laserhöhe ( $h_{l_{kor}}$ ) zu erhalten. **Tabelle 13** fasst die verwendeten Filterparameter zusammen. Die zur Orientierung (in Klammern) angegebenen Umrechnungen der Filterlängen von Sekunden bzw. Werten in Meter erfolgte unter Annahme eines mittleren Punktabstandes von 4 m. Sollten die wahren mittleren Punktabstände (vgl. **Tabelle 1**) hiervon abweichen, ergeben sich andere Meterangaben.

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

Filter	Filterparameter	Bezugsparameter
Tiefpass	Abschneideperiode: 5 s ( $\approx$ 200 m)	$h_l$
Standardabweichung	Filterlänge: 7 Werte ( $\approx$ 28 m)	$\Delta h_l$
Nicht-linear	Filterlänge: 2 Werte ( $\approx$ 8 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 ( $\Delta h_{l_{noise}}$ ): 0,2 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: 1 s ( $\approx$ 40 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 (durchschnittlich etwa  $10^\circ$ ) verursachten Laserhöhen sind leicht durch Anwendung der Kosinusfunktion zu korrigieren. Schwieriger ist es jedoch, die Fehler, die durch Pendelbewegungen verursacht sind, zu reduzieren. Das Nachschleppen der Flugsonde an einem etwa 45 m langen Seil in Verbindung mit Flugmanövern und Wind führt zu Pendelschwingungen senkrecht (bei Richtungsänderungen) und parallel (bei Geschwindigkeits- oder Höhenänderungen) zur Flugrichtung. Folglich werden die tatsächlichen (senkrechten) Abstände zum Erdboden überschätzt, da die Flugsonde nicht exakt horizontal hängt und somit der Laserstrahl nicht vertikal nach unten zeigt. Bei Auslenkungen unterhalb von  $10^\circ$  ergeben sich Fehler bis zu 0,5 m je 30 m Höhe der Flugsonde über Grund. Bei größeren Auslenkungen können allerdings auch Fehler von mehreren Metern entstehen. Die Schwingungsperioden liegen vor allem bei etwa 3 s bzw. 13 s, die durch die halbe Länge der Flugsonde bzw. durch die Länge des Schleppseils hervorgerufen werden. Eine Korrektur ohne gemessene Lageparameter ist nur näherungsweise möglich. Prinzipiell können die Auslenkungswinkel und somit der Höhenfehler aus dem Verhältnis aus berechneter und gemessener Laserhöhe abgeschätzt werden. Hierzu muss die GPS-Höhe der Flugsonde gut bestimmt sein. In hügeligen Messgebieten wirken sich die Schwankungen des Messsystems besonders deutlich aus, da der Laserstrahl auch bei horizontaler Lage der Flugsonde nicht senkrecht auf den Erdboden auftrifft. Folglich können bereits bei geringen

Neigungen der Flugsonde erheblich größere Fehler bei der Abstandsmessung zwischen Flugsonde und Erdboden auftreten als in flachem Gelände.

Aufgrund der oben genannten Schwierigkeit wurden im Messgebiet Baltrum / Langeoog 2 die Laserhöhen der Flugsonde neu berechnet aus der Differenz der korrigierten GPS-Höhe der Flugsonde ( $h_{\text{GPS\_kor}}$ ) und einem Geländemodell (siehe **Kapitel 5.2.5**):

$$h_{\text{l}_{\text{DEM\_kor}}} [\text{m}] = h_{\text{GPS\_kor}} [\text{m NHN}] - \text{DEM} [\text{m NHN}].$$

#### 5.2.4. Barometrische Höhen

Die barometrische Höhe  $k_{\text{pa}}$  (in hPa) des Hubschraubers wird durch einen Druckmesser erfasst. Mit Hilfe der barometrischen Höhenformel können die Druckwerte (in hPa) in eine Höhe (in m NHN) transformiert werden:

$$h_{\text{kpa}} [\text{m NHN}] = (1 - (10 \cdot k_{\text{pa}} [\text{hPa}] / P_0 [\text{hPa}])^{0,19}) \cdot T_0 [\text{K}] / G[\text{K/m}]$$

mit  $P_0 = 1013,25 \text{ hPa}$ ,  $T_0 = 288,15 \text{ K}$ ,  $G = 0,0065 \text{ K/m}$ . Anschließend wurde dieser barometrische Höhenkanal mit einem Tiefpass-Filter über 5 s (50 Werte) geglättet und eine Trendkorrektur aufgrund von Luftdruckänderungen angebracht. Die Trendkorrektur basiert auf der mittels mit einem Spline-Filter (Glätte 0,7, Spannung 0,5) geglätteten Differenz aus  $h_{\text{kpa}}$  und  $H_{\text{GPS}}$ .

#### 5.2.5. Topografische Höhen

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

$$\text{topo} [\text{m NHN}] = h_{\text{GPS}} [\text{m NHN}] - h_{\text{l}_{\text{kor}}} [\text{m}].$$

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

Aufgrund der Pendelbewegungen der Flugsonde sind die Laserhöhenwerte oft ungenau und somit auch das daraus abgeleitete Geländemodell. Daher wurde als Geländemodell (DEM) das DGM-D25, herausgegeben vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), verwendet.

Dieses wurde auch genutzt, um die GPS-Höhen der Flugsonde (siehe **Kapitel 5.2.1**) zu korrigieren, indem die mit einem Spline-Filter (Glätte 1,0, Spannung 0,5) geglättete Differenz:

$$\text{DH} [\text{m}] = \text{DEM} [\text{m NHN}] - \text{topo} [\text{m NHN}].$$

an die GPS-Höhe angebracht wurde:

$$h_{\text{GPS\_kor}} [\text{m NHN}] = h_{\text{GPS}} [\text{m NHN}] + \text{DH} [\text{m}].$$

### 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 bis Level 3 (**Tabelle 11**) mehrere Bearbeitungsschritte:

- Berücksichtigung der Kalibrierung;
- Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur;
- Datenauswahl und -korrektur;
- Korrektur von anthropogenen Effekten;
- Transformation in Halbraumparameter;
- Statistische Niveauekorrektur;
- 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.

Die grundlegenden Datenverarbeitungsschritte wurden mit einer eigenen Software (HemView) durchgeführt und alle notwendigen Parameter in Konfigurationsdateien abgelegt. Da aber die HEM-Daten einer Messfrequenz (1.820 Hz) nicht brauchbar und daher neue Bearbeitungsschritte erforderlich waren, wurde die finale Bearbeitung mit Geosoft Oasis montaj fortgeführt. Die gesonderte Behandlung dieser Daten ist am Ende von **Kapitel 5.3.9** beschrieben.

#### 5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems

Das HEM-System wurde von dem Hersteller Fugro Airborne Surveys (FAS) 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

(I = Q) lassen sich mit diesen externen Kalibrierspulen Signale bekannter Größe in den Empfängern erzeugen. Diese Kalibrierwerte werden benutzt, um die I- und Q-Werte in ppm anzugeben.

Zu Beginn eines Messfluges werden in großer Flughöhe die durch die internen Kalibrierspulen hervorgerufenen Ausschläge überprüft und das Messsystem wird automatisch anhand von Sollwerten (**Tabelle 13**) nachjustiert (Autokalibrierung). 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.

Bei der Kalibrierung am Boden sind Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht auszuschließen. Daher wurden die Kalibrierfaktoren beim Beginn des Messfluges über Salzwasser im Jadebusen überprüft. 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  $\rho_w \approx 0,25 \Omega\text{m}$  (bei einer Wassertemperatur von etwa 10°C) und der Laserhöhe, verglichen und angepasst.

**Tabelle 13:** Kalibrierwerte für das HEM-System (BKS36a)

Frequenz in Hz	Kalibrierwerte FAS		Korrekturwerte BGR	
	I [ppm]	Q [ppm]	Amplitude [ ]	Phase [°]
386	-205,0	-205,0	1,00	-2,0
1.817	-175,0	-175,0	(1,00)	(0,0)
5.400	78,0	78,0	1,00	2,2
8.372	-143,6	-143,6	1,15	1,7
41.415	-666,7	-666,7	0,95	2,7
133.200	-1387,0	-1387,0	0,56	5,4

Mit diesen Kalibrierwerten ist zunächst eine Vorauswertung durchgeführt worden. Die Ergebnisse für das Teilgebiet Langeoog 2 (Halbraumparameter, siehe **Kapitel 5.3.4**) sind mit den jeweiligen Ergebnissen der vorhergehenden Befliegung Langeoog (Voß et al., 2015) verglichen worden. Die Übereinstimmung war weitgehend gut. Insbesondere konnten auch die größeren Korrekturwerte bei den höheren Messfrequenzen bestätigt werden. Daher waren nur geringfügige Nachkorrekturen erforderlich (**Tabelle 13**). Lediglich für die niedrigste Messfrequenz musste die Phase stärker (-2°) gegenüber dem im Jadebusen bestimmten Wert korrigiert werden. Aufgrund der Unbrauchbarkeit der Daten der zweiten Messfrequenz (1.820 Hz), konnten hierfür auch keine Korrekturen gewonnen werden.

### 5.3.2. Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur

Die Sekundärfeldanteile können noch Primärfeldanteile enthalten, die nicht vollständig durch die verwendeten Kompensationsspulen erfasst worden sind. Ferner kann sich dieser Anteil durch tem-

peraturbedingte 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 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 jede Messfrequenz) durchgeführt.

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

Hiermit können nur Fehler der automatischen Nullniveauerfassung sowie einige deutliche Nullniveaufehler beseitigt werden. Insbesondere der Einfluss von lokalen und höhenbedingten Temperaturschwankungen kann zu Niveauunterschieden der Messgrößen zwischen den einzelnen Linien führen, was in den Karten als Streifenmuster zu erkennen wäre. Um diese Effekte zu beseitigen, wird normalerweise eine statistische Niveaueinstellung durchgeführt (Siemon, 2009), die hier jedoch nicht notwendig war. Es erfolgt lediglich eine Korrektur der I- und Q-Werte auf Basis der korrigierten (interpolierten) Halbraumparameter (siehe **Kapitel 5.3.4**).

### **5.3.3. Datenauswahl und -korrektur**

Beim Importieren der HEM-Daten in HemView werden bereits Profilabgrenzungen aus einer Konfigurationsdatei berücksichtigt. Die meisten Datenverarbeitungsschritte beziehen sich auf den gesamten Datensatz. Nachkorrekturen sind aber nur auf den Messprofilen notwendig. Während geringfügige Störungen durch geeignete Filterung unterdrückt werden können, müssen die durch externe EM-Signale (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen, Sferics, Ortschaften, Bahnlinien) hervorgerufenen stärkeren Störungen markiert und vorerst eliminiert werden. Ebenso müssen Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen elektrischen Installationen beruhen (vgl. **Kapitel 5.3.5**), aus den Daten entfernt werden (**Tabelle 11**, Level 3). Diese Auswahl erfolgt zunächst automatisch und kann durch manuelle Nachkorrektur ersetzt bzw. erweitert werden.

Bei der automatischen Datenauswahl wird als Auswahlkriterium der relative Standardfehler verwendet, der aus dem Standardfehler (STF) innerhalb eines Intervalls um den jeweiligen Messwert berechnet und auf die gemittelten Daten (gleitendes Mittel von 75 Werten) normiert wird. Unterschreitet ein Amplitudenwert (I und Q) den relativen Standardfehler, so wird dieser Wert eliminiert. Zur Unterdrückung von Ausreißern werden nicht-lineare (NL) Filter benutzt und zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die verbliebenen HEM-Daten anschließend mit einem Tief-

pass-Filter geglättet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität sind unterschiedliche Filterparameter für die Daten der jeweiligen Frequenzen erforderlich (**Tabelle 14**).

**Tabelle 14:** Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung

Frequenz [Hz]	STF [Werte]	Schwellwert für rel. STF [I/Q]	NL-Filter [Werte/Toleranz]	TP-Filter [Werte]
387	25	0,15 / 0,15	20 / 3,0	30
1.820	25	0,10 / 0,10	20 / 2,0	30
5.400	20	0,05 / 0,05	10 / 2,0	30
8.370	15	0,05 / 0,05	10 / 2,0	30
41.420	15	0,05 / 0,05	10 / 2,0	30
133.200	15	0,05 / 0,20	10 / 2,0	30

Die manuelle Datenauswahl erfolgt in HemView durch Setzen von Markierungen, die leicht anzupassen sind und mit speziellen Optionen zur weiteren Behandlung der eliminierten Bereiche verknüpft sein können. Die eliminierten Daten sind von der weiteren Bearbeitung zunächst ausgeschlossen. Insbesondere werden auch keine Halbraumparameter (vgl. **Kapitel 5.3.4**) abgeleitet. Des Weiteren kann die Berechnung der Halbraumparameter für große Sensorhöhen (z. B. >200 m) ausgesetzt werden, da selbst bei ansprechender Datenqualität diese Berechnung instabil wird und somit zu Verfälschungen führen könnte.

Die eliminierten Datenbereiche können später auf Basis der in der Fläche interpolierten Halbraumparameter neu berechnet werden oder als Lücken bestehen bleiben (vgl. **Kapitel 5.3.7**).

### 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  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  As/Vm und  $\rho_0 > 10^8 \Omega m$ .  $J_0$  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 ( $VCX \approx -0,25 \cdot HCP$ ). 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

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

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

wobei  $\rho_n$ ,  $\mu_n$ ,  $\varepsilon_n$  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  $\varepsilon_n = \varepsilon_0$ , werden nur die spezifischen Widerstände und die Mächtigkeiten berücksichtigt.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

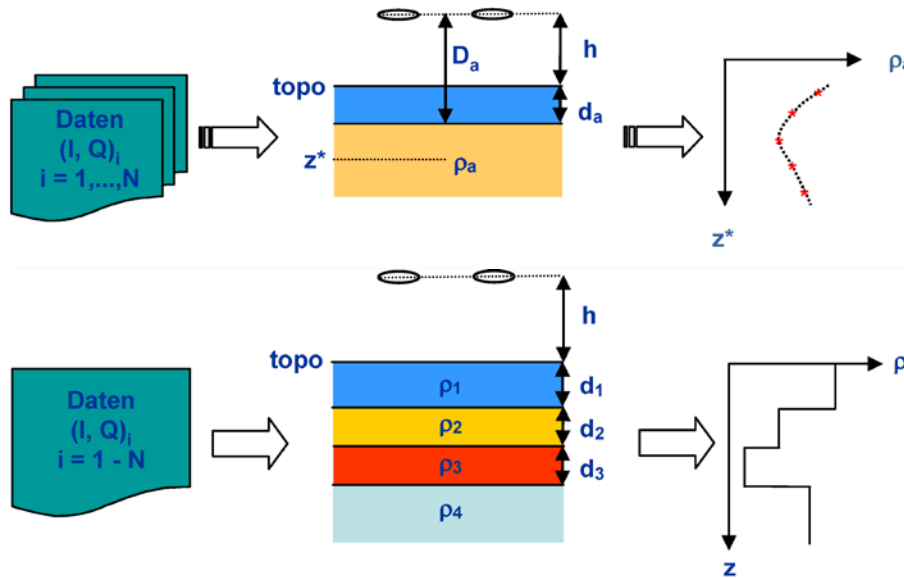
$$d_a = D_a - h$$

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 Schwerpunkttiefe

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

bestimmt (Siemon, 2001). Die Schwerpunktstiefe ist ein Maß für das mittlere Eindringen der induzierten Ströme in den leitenden Erduntergrund und ermöglicht eine Tiefenangabe für den scheinbaren spezifischen Widerstand, die  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven als erste Approximation der vertikalen Widerstandsverteilung (**Abbildung 3**).



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

Die berechneten Halbraumparameter können vor der Weiterverarbeitung auf Plausibilität überprüft werden, um beispielsweise bei zu großen Sensorhöhen ( $h \geq 200$  m) die Halbraumparameter zu löschen.

Um eine genauere Ausbreitung der elektromagnetischen Felder berücksichtigen zu können, was insbesondere bei hohen Messfrequenzen über sehr gut leitendem Untergrund (Salzwasser) notwendig ist, müssen für jede Messfrequenz eigene Polynomkoeffizienten für die Funktionen  $A'(\delta_p)$  und  $\delta_p(\varepsilon)$  bestimmt werden (Siemon, 2012). Anstelle der Interpolation der einzelnen Polynome können auch Flächen (Gitter) verwendet werden, die für jede Kombination aus I und Q die zugehörigen  $\rho_a$ - und  $D_a$ -Werte enthalten. Letzteres ist in HemView realisiert.

### 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 (Siemon et al., 2011). 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 treten außerdem externe elektromagnetische Felder auf, 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, so dass der anthropogene Anteil, der oft nur eine geringe Frequenzabhängigkeit aufweist, überwiegen kann.

Der anthropogene Einfluss wirkt sich meist durch eine Verringerung des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunktstiefe aus. In den Karten ist daher 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 wenige Störungen auf Baltrum und Langeoog identifiziert und entsprechende Bereiche in den Daten gelöscht.

### 5.3.6. Statistische Niveaueinpassung

Im Messgebiet Baltrum / Langeoog 2 war die herkömmliche Niveaueinpassung (nach **Kapitel 5.3.2**) ausreichend. Daher wurde die sonst übliche Nivellierung (*Microlevelling*) der logarithmierten Halbraumwiderstände und der Differenzen der scheinbaren Tiefen parallel zu den Messprofilen (Siemon, 2009) nicht durchgeführt. Es wurde lediglich das I-Q-Levelling mit Oasis montaj durchgeführt, um die Datenlücken über die interpolierten Halbraumparameter schließen zu können (**Kapitel 5.3.7**).

Beim I-Q-Levelling werden die variablen Korrekturwerte für jedes Mess- oder Kontrollprofil aus den stark geglätteten Differenzen der originären (d. h. kalibriert, aber ungefiltert) HEM-Daten (I und Q) und den aus den interpolierten Halbraumparametern rückgerechneten HEM-Daten ( $I_c$  und  $Q_c$ ) abgeleitet (Siemon, 2009). Hierzu werden Bereiche ausgewählt, in denen das Rauschen der HEM-Daten ( $I_{\text{noise}}$  und  $Q_{\text{noise}}$ ) klein genug ist. Auch die markierten, anthropogen beeinflussten Bereiche werden entfernt. Diese verbliebenen Differenzen ( $\Delta I = I - I_c$  und  $\Delta Q = Q - Q_c$ ) werden geglättet und von den originären HEM-Daten (I und Q) abgezogen. Die Filterparameter für die Bereichsauswahl und Glättung sind in **Tabelle 15** aufgelistet.

**Tabelle 15:** Filterparameter für die HEM-Niveaueinpassung

Filter	Filterparameter	Bezugsparameter
Nicht-linear	Filterlänge: 50 Werte, Toleranz: 10	$\Delta I, \Delta Q$
Schwellwert	$h_{\text{Ikor}} < 300 \text{ m}$	$\Delta I, \Delta Q$
Schwellwert	$I_{\text{noise}}, Q_{\text{noise}} < 0,02-0,03$	$\Delta I, \Delta Q$
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 relativen Rauschniveaus über einem Schwellwert lagen bzw. durch die Auswahl der anthropogen beeinflussten Bereiche entstanden sind, werden durch flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter mit nachfolgender Neuberechnung der relativen Sekundärfelder (Modellamplituden) geschlossen. Die relativen Rauschniveaus werden jeweils aus 30 benachbarten Werten bestimmt und auf die Modellamplituden normiert. Abschließend werden die korrigierten Daten analog zu **Kapitel 5.3.3** gefiltert, aber evtl. mit leicht modifizierten Filterparametern. Insbesondere werden die Daten nicht mehr mit einem Tiefpass-Filter, sondern mit einem Spline-Filter (Glätte 0,65-0,70, Spannung 0,5) geglättet und gleichzeitig interpoliert. Es besteht hier auch die Möglichkeit, anstelle der Modellamplituden wahlweise die originären Daten (z. B. wenn in den Daten kleinräumige, geogen bedingte Anomalien während der Datenbearbeitung zu sehr abgeplattet worden sind) oder auch keine Werte einzusetzen, damit die Interpolation nur mittels Spline-Filter durchgeführt wird. Ferner können auch Niveaurekturen in Bereichen, die falsch korrigiert worden sind (z. B. parallel zu geogenen Strukturen), zurückgenommen werden. Somit liegen als finale Daten, die in die Inversion (vgl. **Kapitel 5.3.8**) eingehen, korrigierte (nivellierte, interpolierte und geglättete) Messwerte an den Messpunkten für jede Messfrequenz vor.

### 5.3.8. Datenfehler und Qualitätsparameter

Für die HEM-Daten kann kein Datenfehler, der auf einer statistischen Variation von Wiederholungsmessungen beruht, angegeben werden, da nur Einzelmessungen vorliegen. Um dennoch ein Maß für das Rauschen der Daten angeben zu können, wird der in **Kapitel 5.3.4** bzw. **Kapitel 5.3.6** verwendete relative Standardfehler (rel. STF) herangezogen. Dieser wird über 30 benachbarte Werte, d. h. über eine Wegstrecke von etwa 120 m, gebildet und auf die Modellamplituden ( $\geq 1$ ) normiert, jeweils für I und Q einer Messfrequenz.

Daten mit geringer Qualität liegen meist vor, wenn anthropogene Effekte bzw. externe Sender auf die Messungen einwirken oder die Sensorhöhen groß und somit die Messwerte klein sind. Diese Bereiche werden bei der Datenverarbeitung automatisch und/oder manuell markiert, eliminiert und ggf. anschließend interpoliert.

Ein Parameter für die Anzeige der Datenqualität (*Quality Control Parameter* – QCP) sollte daher nicht nur die interpolierten Bereiche berücksichtigen, sondern auch das Datenrauschen und die Sensorhöhe. Er ist definiert als

$$QCP = 1 - CHECK - STD - ALT \geq 0,$$

wobei: CHECK die interpolierten Bereiche anzeigt,  
STD das Gesamtdatenrauschen repräsentiert  
ALT große Höhen markiert.

Die drei Größen für die Bestimmung der Datenqualität sollten in einem vernünftigen Verhältnis zueinander stehen. Daher sind sie definiert als:

- CHECK = 0,04 pro Messfrequenz (ohne VCX-Daten, maximal 0,2),  
STD = Summe der rel. STF für jede I,Q-Komponente (in ‰, maximal 0,8),  
ALT =  $((\text{Sensorhöhe} - 50)/150 \geq 0)$ , also 0 bei 50 m, 0,2 bei 80 m, 0,4, bei 110 m, usw.

Somit hat ein Gesamtdatenrauschen von 0,2 den gleichen Effekt wie die Interpolation der Daten aller (fünf) Messfrequenzen oder eine Sensorhöhe von 80 m. Bei hoher Datenqualität liegt QCP knapp unterhalb von 1, bei sehr schlechter bei 0.

Ferner kann für diesen dynamischen Qualitätsparameter ein Marker (QCPM) angegeben werden, indem QCPM nur dort einen diskreten Wert (= 1) besitzt, wo die Datenqualität so gering ist, dass von einer Interpretation dieser Daten abgesehen werden sollte. Die Berechnung dieses Markers ist zweistufig: Zunächst werden alle Bereiche ausgewählt mit  $QCP \leq 0,5$ . Diese werden aber nur beibehalten, wenn sie in einem Intervall von 100 Werten überwiegen. So wird verhindert, dass kleine Lücken (<200 m), die gut zu interpolieren sind, bzw. Bereiche mit nur wenig brauchbaren Daten bestehen bleiben.

QCP und QCPM können als Zusatzinformationen den HEM-Produkten (**Kapitel 5.3.10**) beigelegt werden.

### 5.3.9. 1D-Inversion der HEM-Daten

Die prozessierten HEM-Daten zu allen Messfrequenzen werden in die Parameter eines geschichteten Halbraums, spezifischer Widerstand und Mächtigkeit, invertiert. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig. Dieses Startmodell wird automatisch aus den  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet. Standardmäßig wird das Startmodell aus ebenso vielen Schichten aufgebaut wie Messfrequenzen vorhanden sind, wobei die Schichtwiderstände auf die scheinbaren spezifischen Widerstände und die Schichtgrenzen auf das logarithmische Mittel zweier benachbarter Schwerpunktstiefen gesetzt werden. Alternativ kann das Startmodell auch eine frequenzunabhängige Anzahl von Schichten besitzen. Hierzu wird die interpolierte Sondierungskurve in mit der Tiefe zunehmenden Schichtmächtigkeiten unterteilt und die zugehörigen spezifischen Widerstände in der jeweiligen Schichtmitte aus der Sondierungskurve abgegriffen (Siemon, 2006). Wahlweise kann bei beiden Verfahren eine schlecht leitende Deckschicht hinzugefügt werden, deren Mächtigkeit sich aus der scheinbaren Tiefe  $d_a$  der höchsten Messfrequenz und ggf. zusätzlich einer vorzugebenden Luftschichtmächtigkeit ergibt, mindestens aber 0,5 m beträgt. Im Inversionsprozess wird das Startmodell solange iterativ verbessert, indem für jedes neue Modell synthetische Daten (Modelldaten) berechnet (wie in **Kapitel 5.3.4** beschrieben), mit den Messdaten verglichen und daraus eine Modellverbesserung abgeleitet wird, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt ist. Dies ist erreicht, wenn die differenzielle Verbesserung der Anpassung der Modelldaten an die Messdaten weniger als z. B. 5% beträgt.

Für die Inversion der HEM-Daten im Messgebiet Baltrum / Langeoog 2 wurden nivellierte Daten (vgl. **Kapitel 5.3.6**) und ein Startmodell mit 6 bzw. 20 Schichten mit zur Tiefe hin ansteigenden Mächtigkeiten inklusive einer variabel mächtigen Deckschicht verwendet. Da die Daten der zweiten Messfrequenz (1.820 Hz) nicht auswertbar waren, wurde die 20-Schicht-Inversion zunächst nur mit den Daten der übrigen fünf Messfrequenzen (d. h. auch mit den Daten der dritten Messfrequenz) durch-

geführt und aus den resultierenden Modellen wurden Modelldaten berechnet. Die unbrauchbaren Daten der zweiten Messfrequenz wurden dann durch die Modelldaten ersetzt und die Inversion ohne die Daten der dritten Messfrequenz wiederholt. Aus diesen Modelldaten wurden auch die Halbraumparameter abgeleitet, die sowohl für die Ableitung der Startmodelle als auch zur Erstellung der Karten benötigt werden.

Die Inversion wurde ohne die Daten der dritten Messfrequenz (5.400 Hz) aufgrund der Konformität zu den anderen Messgebieten an der deutschen Nordseeküste durchgeführt. Der generelle Verzicht auf die Daten dritten Messfrequenz bei der Inversion ist darin begründet, dass diese mit einem vertikal-koaxialen (VCX) Spulensystem erfasst werden, das empfindlich gegenüber steil stehenden Leitfähigkeitsstrukturen (aber auch gegenüber externen Quellen) ist, während alle anderen horizontal-koplanare (HCP) Systeme verwenden, die empfindlich für die lateralen Leitfähigkeitsstrukturen sind. Im Messgebiet Baltrum / Langeoog 2 traten diese Schwierigkeiten aber nicht auf, sodass die Transformation der VCX-Daten in HCP-Daten durch Multiplikation mit dem Faktor 4 plausibel erschien und für die Neuberechnung der Daten der zweiten Messfrequenz herangezogen werden konnte.

#### 5.3.10. Präsentation der HEM-Ergebnisse

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten (siehe **Anhang IV**) und Vertikalschnitte (siehe **Anhang V**) präsentiert. Karten (vgl. **Kapitel 6**) wurden im Maßstab von 1:25.000 für die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand  $\rho_a$  (in  $\Omega\text{m}$ ) und Schwerpunkstiefe  $z^*$  (in m unter GOK) für sechs Messfrequenzen produziert. Ferner wurden Tiefenschnitte erstellt, die die spezifischen Widerstände  $\rho$  (in  $\Omega\text{m}$ ) in zehn Tiefen (1–60 m unter NHN), abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten, darstellen.

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 werden nicht nur die interpolierten Bereiche markiert, die für die einzelnen Messfrequenzen auch unterschiedlich sein können, sondern stattdessen ein Datenqualitätsparameter (vgl. **Kapitel 5.3.8**) dargestellt. Für die Markierung von Bereichen mit niedriger Datenqualität werden in den Tiefenschnitten auf den schwarzen Messpunkten wieder weiße Punkte gedruckt, die mit abnehmender Datenqualität größer werden.

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 spezifischen Widerstände abgeleitet werden konnten.

Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:10.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:1.000 wurden basierend auf den 1D-Inversionsergebnissen von jedem der 6 (Baltrum) bzw. 5 (Langeoog 2) Messprofile hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topografischen Höhe längs eines Profils nebeneinandergestellt werden. Die Mächtigkeit der untersten Schicht (Substratum) wird mit variabler Mächtigkeit von maximal 10 m dargestellt. 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 bei der Inversion mit wenig Schichten 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 korrigierten Positionsdaten (siehe **Kapitel 5.2.1** und **5.2.4**). 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  $T$  (in nT) setzt sich an einem Ort  $r$  zum Zeitpunkt  $t$  aus folgenden Anteilen zusammen:

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

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

##### **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 können durch die Anwendung eines Tiefpassfilters beseitigt werden.

##### **5.4.4. Statistische Niveauanpassung**

Üblicherweise werden die Magnetikdaten einer statistischen Niveauanpassung unterzogen. Dazu werden die Verfahren Kreuzungspunktstatistik sowie Microlevelling verwendet. Auf Grund der geringen Anzahl von Messprofilen und dem Fehlen von Kontrollprofilen wurde in den beiden Messgebieten von einer Anwendung dieser Verfahren abgesehen. Die finalen Daten der magnetischen Anomalien ( $\Delta T$ ) bestehen hier also aus den Messdaten der Flugsonde, abzüglich des Hauptfeldes und der

Tagesvariationen. Da alle Messprofile während eines Fluges aufgenommen wurden, sind überdies keine gravierenden Niveauunterschiede zu erwarten.

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

Die Kartendarstellungen der Magnetfeldanomalien sind in **Kapitel 6** beschrieben. In den besiedelten Gebieten dominieren in den Karten der magnetischen Anomalien oft die durch anthropogene Quellen hervorgerufenen Effekte. Um eine ruhigere Kartendarstellung zu erreichen, wurde ein Datensatz erstellt, in dem offensichtlich anthropogene Anomalien manuell entfernt worden sind. Es sind daher 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 abschätzen zu können, wird mit dem Spektrometer die Gammastrahlung ihrer radioaktiven Tochterprodukte Bismut-214 (Uran) und Thallium-208 (Thorium) gemessen. Da diese Abschätzung unter der Annahme erfolgt, dass zwischen den Elementen U bzw. Th und deren Tochterprodukten ein Gleichgewicht vorhanden ist, werden die berechneten Gehalte als Äquivalentgehalte von Uran (eU) und Thorium (eTh) bezeichnet. Für die Ermittlung der Gehalte aus den Rohzählraten ist eine Reihe von Arbeiten zur Kalibrierung des Spektrometers sowie in der Datenverarbeitung erforderlich:

- Bestimmung der Hintergrundzählraten durch Flüge über ausgedehnten Wasserflächen;
- Bestimmung von Einstreuraten zur Korrektur der Compton-Streuung mit Hilfe von Kalibrierkörpern;
- Bestimmung von Absorptionskoeffizienten und Detektorempfindlichkeiten mit Hilfe von Flügen über einer Kalibrierstrecke;
- Bestimmung der Reaktion des Detektors auf atmosphärisches Radon;
- Bestimmung von Vegetationsabschwächungskoeffizienten.

Einzelheiten zu den durchgeführten Kalibrierungen sind in den jeweiligen Kapiteln der Datenverarbeitung beschrieben.

Die Datenverarbeitung umfasst folgende Schritte:

- Transformation der geografischen Koordinaten in ein Zielkoordinatensystem;
- Bestimmung der Höhe des Detektors über Grund und der effektiven Höhe;
- Bestimmung der Höhe des Bewuchses (Wald);
- Festlegung von Profilabgrenzungen zur Unterteilung der Flüge in Profile;
- Energiekalibrierung;
- Verminderung des Rauschens;
- Korrektur der Hintergrundstrahlung;



- Bestimmung und Korrektur des Einflusses atmosphärischen Radons;
- Korrektur der Compton-Streuung;
- Reduktion auf Standardflughöhe;
- Berechnung der Radioelementgehalte und der Dosisleistung am Boden;
- Filterung und Korrektur von Niveaufehlern in den Daten (falls erforderlich);
- Korrektur der Abschwächung durch Biomasse (falls vorhanden);
- Herstellung von thematischen Karten und Datenexport im ASCII-Format.

Die Datenverarbeitung wird unter Verwendung der Programme Oasis montaj von Geosoft und Hrd-View (Eigenentwicklung BGR) durchgeführt.

### **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. Dazu wird für jeden Messpunkt ein mittleres Spektrum einer großen Zahl benachbarter Spektren berechnet. Im mittleren Spektrum werden jeweils die Kanalpositionen der Zentren der Kalium- und Thoriumspitzen bestimmt. Danach wird die Kanalzuordnung sämtlicher Spektren so modifiziert, dass die Zentren der Spitzen (*peaks*) genau auf den durch IAEA vorgegebenen Sollwerten (**Tabelle 6**) liegen.

### **5.5.2. Verminderung des Rauschens**

Aufgrund des relativ großen Abstandes zwischen den Quellen der radioaktiven Strahlung an der Erdoberfläche und dem Strahlungsdetektor im Hubschrauber sind die Zählraten in der Aerogamma-spektrometrie allgemein gering. Dies führt dazu, dass die aufgenommenen Gammaskpektren, und damit auch die daraus ermittelten Radionuklidgehalte, starkes statistisches Rauschen aufweisen. In der Datenaufbereitung kommt daher ein von Hovgaard & Grasty (1997) entwickeltes Verfahren zur Reduktion des Rauschens zur Anwendung. Das NASVD-Verfahren (*Noise Adjusted Singular Value Decomposition*) basiert auf einer statistischen Analyse sämtlicher Spektren eines Messgebietes und einer Rekonstruktion 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 eine Singulärwertzerlegung (*singular value decomposition*) 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 sechs Hauptkomponenten. Als Ergeb-

nis erhält man geglättete Spektren, aus denen die Zählraten der drei interessierenden Energiefenster (vgl. **Tabelle 6**) neu bestimmt werden.

Während dieses Verarbeitungsschrittes erfolgt auch eine Begrenzung auf eine maximale Flughöhe: Alle Daten, die bei einer Flughöhe über Grund von mehr als 120 m aufgenommen wurden, werden auf Grund ihrer geringen Signalstärke und damit verbundenem starken Rauschen verworfen.

### 5.5.3. Effektive Höhe

Für die Anwendung der Datenanalysetechniken der Radiometrie ist es notwendig, die gemessenen Daten an Standardbedingungen (STP, *Standard Temperature and Pressure*) anzupassen. Dazu gehört die Umrechnung der Detektorhöhe über der Erdoberfläche in eine effektive Höhe, die für die Standardtemperatur und den Standardluftdruck gilt, da beide Größen die Dichte und damit die Dämpfung der Gammastrahlung durch die Luft beeinflussen. Die Höhenkorrektur 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 STP-Bedingungen (m),
- $h_r$  = Höhe des Spektrometers über der Erdoberfläche (m),
- $T_0$  = 273,15 K, Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala,
- $T$  = Lufttemperatur (°C),
- $P_0$  = 101,325 kPa; mittlerer Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe,
- $P$  = im Hubschrauber gemessener Luftdruck (kPa).

Der Luftdruck wird mit einem Sensor im HeliDAS-System gemessen und aufgezeichnet. Die Lufttemperatur wird zu Beginn und Ende des Fluges am Boden an einem im Hubschrauber eingebautes Außenthermometer abgelesen und notiert.

### 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).

Bei dem verwendeten Spektrometer ist die Registrierzeitkorrektur auf Grund der sehr hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit des Gerätes praktisch ohne Bedeutung.

### 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 Mai 2015 Messflüge in verschiedenen Höhen über der Nordsee durchgeführt (**Tabelle 16**). Mit diesen Messdaten erfolgte die Berechnung der Korrekturgrößen mittels linearer Regression der gegen die Zählraten der kosmischen Strahlung aufgetragenen Zählraten der Kanäle K, U, U-UP (nach oben gerichteter Kristall), Th und TC (Gesamtstrahlung).

**Tabelle 16:** Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung

Kanal	Messsystem a [cps]	kosmische Einstreuung b
TC	51,40	1,0437
K	6,59	0,0619
U	1,20	0,0509
Th	0,02	0,0649
U_UP	0,32	0,0133

### 5.5.6. Radonkorrektur

Die Erdatmosphäre enthält stets einen gewissen Anteil an dem radioaktiven Edelgas Radon. Die Quellen des Radons liegen in den Gesteinen des Erdmantels und der Erdkruste. Von den obersten Bodenschichten diffundiert das Gas in die Atmosphäre. Der Gehalt an Radon in der Luft ist starken

Schwankungen unterworfen und ist unter anderem beeinflusst durch Topografie, Luftdruckschwankungen und andere meteorologische Faktoren wie z. B. Niederschlag.

Das stabilste Radonisotop ist Rn-222 mit einer Halbwertszeit von 3,8 Tagen. In der Zerfallsreihe von Rn-222 befindet sich auch das Isotop Bi-214 als signifikanter Gammastrahler. Die Gammastrahlung von Bi-214 wird in der Aeroradiometrie zur Bestimmung von Uran verwendet. Bei vorhandenem Radon werden also auch immer die Zählraten für Uran beeinflusst und verfälscht. Ebenso werden die Zählrate im Energiefenster von Kalium und die Gesamtzählrate durch Radon beeinflusst.

Eine Korrektur des Radoneinflusses auf die gemessenen Zählraten wird erreicht durch die Verwendung eines Detektors, der vorwiegend die von oben eintreffende Strahlung misst. Dieser Detektor-kristall ist weitgehend gegen die von unten eintreffende Strahlung abgeschirmt, empfängt also nur einen geringen Anteil der Strahlung, die vom Erdboden herrührt. Änderungen in den Zählraten des nach oben gerichteten Detektors im Energiebereich von Bi-214 („Uranfenster“) sind daher hauptsächlich – aber nicht ausschließlich – auf Variationen im Radongehalt der Luft zurückzuführen.

Die Korrektur des Radoneinflusses mit Hilfe eines nach oben gerichteten Detektors ist in IAEA (1991) beschrieben. In **Tabelle 17** sind die dafür verwendeten Konstanten aufgelistet. Die berechnete Radonkomponente  $U_R$  ist naturgemäß sehr starken statistischen Schwankungen von Messpunkt zu Messpunkt unterworfen. Unter der Annahme, dass sich während des Zeitraumes eines Fluges (etwa 2 Stunden) der mittlere atmosphärische Radongehalt im Messgebiet nicht wesentlich ändert, wird für die Anbringung der Radonkorrektur jeweils das arithmetische Mittel der Radonkomponente des betreffenden Fluges verwendet. Weitere Erläuterungen zu der angewendeten Radonkorrektur sind in Ibs-von Seht et al. (2015) zu finden.

**Tabelle 17:** Konstanten für die Radonkorrektur

Konstante	Wert
$a_1$	0,034
$a_2$	0,042
$a_U$	0,35
$a_{Th}$	0,30
$a_K$	1,10
$a_{TC}$	19,0

### 5.5.7. 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 so genannten Compton-Elektronen übertragen und die Gammaquanten selbst werden gestreut. Praktisch hat dies zur Folge, dass ein bestimmter Anteil z. B. von der ursprünglichen Thoriumstrahlung in den niedrigeren Energiebereichen des Uran- und Kaliumfensters enthalten ist. Ebenso streuen Urananteile in den Kaliumkanal. Der umgekehrte Effekt, d. h. die Einstreuung in

höhere Energiekanäle, existiert auch, ist aber deutlich geringer. Die Koeffizienten der Einstreuratzen (*stripping ratios*) wurden dem Datenblatt des RS 500 RSX-5 entnommen (**Tabelle 18**) und entsprechend den Empfehlungen der IAEA (2003) auf die Messwerte angewendet.

**Tabelle 18:** Koeffizienten der Einstreuratzen

Einstreuung	Koeffizient
$\alpha$ (Th $\rightarrow$ U)	0,270
$\beta$ (Th $\rightarrow$ K)	0,400
$\gamma$ (U $\rightarrow$ K)	0,772
a (U $\rightarrow$ Th)	0,052

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

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

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

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

Um die bezüglich der Einstreuratzen 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).

### 5.5.8. Zählraten in Standardflughöhe

Die Intensität der vom Boden stammenden Gammastrahlung verringert sich mit der Höhe über der Erdoberfläche durch die Absorption in der Luft. Die Absorption hängt hauptsächlich von der Dichte und der Feuchtigkeit der Luft ab. Die energiespezifischen Absorptionskoeffizienten  $\mu$  wurden mit Hilfe von Kalibrierflügen in unterschiedlichen Höhen über einer Eichstrecke in Allentsteig, Österreich, im Juni 2015 bestimmt. Die hinsichtlich der Hintergrundstrahlung und der Compton-Streuung korrigierten Daten lieferten durch Auftragen über die Messhöhe und anschließende exponentielle Regression die Absorptionskoeffizienten für jeden Kanal (**Tabelle 19**).

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

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

mit:

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

**Tabelle 19:** Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen

Spektralfenster	Absorptionskoeffizienten $\mu$ (in 1/m)
TC	0,00983
K	0,01255
U	0,00667
Th	0,00982

### 5.5.9. Radioelementgehalte und Dosisleistung

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

$$C = N_s / S$$

mit:

- $C$  = Gehalte der Elemente im Boden (K in %, eU in ppm, eTh in ppm),
- $N_s$  = korrigierte Zählraten im jeweiligen Energiefenster,
- $S$  = Sensitivität der Strahlungsquelle im Energiefenster.

Die Sensitivitäten des Spektrometers (**Tabelle 20**) wurden mit den Daten von Kalibrierflügen über einer Eichstrecke in Allentsteig, Österreich, im Juni 2015 bestimmt. Die so bestimmten Gehalte beziehen sich auf eine unendlich ausgedehnte, gleichmäßig strahlende Ebene. Sie können sich somit von den wahren Gehalten der Elemente im Boden, insbesondere durch den Einfluss der Bodenfeuchte oder wenn die strahlenden Flächen unregelmäßig verteilt sind, unterscheiden.

**Tabelle 20:** Sensitivitäten

Radioelement	Sensitivität
Kalium	24,50 cps / % K
Uran	3,60 cps / ppm eU
Thorium	1,78 cps / ppm eTh

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 absorbiert. Diese Abschwächung der Radiometriesignale macht sich vor allem in Gebieten mit größeren, zusammenhängenden Waldflächen bemerkbar. Da solche in den beiden Messgebieten nicht anzutreffen sind, wurde eine Vegetationskorrektur nicht durchgeführt.

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

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

mit:

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

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

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

#### 5.5.10. Filterung und statistische Niveauanpassung

Die ermittelten Radioelementgehalte und die Gesamtzählraten werden nach Abschluss der hier beschriebenen Bearbeitungsschritte flächig in Form von farbkodierten Karten (*Gitterdaten, Grids*) dargestellt. Diese Art der Darstellung erlaubt es, die Intensität des statistischen Rauschens der Daten im Verhältnis zu geologisch bedingten Anomalien in den Daten visuell abzuschätzen. Außerdem werden etwaige Niveauunterschiede zwischen den Daten einzelner Profillinien sichtbar. Niveauunterschiede können immer dann auftreten, wenn sich während der Kampagne Änderungen in den Umweltbedingungen (z. B. Bodenfeuchte, Luftfeuchtigkeit) ergeben haben.

Die so kontrollierten Messdaten der hier behandelten Gebiete zeigten keine auffälligen Niveauunterschiede zwischen den Messprofilen. Das statistische Rauschen war jedoch im Verhältnis zu den sichtbaren, geologisch bedingten Anomalien mäßig stark. Zur Verringerung des Rauschens wurde ein leichter Tiefpassfilter auf die Daten nach Berechnung der Radionuklidgehalten im Boden angewendet. Der Tiefpassfilter schwächt Variationen in den Daten ab, deren Wellenlänge kürzer als die Filterbreite ist. Dadurch wird hochfrequentes Datenrauschen vermindert. Die Filterbreite wird in Datenpunkten angegeben und betrug drei für die Parameter Kalium, Thorium und Gesamtstrahlung und fünf für Uran. Weiterhin wurden die zur Kartendarstellung verwendeten Grids, abweichend von den in **Tabelle 23** angegebenen allgemeinen Gitterparametern unter Verwendung eines Tiefpassfilters erstellt. Zusammen mit dem mittlerem Messpunktabstand bzw. der Gitterzellengröße ergeben sich die in **Tabelle 21** zusammengestellten Filterbreiten.

**Tabelle 21:** Filterbreiten für die HRD-Gitter

Parameter	K	U	Th	TC
Tiefpass [Datenpunkte]	3	5	3	3
Filterbreite [m]	~100	~170	~100	~100
Tiefpass [Gitterzellen]	6	8	6	3
Filterbreite [m]	150	200	150	75

### 5.5.11. Präsentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der radiometrischen Messungen werden in Form von Karten der Gesamtstrahlung sowie der Äquivalentgehalte der Radioelemente Uran und Thorium, des Gehaltes des Radioelementes Kalium und der Dosisleistung am Erdboden dargestellt (vgl. **Kapitel 6**). Die für die Produktion der Karten verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte in den Karten implementiert. Bei fehlenden Daten werden weiße Punkte verwendet.



## 6. Kartografische Arbeiten

### 6.1. Topografische Karten 1:25.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurden ein Blatt einer topografische Karte mit Sonderblattschnitt auf Grundlage von Rasterdaten der DTK25-V (Topographische Karte 1:25.000) hergestellt. Zur Abdeckung des Messgebietes ergab sich ein Blatt mit der Ausdehnung von je 18 km × 10 km. **Tabelle 22** enthält die Eckpunktkoordinaten der Blätter.

**Tabelle 22:** Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Baltrum / Langeoog 2

Karteneckpunkt	Gauß-Krüger-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
NW	3392000	5962000
NO	3410000	5962000
SW	3392000	5952000
SO	3410000	5952000

Die Ergebniskarten 1:25.000 basieren auf Rasterdaten der DTK25-V. Für die Topografische Karte für das Messgebiet Baltrum / Langeoog 2 kamen die Rasterdaten kacheln z2\_18\_14, z2\_18\_15 und z2\_18\_16 zur Verwendung. Herausgeber ist das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

Digital wurde dazu ein Kartenrahmen mit Gauß-Krüger-Eckpunktkoordinaten im 3°-Meridian-Streifen-system mit 9° als Mittelmeridian (Zone 3), basierend auf dem Bessel-Ellipsoid, und ergänzenden geografischen Koordinaten erstellt.

### 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. **Tabelle 23** zeigt die Gitterparameter, die für das Messgebiet Baltrum / Langeoog 2 verwendet wurden. Für jeden Ergebnisparameter werden farbige Isolinienkarten auf Grundlage der in **Kapitel 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.

**Tabelle 23:** Gitterparameter

Parameter	Wert
Methode zur Flächeninterpolation	minimale Krümmung
Gitterzellengröße [m]	25
Extrapolationsbereich [m]	100
Suchradius [m]	50
Zellen außerhalb der Datenpunkte	7
Log-Option	linear, (außer: $\log \rho$ , $\log z^*$ )

### 6.3. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Baltrum / Langeoog 2 wurden 29 geophysikalische Ergebniskarten sowie ein digitales Höhenmodell (DEM) jeweils mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:25.000 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 1:25.000 eine Fluglinienkarte produziert, die die Lage der Messprofile auf der Grundlage der topografischen Karten zeigt. 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.

Aufgrund der gewählten W-O-Flugrichtung liegen die Messprofile oft parallel zu den Küstenverläufen und somit auch zu den Dünenstrukturen auf beiden Inseln, insbesondere auf Langeoog. Die Gitter zu den geophysikalisch-thematischen Karten sind zwischen den Messprofilen interpoliert und außerhalb extrapoliert worden, um ein geschlossenes Kartenbild zu erzielen (siehe **Tabelle 23**). Daher kann der graduelle Verlauf der dargestellten Parameter senkrecht zur Küste verfälscht sein. Ferner können Strukturen, wie z. B. langgestreckte Dünen, die zwischen den Messprofilen liegen, verloren gehen (z. B. der Dünenkamm auf Langeoog, auf der DEM-Karte zwischen T101.9 und T102.9 nicht zu sehen ist).

## 7. Archivierung

Alle Daten wurden auf DVD gespeichert und im Fachbereich „B2.1 – Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie“ archiviert. Darüber hinaus sind die Ergebnisdaten als ASCII-codierte Profildaten im Geosoft-xyz-Format und die Endergebnisse (Bericht, Karten und Vertikalsektionen) als PDF-Dokumente im Originalmaßstab auf einer DVD (**Tabelle 24** und **Anhang III**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Für die Darstellung in ArcGIS-Projekten wurden die Daten als Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (\*.flt) beigefügt.

**Tabelle 24:** Inhalt der DVD (\* = 149 bzw. 155)

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-Dateien der Rohdaten (HEM*_RAW.xyz) ASCII-Dateien der bearbeiteten Daten (HEM*_DAT.xyz) ASCII-Dateien der abgeleiteten Parameter (HEM*_APP.xyz) ASCII-Dateien der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM*_INV_L6.xyz, HEM*_INV_L20.xyz)
	\HMG	ASCII-Dateien der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Bodenstationsdaten etc. (HMG*.xyz)
	\HRD	ASCII-Dateien der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Dosisleistung etc. (HRD*.xyz)
\Karten...	\Fluglinien	PDF-Karte 1:25.000 des Flugweges mit Topografie
	\DEM	PDF-Karte 1:25.000 des Digitalen Höhenmodells
	\HEM	PDF-Karten 1:25.000 der Halbraumwiderstände und Schwerpunkttiefen für die Frequenzen 387, 1.820, 5.400, 8.370, 41.420 und 133.200 Hz sowie der spezifischen Widerstände bei 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 und 60 m u. NHN
	\HMG	PDF-Karten 1:25.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT mit und ohne anthropogene Effekte
	\HRD	PDF-Karten 1:25.000 (verkleinert) der Gesamtstrahlung, der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Dosisleistung am Boden
	\ArcGIS	Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (*.flt)
\VRS	PDF-Vertikalschnitte (verkleinert) des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnissen mit 6 bzw. 20 Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:10.000 und Vertikalmaßstab 1:1.000	

Die Ergebnisse dieser sowie älterer Befliegungen in Deutschland sind in die Geodateninfrastruktur der BGR (abrufbar über [Produktcenter](#) und [Geoviewer](#)) sowie in das Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des LIAG eingestellt worden.

## 8. Referenzen

### 8.1. Literatur

- Anderson, W.L., 1989. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling. *Geophysics*, 54, 263–266.
- DGM-D25. Digitales Geländemodell, 25 m Raster. Geoinformationen © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie ([www.bkg.bund.de](http://www.bkg.bund.de))
- DTK25-V. Digitale Topografische Karte, 1:25.000. Geoinformationen © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie ([www.bkg.bund.de](http://www.bkg.bund.de))
- 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, 1991. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. International Atomic Energy Agency. Technical Reports Series 323, Vienna.
- IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1363AEA, Vienna.
- IAGA, 1992: International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group 8: Analysis of the main field and secular variation. *Geophysical Journal International*, 108, 945–946.
- IAGA, 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/IAGA/vmod/igrf.html>
- Ibs-von Seht, M., Petersen, H., Siemon, B. & Pielawa, J., 2015. Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Radiometrie-Befliegungen im Projekt: Bodenparameter aus Aerodaten, Teil 2: 157 Dedelow, 158 Kraatz, November 2014. Technischer Bericht, Archiv-Nr. 0133330, Hannover.
- Johansen, H.K. & Sørensen, K., 1979. The fast Hankel transform. *Geophysical Prospecting*, 27, 876–901.
- 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.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. & Factor, J.K., 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), Volume 117, Issue B4.
- Post, V.E.A. & Houben, G.J., 2017. Density-driven vertical transport of saltwater through the freshwater lens on the island of Baltrum (Germany) following the 1962 storm flood. *Journal of Hydrology* (accepted), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.007>.

- 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., Costabel, S., Voß, W., Meyer, U., Deus, N., Elbracht, J., Günther, T. & Wiederhold, H., 2015. Airborne and ground geophysical mapping of coastal clays in Eastern Friesland, Germany. *Geophysics*, 80 (3), WB21-WB34, doi: 10.1190/GEO2014-0102.1.
- 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.
- Siemon, B., Steuer, A., Ibs-von Seht, M., Voß, W., Meyer, U. & Wiederhold, H., 2012. Combination of Airborne Geophysical Surveys at the Estuaries of the Weser and Elbe Rivers in Northern Germany. In: *Proceedings of 18<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics – Remote Sensing Workshop*, 3.-5.9.2012, Paris, France, RS30, 5 pp.
- Siemon, B., Steuer, A., Ullmann, A., Vasterling, M. & Voß, W. 2011. Application of frequency-domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater exploration in urban areas. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 1373–1385, doi: 10.1016/j.pce.2011.02.006.
- 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.

- Steuer, A., Siemon, B. & Palm, J., 2010. Detection of a saltwater-rising zone by helicopter-borne electromagnetics at the Elbe estuary in northern Germany. In: Proceedings of 18<sup>th</sup> International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, 18.-24.9.2010, Giza, Egypt.
- 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. Hydrology and Earth System Sciences, 16, 3621–3663, doi:10.5194/hess-16-3621-2012.
- Voß, W., Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J., 2015. Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Langeoog 2008/2009. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132536, Hannover.
- Ward, S.H. & Hohmann, G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications. In Nabighian M.N. (Eds.) Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. 1, Theory. Society of Exploration Geophysics, IG no 3, Tulsa, 130–310.
- Weidelt, P., 1991, Introduction into electromagnetic sounding. Lecture manuscript. Technical University of Braunschweig, Germany.
- Wiederhold, H., Siemon, B., Steuer, A., Schaumann, G., Meyer, U., Binot, F. & Kühne, K., 2010. Coastal aquifers and saltwater intrusions in focus of airborne electromagnetic surveys in Northern Germany. In: Proceedings of 21th Salt Water Intrusion Meeting 2010, Azores, Portugal.

## 8.2. Internetverknüpfungen

BGR-Geoviewer: <https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=de>

BGR-Produktcenter: <http://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/Start.do>

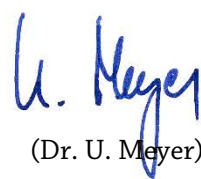

BKG: <https://www.bkg.bund.de/DE/Home/home.html>

Colourfield: <http://colourfield.de/de/>

FIS-Geophysik (LIAG): <http://www.geophysics-database.de/>

Terra X: <https://www.zdf.de/dokumentation/terra-x/suesswasserlinse-unter-langeoog-102.html>

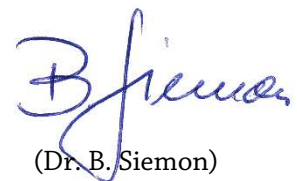
**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE**  
**BGR, HANNOVER**



(Dr. T. Himmelsbach)                      (Dr. U. Meyer)

Stellv. Leiter der Abteilung  
„Grundwasser und Boden“

Leiter des Fachbereichs  
„Geophysikalische Erkundung –  
Technische Mineralogie“



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs  
„Aerogeophysik und  
Luftfahrttechnischer Betrieb“





## Anhang I

### Messgebiet 149 – Langeoog 2 Messgebiet 155 – Baltrum

<b>Basis:</b>	JadeWeserAirport (EDWI)	Flugplatzhöhe: 16 ft / 4,9 m
<b>Bodenstation:</b>	8°03'31" östliche Länge,	53°30'47" nördliche Breite
<b>Messgebiet:</b>	<b>Baltrum</b>	<b>Langeoog 2</b>
<b>Profilabstand:</b>	Messprofile – 250 m	Kontrollprofile – 250 m
<b>Profilrichtung:</b>	Messprofile – 90°	Kontrollprofile – 90°
<b>Profile:</b>	Messprofile – 6	Kontrollprofile – 5
<b>Profilkilometer (Plan):</b>	17 Messprofile–km	40 Kontrollprofile–km
<b>Größe des Messgebietes:</b>	ca. 4 km <sup>2</sup>	ca. 4 km <sup>2</sup>

#### Allgemeine Anmerkungen:

- 1) Beide Messgebiete sind mit einem Messflug befliegen worden.
- 2) Abschließend wurden noch zwei Profile im Gebiet Varel befliegen.
- 3) Die Messprofile sind durch L\*.1 (Baltrum) und die Kontrollprofile (Langeoog 2) durch T\*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt bzw. ergänzt wurden, sind durch L\*.2 bzw. T\*.8 gekennzeichnet.
- 4) Die Kontrollprofile auf Langeoog sind wie die Messprofile auf Baltrum in W-O-Richtung in 250 m geflogen worden und somit eigentlich auch Messprofile. Die Bezeichnung als Kontrollprofile bezieht sich auf die erste Langeoog-Befliegung aus 2008/09.
- 5) Die Linien TL kennzeichnen die Testlinie, die am Ende jedes Messfluges auf dem Rückweg zum JadeWeserAirport (EDWI) überflogen wurde.
- 6) HeliDAS-Konsole: SYS34
- 7) Bird: BKS36a
- 8) Magnetometer: Kurze Ausfälle, besonders in Kurven
- 9) Spektrometer: Wenige Ausfälle
- 10) Radarhöhenmesser: Nur für Flugführung
- 11) Videokamera: Nur für Flugführung

**Tabelle A-1:** *Flugprotokoll*

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
15501	01.10.14	10:14:21–12:43:10	T104.9 T103.9 T102.9 T101.9 T102.8 L1.1 L2.1 L3.1 L4.1 L5.1 L1.2 (L22.1 T11.9) TL	<b>Messprofilflug SYS34-01</b>  EM5-Ausfall nach AUTOCAL Spektrometerausfälle  Wetter: sonnig, 15°C

**Tabelle A-2:** *Gebietsdateien*

Methode	Name	# Flüge / Profile	# Werte	Größe [MB]	Bemerkungen
HEM	HEM149_RAW.xyz HEM155_RAW.xyz	1 (Flug)	89.290	28,4	Identisch bis auf Header
HEM	HEM149_DAT.xyz HEM155_DAT.xyz	5 (T) 6 (L)	12.375 4.516	2,53 0,92	-
HEM	HEM149_APP.xyz HEM155_APP.xyz	5 (T) 6 (L)	12.375 4.516	3,04 1,11	-
HEM	HEM149_INV_L6.xyz HEM155_INV_L6.xyz HEM149_INV_L20.xyz HEM155_INV_L20.xyz	5 (T) 6 (L) 5 (T) 6 (L)	12.375 4.516 12.375 4.516	2,46 5,33 0,90 1,95	-
HMG	HMG149.xyz HMG155.xyz	5 (T) 6 (L)	12.375 4.516	2,29 0,84	-
HRD	HRD149.xyz HRD155.xyz	5 (T) 6 (L)	1.242 456	0,33 0,12	-

## **Anhang II**

### **Beschreibung der Datenformate**

#### **A) Elektromagnetik**

Beschreibung der drei ASCII-Dateien mit den Ergebnissen der Hubschrauberelektromagnetik (HEM) für das Messgebiet 155 Baltrum. Die Beschreibungen gelten in analoger Weise auch für das Messgebiet 149 Langeoog 2.

##### **Allgemeiner Header:**

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/BALTRUM  
/AREACODE  
/155  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE FOR X AND Y  
/9 3 BESSEL  
/REFERENCE SYSTEM FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/BIRD  
/61  
/NUMFREQ  
/6  
/FREQUENCY  
/ 387.00 1820.00 5400.00 8370.00 41420.00 133200.00  
/COILSEPERATION  
/ 7.94 7.94 9.06 7.93 7.91 7.92  
/COILGEOMETRY  
/ 1.00 1.00 4.00 1.00 1.00 1.00  
/TOWCABLE  
/ 39.50  
/DUMMY  
/ -999.99  
/DECIMATIONVALUE  
/ 1  
/PRIVTEXT  
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```



**1) Rohdaten: HEM155\_RAW.XYZ**

Beispiel:

/Unprocessed data

/ XYZ EXPORT [03/29/2017]

/ DATABASE [.\15501\_HEMnew.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 15501

//Date 2014/10/01

Random 0

```
3446465 5928689 8.1924203 53.4870702 0 101421.0 1.22 0.00 870.10 921.21 -1.68 57.69 -153.84 ... -98.59 51.94 0 ... 0 0.0014 0.0031
3446469 5928689 8.1924838 53.4870651 1 101421.1 1.22 0.00 870.34 921.42 -1.6 58.30 -153.10 ... -98.53 51.91 4136 ... 540 0.0013 0.0052
3446473 5928688 8.1925472 53.4870600 2 101421.2 1.37 0.00 870.58 921.63 -1.83 58.32 -151.97 ... -98.45 52.07 8272 ... 1079 0.0018 0.0057
```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALTR	ft	Messwert des Radarhöhenmessers, defekt
ALTL_FP	m	Messwert des Laserhöhenmessers
ZHG_BIRD_RAW	m	GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
ZHG_HELI_RAW	m	GPS-Höhe über NHN des Hubschraubers, Bezugssystem WGS84
ALTB	ft	barometrische Höhe des Hubschraubers, defekt
EM1I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41420 Hz
EM1Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41420 Hz
EM2I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8370 Hz
EM2Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8370 Hz
EM3I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=387 Hz
EM3Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=387 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=1820 Hz, defekt
EM5Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1820 Hz, defekt
EM6I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5400 Hz
EM6Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5400 Hz
EM1_FREQ	Hz	Frequenz für EM1-Kanäle (etwa f=41420 Hz)
EM2_FREQ	Hz	Frequenz für EM2-Kanäle (etwa f=8370 Hz)
EM3_FREQ	Hz	Frequenz für EM3-Kanäle (etwa f=387 Hz)
EM4_FREQ	Hz	Frequenz für EM4-Kanäle (etwa f=133200 Hz)
EM5_FREQ	Hz	Frequenz für EM5-Kanäle (etwa f=1820 Hz)
EM6_FREQ	Hz	Frequenz für EM6-Kanäle (etwa f=5400 Hz)
CPPL		Powerline-Detektor
CPSP		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

/PRIVTEXT

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: HEM155\_DAT.XYZ

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using HemView17b and Oasis montaj

/Levelled and corrected data

/Transferred on 28-FEB-17 14:45

```

/      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 15501
//Date 2014/10/01

```

Line 1.1

```

3392966 5956908 7.377027 53.732352 45240 112945.0 1.71 58.38 58.38 60.09 59.57 162.60 140.28 ... 679.34 65.10
3392970 5956908 7.377090 53.732352 45241 112945.1 1.78 58.25 58.25 60.04 59.48 162.33 140.04 ... 679.51 65.40
3392974 5956908 7.377153 53.732353 45242 112945.2 1.85 58.13 58.13 59.98 60.50 161.88 139.66 ... 679.75 65.80

```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus DEM = DGM-D25 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM)
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
REAL_1	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=387 Hz
QUAD_1	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=387 Hz
REAL_2	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=1820 Hz, aus Modelldaten entnommen (=SYN_R2)
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1820 Hz, aus Modelldaten entnommen (=SYN_Q2)
REAL_3	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=5400 Hz, auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
QUAD_3	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5400 Hz, auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
REAL_4	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=8370 Hz
QUAD_4	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8370 Hz
REAL_5	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=41420 Hz
QUAD_5	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41420 Hz
REAL_6	ppm	korrigierter Wert der In-phase-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: HEM155\_APP.XYZ**

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using HemView17b and Oasis montaj

/Levelled and corrected data

/Half-space parameters

/Transferred on 17-FEB-17 13:00

/ 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 15501

//Date 2014/10/01

Line 1.1

```
3392966 5956908 7.377027 53.732352 45240 112945.0 1.71 58.38 58.38 60.09 59.57 3.19 2.1 24.99 ... 10.49 -2.79 0.68
3392970 5956908 7.377090 53.732352 45241 112945.1 1.78 58.25 58.25 60.04 59.48 3.20 2.18 25.05 ... 10.54 -2.77 0.68
3392974 5956908 7.377153 53.732353 45242 112945.2 1.85 58.13 58.13 59.98 60.50 3.20 2.28 25.16 ... 10.61 -2.73 0.68
```

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	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus DEM = DGM-D25 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM)
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHOA_1	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=387 Hz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=387 Hz
ZST_1	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=387 Hz
RHOA_2	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=1820 Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=1820 Hz
ZST_2	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=1820 Hz
RHOA_3	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=5400 Hz
KDA_3	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=5400 Hz
ZST_3	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=5400 Hz
RHOA_4	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=8370 Hz
KDA_4	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=8370 Hz
ZST_4	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=8370 Hz
RHOA_5	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=41420 Hz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=41420 Hz
ZST_5	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=41420 Hz
RHOA_6	$\Omega$ m	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



**4) Inversionsdaten HEM155\_INV\_L6.XYZ (analog bei HEM155\_INV\_L20.XYZ)**

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using HemView17b and Oasis montaj

/Levelled and corrected data (synthetic CP2k data used for inversion)

/Inversion models

/Transferred on 17-FEB-17 13:20

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

//Flight 15501

//Date 2014/10/01

Line 1.1

```
3392966 5956908 7.377027 53.732352 45240 112945.0 1.71 58.38 58.38 60.09 59.57 0.13 0.12 ... 2.44 11.00
3392970 5956908 7.377090 53.732352 45241 112945.1 1.78 58.25 58.25 60.04 59.48 0.14 0.13 ... 2.43 10.50
3392974 5956908 7.377153 53.732353 45242 112945.2 1.85 58.13 58.13 59.98 60.50 0.16 0.14 ... 2.40 10.10
```

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	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus DEM = DGM-D25 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM)
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHO_I_1	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der ersten (oberen) Schicht der N-Schicht-Inversionsmodelle
D_I_1	m	Mächtigkeit der ersten (oberen) Schicht der N-Schicht-Inversionsmodelle
...	...	...
RHO_I_N	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der N-ten Schicht (Substratum) der N-Schicht-Inversionsmodelle
QALL	%	Anpassungsfehler der Inversion (L1-Norm)

Anmerkungen: siehe 2) und

im Header steht zusätzlich:

/NUMLAYER

/ 6 (bzw. 20)

/MUELAYER

/ 0

/IFREQUENCY

/ 1 1 0 1 1 1



## B) Magnetik

Beschreibung der ASCII-Datei mit den niveaukorrigierten (gelevelten) Ergebnissen der Hubschraubermagnetik für das Messgebiet 155 Baltrum.  
Die Beschreibungen gelten in analoger Weise auch für das Messgebiet 149 Langeoog 2.

### Magnetikdaten HMG155.XYZ

```
/BGR HEADER:  
/  
/AREANAME  
/BALTRUM  
/AREACODE  
/155  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE FOR X AND Y  
/9 3 BESSEL  
/REFERENCE SYSTEM FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/G-822A  
/IGRF  
/2010  
/LON_BASE  
/8.0551205  
/LAT_BASE  
/53.5078049  
/ALT_BASE  
/10  
/TOWCABLE  
/ 39.50  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```





Beispiel:

/ XYZ EXPORT [03/28/2017]

/ DATABASE [.\MagSplit.gdb]

/ Processing by M. Ibs-von Seht (BGR) using HmgView01

/ 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 15501

//Date 2014/10/01

Line 1.1

3392966	5956908	7.377027	53.732352	452400	20141001	224821.0	60.1	-9999.0	56.1	49507.42	49507.42	49482.46	-59.45	-59.45	-50.91
3392970	5956908	7.377090	53.732352	452410	20141001	224822.0	60.0	-9999.0	55.3	49507.42	49507.42	49481.31	-59.34	-59.34	-50.92
3392974	5956908	7.377153	53.732353	452420	20141001	224823.0	60.0	-9999.0	55.3	49507.42	49507.42	49480.23	-59.22	-59.22	-50.92

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	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_RADAR_RAW	mV	Messwert der Radarhöhe des Hubschraubers über Grund, defekt
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde über Grund
T_BASE_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_BASE_F	nT	bereinigte Daten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Flugsonde
DELTA_T	nT	Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes nach Abzug des IGRF und der Tagesvariation sowie Korrektur des richtungsabhängigen Fehlers (heading error)
DELTA_T_LEV	nT	Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes (inkl. anthropogene Effekte)
DELTA_T_LEV_CE	nT	Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes ohne anthropogene Effekte

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.



## C) Radiometrie

Beschreibung der ASCII-Datei mit den niveauekorrigierten (gelevelten) Ergebnissen der Hubschrauberradiometrie für das Messgebiet 155 Baltrum. Die Beschreibungen gelten in analoger Weise auch für das Messgebiet 149 Langeoog 2.

### Radiometriedaten HRD155.xyz

/BGR HEADER:

```
/AREANAME  
/BALTRUM  
/AREACODE  
/155  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE FOR X AND Y  
/ 9 3 BESSEL  
/REFERENCE SYSTEM FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/RS-500 RSX-5  
/BACKGROUND (IAEA 2003, S.60) a(TC), b(TC), a(K), b(K), a(U), b(U), a(Th), b(Th), a(upU), b(upU)  
/51.40, 1.0437, 6.59, 0.0619, 1.20, 0.0509, 0.02, 0.0649, 0.32, 0.0133  
/STRIPPING (IAEA 2003, S.65) alpha, beta, gamma, a  
/0.270, 0.400, 0.772, 0.052  
/ATTENUATION (IAEA 2003, S.67) mue(TC), mue(K), mue(U), mue(Th)  
/0.00983, 0.01255, 0.00667, 0.00982  
/SENSITIVITY (IAEA 2003, S.68) S(K), S(U), S(Th)  
/24.50, 3.60, 1.78  
/TOWCABLE  
/ 39.50  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```



Befliegung Baltrum / Langeoog 2, 2014

Beispiel:

/ XYZ EXPORT [03/28/2017]

/ DATABASE [.\HrdSplit.gdb]

/ Processing by M. Ibs-von Seht (BGR) using HrdView112

/ X Y LON LAT RECORD UTC\_DATE UTC\_TIME ALT 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\_LEV POT\_LEV URA\_LEV THO\_LEV EXPO

//Flight 15501

//Date 2014/10/01

Line 1.1

3392971	5956917	7.377092	53.732434	45240	20141001	112945	96.2	56.1	94.4	102.522	25.0	999	75
3393010	5956910	7.377689	53.732384	45250	20141001	112946	95.9	53.3	93.4	102.522	25.0	999	75
3393049	5956904	7.378287	53.732333	45260	20141001	112947	95.4	52.9	91.8	102.532	25.0	999	75

Fortsetzung der letzten drei Zeilen:

232	26	11	8	3	-9999.0	-9999.00	-9999.00	-9999.00	-9999.00	-9999.00			
232	26	11	8	3	-9999.0	-9999.00	-9999.00	-9999.00	-9999.00	-9999.00			
232	26	11	8	3	-9999.0	-9999.00	-9999.00	-9999.00	-9999.00	-9999.00			

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger, Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT	m	GPS-Höhe über NN des Hubschraubers, Bezugssystem WGS84
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde 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_KOR	cps	Gesamtstrahlung (korrigiert, geglättet)
POT_KOR	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden (korrigiert, geglättet)
URA_KOR	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden (korrigiert, geglättet)
THO_KOR	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden (korrigiert, geglättet)
EXPO	µR/h	Ionendosisleistung am Erdboden, ermittelt aus korrigierten Gehalten

Anmerkungen: siehe Magnetik



## Anhang III

### DVD-Inhalt

\Bericht\ Technischer Bericht 155 Baltrum-Langeoog.pdf	149_rho_010mbsl_L20.ft.gi 149_rho_010mbsl_L20.ft.xml 149_rho_010mbsl_L20.hdr
\Daten\ \HEM\ Format_description_HEM155.txt HEM149_APP.xyz HEM149_DAT.xyz HEM149_INV_L20.xyz HEM149_INV_L6.xyz HEM149_RAW.xyz HEM155_APP.xyz HEM155_DAT.xyz HEM155_INV_L20.xyz HEM155_INV_L6.xyz HEM155_RAW.xyz	149_rho_015mbsl_L20.ft 149_rho_015mbsl_L20.ft.gi 149_rho_015mbsl_L20.ft.xml 149_rho_015mbsl_L20.hdr 149_rho_020mbsl_L20.ft 149_rho_020mbsl_L20.ft.gi 149_rho_020mbsl_L20.ft.xml 149_rho_020mbsl_L20.hdr 149_rho_025mbsl_L20.ft 149_rho_025mbsl_L20.ft.gi 149_rho_025mbsl_L20.ft.xml 149_rho_025mbsl_L20.hdr 149_rho_030mbsl_L20.ft
\HMG\ Format_description_HMG155.txt HMG149.XYZ HMG155.XYZ	149_rho_030mbsl_L20.ft.gi 149_rho_030mbsl_L20.ft.xml 149_rho_030mbsl_L20.hdr 149_rho_040mbsl_L20.ft
\HRD\ Format_description_HRD155.txt HRD149.XYZ HRD155.XYZ	149_rho_040mbsl_L20.ft.gi 149_rho_040mbsl_L20.ft.xml 149_rho_040mbsl_L20.hdr 149_rho_050mbsl_L20.ft 149_rho_050mbsl_L20.ft.gi
\Karten\ \ArcGis\ \DEM\ 149_topo.ft 149_topo.ft.gi 149_topo.ft.xml 149_topo.hdr 155_topo.ft 155_topo.ft.gi 155_topo.ft.xml 155_topo.hdr	149_rho_050mbsl_L20.ft.xml 149_rho_050mbsl_L20.hdr 149_rho_060mbsl_L20.ft 149_rho_060mbsl_L20.ft.gi 149_rho_060mbsl_L20.ft.xml 149_rho_060mbsl_L20.hdr 149_RHOA1_IBS_LEV_IQ.ft 149_RHOA1_IBS_LEV_IQ.ft.gi 149_RHOA1_IBS_LEV_IQ.ft.xml 149_RHOA1_IBS_LEV_IQ.hdr 149_RHOA2_IBS_LEV_IQ.ft 149_RHOA2_IBS_LEV_IQ.ft.gi 149_RHOA2_IBS_LEV_IQ.ft.xml
\HEM\ 149_rho_001mbsl_L20.ft 149_rho_001mbsl_L20.ft.gi 149_rho_001mbsl_L20.ft.xml 149_rho_001mbsl_L20.hdr 149_rho_005mbsl_L20.ft 149_rho_005mbsl_L20.ft.gi 149_rho_005mbsl_L20.ft.xml 149_rho_005mbsl_L20.hdr 149_rho_010mbsl_L20.ft	149_RHOA2_IBS_LEV_IQ.ft.xml 149_RHOA2_IBS_LEV_IQ.hdr 149_RHOA3_IBS_LEV_IQ.ft 149_RHOA3_IBS_LEV_IQ.ft.gi 149_RHOA3_IBS_LEV_IQ.ft.xml 149_RHOA3_IBS_LEV_IQ.hdr 149_RHOA4_IBS_LEV_IQ.ft 149_RHOA4_IBS_LEV_IQ.ft.gi 149_RHOA4_IBS_LEV_IQ.ft.xml 149_RHOA4_IBS_LEV_IQ.hdr

149\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
149\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
149\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
149\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
149\_ZST3\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_ZST3\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_ZST3\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_ZST3\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
149\_ZST4\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_ZST4\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_ZST4\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_ZST4\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
149\_ZST5\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_ZST5\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_ZST5\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_ZST5\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
149\_ZST6\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
149\_ZST6\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
149\_ZST6\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
149\_ZST6\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_rho\_001mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_001mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_001mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_001mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_005mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_005mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_005mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_005mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_010mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_010mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_010mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_010mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_015mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_015mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_015mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_015mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_020mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_020mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_020mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_020mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_025mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_025mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_025mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_025mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_030mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_030mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_030mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_030mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_040mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_040mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_040mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_040mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_050mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_050mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_050mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_050mbsl\_L20.hdr  
155\_rho\_060mbsl\_L20.flt  
155\_rho\_060mbsl\_L20.flt.gi  
155\_rho\_060mbsl\_L20.flt.xml  
155\_rho\_060mbsl\_L20.hdr  
155\_RHOA1\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_RHOA1\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_RHOA1\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_RHOA1\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_RHOA2\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_RHOA2\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_RHOA2\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_RHOA2\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_RHOA3\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_RHOA3\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_RHOA3\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_RHOA3\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_RHOA4\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_RHOA4\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_RHOA4\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_RHOA4\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_RHOA5\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_RHOA6\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_ZST1\_IBS\_LEV\_IQ.hdr  
155\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.flt  
155\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.flt.gi  
155\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.flt.xml  
155\_ZST2\_IBS\_LEV\_IQ.hdr



155_ZST3_IBS_LEV_IQ.flt	THO_149.flt.gi
155_ZST3_IBS_LEV_IQ.flt.gi	THO_149.flt.xml
155_ZST3_IBS_LEV_IQ.flt.xml	THO_149.hdr
155_ZST3_IBS_LEV_IQ.hdr	THO_155.flt
155_ZST4_IBS_LEV_IQ.flt	THO_155.flt.gi
155_ZST4_IBS_LEV_IQ.flt.gi	THO_155.flt.xml
155_ZST4_IBS_LEV_IQ.flt.xml	THO_155.hdr
155_ZST4_IBS_LEV_IQ.hdr	TOT_149.flt
155_ZST5_IBS_LEV_IQ.flt	TOT_149.flt.gi
155_ZST5_IBS_LEV_IQ.flt.gi	TOT_149.flt.xml
155_ZST5_IBS_LEV_IQ.flt.xml	TOT_149.hdr
155_ZST5_IBS_LEV_IQ.hdr	TOT_155.flt
155_ZST6_IBS_LEV_IQ.flt	TOT_155.flt.gi
155_ZST6_IBS_LEV_IQ.flt.gi	TOT_155.flt.xml
155_ZST6_IBS_LEV_IQ.flt.xml	TOT_155.hdr
155_ZST6_IBS_LEV_IQ.hdr	URA_149.flt
	URA_149.flt.gi
\HMG\ DELTA_T_LEV_149.flt	URA_149.flt.xml
DELTA_T_LEV_149.flt.gi	URA_149.hdr
DELTA_T_LEV_149.flt.xml	URA_155.flt
DELTA_T_LEV_149.hdr	URA_155.flt.gi
DELTA_T_LEV_155.flt	URA_155.flt.xml
DELTA_T_LEV_155.flt.gi	URA_155.hdr
DELTA_T_LEV_155.flt.xml	
DELTA_T_LEV_155.hdr	\Karten\ \DEM\ 155 Baltrum Langeoog DEM.pdf
DELTA_T_LEV_CE_149.flt	
DELTA_T_LEV_CE_149.flt.gi	\Karten\ \Fluglinien\ 155 Baltrum Langeoog Fluglinien.pdf
DELTA_T_LEV_CE_149.flt.xml	
DELTA_T_LEV_CE_149.hdr	
DELTA_T_LEV_CE_155.flt	
DELTA_T_LEV_CE_155.flt.gi	\Karten\ \HEM\ 155 Baltrum Langeoog Widerstand 01m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
DELTA_T_LEV_CE_155.flt.xml	155 Baltrum Langeoog Widerstand 05m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
DELTA_T_LEV_CE_155.hdr	155 Baltrum Langeoog Widerstand 10m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
	155 Baltrum Langeoog Widerstand 15m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
\HRD\ EXPO_149.flt	155 Baltrum Langeoog Widerstand 20m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
EXPO_149.flt.gi	155 Baltrum Langeoog Widerstand 25m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
EXPO_149.flt.xml	155 Baltrum Langeoog Widerstand 30m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
EXPO_149.hdr	155 Baltrum Langeoog Widerstand 40m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
EXPO_155.flt	155 Baltrum Langeoog Widerstand 50m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
EXPO_155.flt.gi	155 Baltrum Langeoog Widerstand 60m <sup>↵</sup> unter NHN.pdf
EXPO_155.flt.xml	
EXPO_155.hdr	
POT_149.flt	
POT_149.flt.gi	
POT_149.flt.xml	
POT_149.hdr	
POT_155.flt	
POT_155.flt.gi	
POT_155.flt.xml	
POT_155.hdr	
THO_149.flt	

---

155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa1.pdf	\VRS\ \L6\ VRS1491019_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa2.pdf	VRS1491028_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa3.pdf	VRS1491029_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa4.pdf	VRS1491039_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa5.pdf	VRS1491049_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa6.pdf	VRS1550011_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa7.pdf	VRS1550012_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa8.pdf	VRS1550021_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa9.pdf	VRS1550031_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa10.pdf	VRS1550041_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Halbraumwiderstand <sup>⊥</sup> rhoa11.pdf	VRS1550051_L6.pdf
155 Baltrum Langeoog Schwerpunktstiefe zst1.pdf	
155 Baltrum Langeoog Schwerpunktstiefe zst2.pdf	
155 Baltrum Langeoog Schwerpunktstiefe zst3.pdf	\L20\ VRS1491019_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Schwerpunktstiefe zst4.pdf	VRS1491028_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Schwerpunktstiefe zst5.pdf	VRS1491029_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Schwerpunktstiefe zst6.pdf	VRS1491039_L20.pdf
\Karten\ \HMG\ 155 Baltrum Langeoog Magnetik anthropogene <sup>⊥</sup> Effekte.pdf	VRS1491049_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Magnetik CE.pdf	VRS1550011_L20.pdf
\Karten\ \HRD\ 155 Baltrum Langeoog Dosisleistung.pdf	VRS1550012_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Gesamtstrahlung.pdf	VRS1550021_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Kalium.pdf	VRS1550031_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Thorium.pdf	VRS1550041_L20.pdf
155 Baltrum Langeoog Uran.pdf	VRS1550051_L20.pdf

## **Anhang IV**

### **Karten**

(Originalkarten 1:25.000 verkleinert auf ca. 1:90.000)



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.