

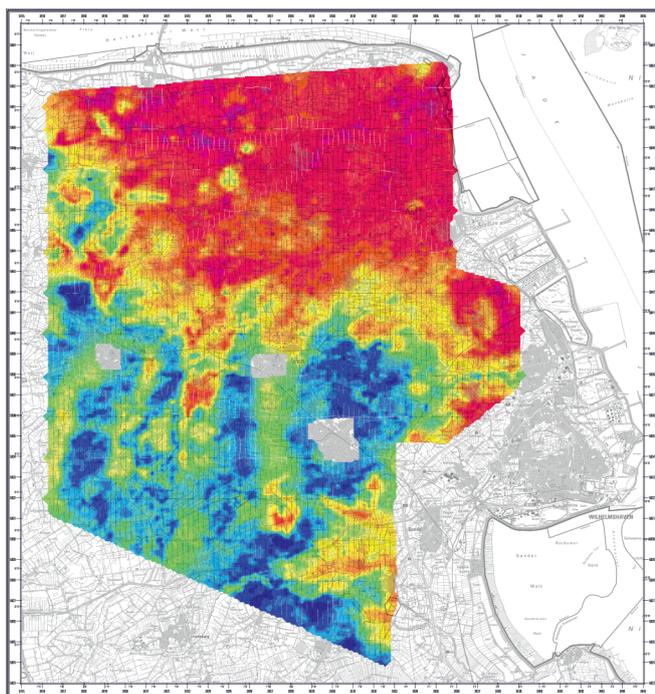
A. Ullmann, B. Siemon, M. Ibs-von Seht,
J. Pielawa



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Technischer Bericht Hubschraubergeophysik Befliegung Jever

2009/2014





**Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe**

**Technischer Bericht
Hubschrauber-geophysik
Befliegung Jever**

2009/2014



BGR-Projekte:

D-AERO (A-0302003.A)

D-AERO-Auswertung (A-0302012.A)

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

Datum: 25.07.2017

Inhaltsverzeichnis

Personal	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Kartenverzeichnis	V
Liste der Vertikalsektionen	VI
Abkürzungen	VII
1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	3
3. Das Messgebiet	5
4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR	8
4.1. Messhubschrauber	9
4.2. Messausrüstung.....	9
4.3. Elektromagnetik.....	10
4.4. Magnetik.....	11
4.5. Radiometrie	12
4.6. Navigations- und Positionierungssystem	13
4.7. Datenerfassung.....	15
4.8. Videosystem	16
4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber	16
5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten	17
5.1. Prozessabläufe	18
5.2. Positionsdaten.....	18
5.2.1. GPS-Koordinaten	18
5.2.2. Radarhöhen	19
5.2.3. Laserhöhen.....	20
5.2.4. Barometrische Höhen	21
5.2.5. Topografische Höhen	22
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik.....	22
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems	23
5.3.2. Verschiebungs- und Driftkorrektur	25
5.3.3. Datenauswahl und -korrektur.....	25
5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter	26
5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten	28
5.3.6. Statistische Niveaueinpassung.....	29
5.3.7. Dateninterpolation und -glättung	31
5.3.8. Datenfehler und Qualitätsparameter	31

5.3.9. 1D-Inversion der HEM-Daten.....	32
5.3.10. Präsentation der HEM-Ergebnisse.....	33
5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik.....	34
5.4.1. Magnetisches Totalfeld.....	34
5.4.2. Berechnung des IGRF	35
5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen	35
5.4.4. Statistische Niveaueinpassung.....	35
5.4.5. Präsentation der HMG-Ergebnisse	36
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie	36
5.5.1. Energiekalibrierung	37
5.5.2. Verminderung des Rauschens	37
5.5.3. Effektive Höhe.....	38
5.5.4. Registrierzeitkorrektur.....	38
5.5.5. Hintergrundstrahlung.....	39
5.5.6. Radonkorrektur	40
5.5.7. Compton-Streuung.....	41
5.5.8. Zählraten in Standardflughöhe.....	41
5.5.9. Radioelementgehalte und Dosisleistung.....	42
5.5.10. Filterung und statistische Niveaueinpassung.....	43
5.5.11. Präsentation der HRD-Ergebnisse	44
6. Kartografische Arbeiten.....	45
6.1. Topografische Karten 1:50.000	45
6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software.....	45
6.3. Ergebniskarten.....	46
7. Archivierung.....	47
8. Referenzen	49
8.1. Literatur.....	49
8.2. Internetverknüpfungen.....	51
Unterschriften.....	53
Anhang I: Befliegungsdaten Messgebiet Jever.....	55
Anhang II: Beschreibung der Datenformate.....	61
Anhang III: DVD-Inhalt	83
Anhang IV: Karten.....	87
Anhang V: Vertikalsektionen.....	113
Anlage: DVD (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

Angelika **Ullmann**, Geophysikerin, Positions- und HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR

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

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

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

Messgruppe

Dr. Bernhard **Siemon**, Physiker, Einsatzleitung, Datenkontrolle, B2.1, BGR

Dr. Marion Miensopest, Geophysikerin, Datenkontrolle, B2.1, BGR

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

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

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

Carsten **Plath**, Fluggerätemechaniker, 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 des Messgebietes Jever
2. Fluglinienkarte (Soll-Fluglinien) für das Messgebiet Jever
3. Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR
4. Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen und geschichteten Halbräumen

Tabellenverzeichnis:

1. Technische Daten der Befliegung Jever
 2. Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
 3. Geophysikalische Messsysteme
 4. HEM-Systemparameter für BKS36a und BKS60
 5. Bodenstation
 6. Energiebereiche und Kanaluordnungen registrierter Strahlungsquellen
 7. Navigations- und Positionierungssysteme
 8. Höhenmesser
 9. Datenerfassung und -aufzeichnung
 10. Sonstige Ausrüstung
 11. HEM-Auswertung (Übersicht)
 12. Filterparameter für die Korrektur der Laserhöhe in Bereichen mit Vegetation
 13. Kalibrier- und Korrekturwerte für das HEM-System (BKS36a und BKS60)
 14. Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung
 15. Filterparameter für die HEM-Niveauekorrektur
 16. Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung
 17. Konstanten für die Radonkorrektur
 18. Koeffizienten der Einstreueraten
 19. Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen
 20. Sensitivitäten
 21. Lineare Abschwächungskoeffizienten μ_v der Vegetation
 22. Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Jever
 23. Gitterparameter
 24. Inhalt der DVD
- A-1:** Flugprotokoll
- A-2:** Gebietsdateien

Kartenverzeichnis (1:50.000):

1. Topografie und Fluglinien
2. Digitales Höhenmodell in m NHN
3. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 129.500 Hz (ρ_{06}) in Ωm
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 41.000 Hz (ρ_{05}) in Ωm
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8.300 Hz (ρ_{04}) in Ωm
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 5.410 Hz (ρ_{03}) in Ωm
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1.770 Hz (ρ_{02}) in Ωm
8. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 380 Hz (ρ_{01}) in Ωm
9. Schwerpunktstiefe bei 129.500 Hz (zst6) in m unter GOK
10. Schwerpunktstiefe bei 41.000 Hz (zst5) in m unter GOK
11. Schwerpunktstiefe bei 8.300 Hz (zst4) in m unter GOK
12. Schwerpunktstiefe bei 5.410 Hz (zst3) in m unter GOK
13. Schwerpunktstiefe bei 1.770 Hz (zst2) in m unter GOK
14. Schwerpunktstiefe bei 380 Hz (zst1) in m unter GOK
15. Spezifischer Widerstand bei 1 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
16. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
17. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
18. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
19. Spezifischer Widerstand bei 20 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
20. Spezifischer Widerstand bei 25 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
21. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
22. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
23. Spezifischer Widerstand bei 50 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
24. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter NHN in Ωm (aus Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten)
25. Qualitätskontrollparameter
26. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
27. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT, bezüglich anthropogener Signale korrigiert
28. Gesamtstrahlung in cps
29. Gehalte von Kalium im Boden in %
30. Äquivalentgehalte von Thorium im Boden in ppm
31. Äquivalentgehalte von Uran im Boden in ppm
32. Dosisleistung am Boden in $\mu\text{R/h}$

Liste der Vertikalsektionen:

Messprofile:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1. VRS 1.1 | 36. VRS 36.1 |
| 2. VRS 2.1 | 37. VRS 37.1 |
| 3. VRS 3.1 | 38. VRS 38.1 |
| 4. VRS 4.1 | 39. VRS 39.1 |
| 5. VRS 5.1 | 40. VRS 40.1 |
| 6. VRS 6.1 | 41. VRS 41.1 |
| 7. VRS 7.1 | 42. VRS 42.1 |
| 8. VRS 8.1 | 43. VRS 43.1 |
| 9. VRS 9.1 | 44. VRS 44.1 |
| 10. VRS 10.1 | 45. VRS 45.1 |
| 11. VRS 11.2 | 46. VRS 46.1 |
| 12. VRS 12.1 | 47. VRS 47.1 |
| 13. VRS 13.1 | 48. VRS 48.1 |
| 14. VRS 14.1 | 49. VRS 49.1 |
| 15. VRS 15.1 | 50. VRS 50.1 |
| 16. VRS 16.1 | 51. VRS 51.1 |
| 17. VRS 17.1 | 52. VRS 52.1 |
| 18. VRS 18.1 | 53. VRS 53.1 |
| 19. VRS 19.1 | 54. VRS 54.1 |
| 20. VRS 20.1 | 55. VRS 55.1 |
| 21. VRS 21.1 | 56. VRS 56.1 |
| 22. VRS 22.1 | 57. VRS 57.1 |
| 23. VRS 23.1 | 58. VRS 58.1 |
| 24. VRS 24.1 | 59. VRS 59.1 |
| 25. VRS 25.1 | 60. VRS 60.1 |
| 26. VRS 26.1 | 61. VRS 61.1 |
| 27. VRS 27.1 | 62. VRS 62.1 |
| 28. VRS 28.1 | 63. VRS 63.1 |
| 29. VRS 29.1 | 64. VRS 64.1 |
| 30. VRS 30.1 | 65. VRS 65.1 |
| 31. VRS 31.1 | 66. VRS 66.1 |
| 32. VRS 32.1 | 67. VRS 67.1 |
| 33. VRS 33.1 | 68. VRS 68.1 |
| 34. VRS 34.1 | 69. VRS 69.1 |
| 35. VRS 35.1 | 70. VRS 70.1 |

Kontrollprofile:

- | |
|----------------------|
| 91. VRS 1.9 |
| 92. VRS 2.9 |
| 93. VRS 3.9 |
| 94. VRS 4.9 |
| 95. VRS 5.9 |
| 96. VRS 6.9 |
| 97. VRS 7.9 |
| 98. VRS 8.9 |
| 99. VRS 9.9 |
| 100. VRS 10.8 |
| 101. VRS 11.9 |
| 102. VRS 12.9 |
| 103. VRS 13.9 |

Abkürzungen

° , ' , "	Grad, Sekunde, Minute
°C	Grad Celsius
%	Prozent
1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional
α , β , γ , a	Einstreuratzen
α_e , β_e , γ_e	höhenkorrigierte Einstreuratzen
α_n	komplexe Wellenzahl (n =0: Luft)
a	Zählrate der Hintergrundstrahlung des Hubschraubers inkl. des Messsystems
a_x	Korrekturfaktoren für Radonstrahlung
A, A'	Amplituden
Ah	Amperestunden
Am	Amperemeter
As	Amperesekunden
A/D	analog/digital
ALT	transformierte Sensorhöhe
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
b	kosmische Einstreuung
Bi	Bismut
B_n	Schichtadmittanz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
c_l	effektive Kabellänge
cm	Zentimeter
cps	counts per second
C	Gehalt eines Radioelementes im Boden
C_H	Zählrate im Höhenstrahlungskanal
Cs	Cäsium
CF	Compact Flash
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CHECK	Marker für gelöschte Datenbereiche
δ	Residual
δ_p	inverse, normierte Skintiefe (= h/p)
Δh_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

$\Delta \log d_a$	Niveaufehler d_a
$\Delta \log \rho_a$	Niveaufehler $\log \rho_a$
ΔI	Nullniveaufehler der In-phase-Komponente
ΔQ	Nullniveaufehler der Quadrature-Komponente
ΔT	Anomalien des erdmagnetischen Feldes
ΔV	magnetische Tagesvariationen
d_a	scheinbare Tiefe
d_n	Schichtmächtigkeiten
D-AERO	Projekt: Deutschlandweite Aerogeophysik-Befliegung zur Kartierung des nahen Untergrundes und seiner Oberfläche
D_a	scheinbarer Abstand
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
DTK	Digitale Topographische Karte (z. B. DTK25-V)
DVD	Digital Versatile Disc
ε	Komponentenverhältnis (= Q/I)
$\varepsilon, \varepsilon_n$	dielektrische Permittivität ($n = 0$: Luft, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
e	Basis des natürlichen Logarithmus ($1/e \approx 0.37$)
eTh	Äquivalentgehalt von Thorium
eU	Äquivalentgehalt von Uran
E	Dosisleistung am Erdboden
EDWI	ICAO-Flughafen-Code: Wilhelmshaven-Mariensiel
EM	Elektromagnetik
EU	Europäische Union
f	Frequenz
flt	ArcGIS GRIDFLOAT-Format
ft	feet (Fuss)
F	IGRF
FAS	Fugro Airborne Surveys (heute: CGG)
FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik
G	Verstärkungskonstante des Gammastrahlenspektrometers
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GCG	German Combined QuasiGeoid
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	globales Navigationssatellitensystem

GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
h	Höhe des EM-Systems in Meter über der Erdoberfläche (Birdhöhe)
h ₀	Normhöhe des Spektrometers (h ₀ = 80 m)
h _e	effektive Höhe
h _r	Höhe des Hubschraubers
H_GPS	GPS-Höhe des Hubschraubers
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_lDEM_kor	bezüglich eines DEM korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_r	Radarhöhe der Flugsonde
h_rmess	Radarhöhe des Hubschraubers (in feet)
hPa	Hektopascal
Hz	Hertz
HCP	horizontal-koplanar
HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HMG	Hubschraubermagnetik
HRD	Hubschrauberradiometrie
i	Laufparameter (Daten)
i	imaginäre Einheit
I	In-phase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten
I _c	berechnete In-phase-Komponente
I _{lev}	korrigierte In-phase-Komponente
I _{noise}	Fehler der In-phase-Komponente
IAEA	International Atomic Energy Association
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IBS	interactive Bereichsselektion
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
J ₀	Bessel-Funktion (1. Art, 0. Ordnung)
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kpa	barometrischer Druck
kPa	Kilopascal

K	Grad Kelvin
K	Kalium
λ	Wellenzahl
l	Liter
log	Logarithmus
L	Messprofilkennung (line)
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
μ	Absorptionskoeffizient
μ, μ_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
m üG	Meter über Gelände
ms	Millisekunde
MeV	Megaelektronenvolt
MHz	Megahertz
mxd	ArcGIS-Datenformat
n	Laufparameter (Modellparameter)
nT	Nanotesla
n_R	Rohzählrate
N	Anzahl Frequenzen
N_c	Zählrate der Hintergrundstrahlung
N_L	Anzahl Schichten
N_m	Zählraten $N_{\text{Th}(\text{corr})}$, $N_{\text{U}(\text{corr})}$, $N_{\text{K}(\text{corr})}$ und $N_{c,\text{TC}}$ bei effektiver Höhe h_e
N_R	registrierzeitkorrigierte Rohzählrate
N_s	Zählraten N_m , bezogen auf die Standardhöhe h_0
N_x	bzgl. Hintergrundstrahlung und STP-Bedingungen korrigierte Zählraten ($x = K, U, \text{Th}$)
$N_{x(\text{corr})}$	bzgl. der Einstreuraten korrigierte Zählraten ($x = K, U, \text{Th}$)
NaI	Natriumiodid
NO, NW	Nordosten, Nordwesten
NASVD	noise adjusted singular value decomposition
NHN	Normalhöhennull (Höhe nach DHHN92)
NL	nicht-linear
Ωm	Ohmmeter (Ohm*m)
ω	Kreisfrequenz
O	Osten
π	Kreiszahl (= 3,14159265...)
p	Skintiefe
ppm	parts per million

P	im Hubschrauber gemessener Luftdruck
P_0	mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe ($P_0 = 101,325$ kPa)
PC	Personalcomputer
PDF	Portable Document Format
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
Q_c	berechnete Quadrature-Komponente
Q_{lev}	kjorrigierte Quadrature-Komponente
Q_{noise}	Fehler der Quadrature-Komponente
QCP, QCPM	Datenqualitätsparameter und -marker
ρ, ρ_n	spezifischer (Schicht-)Widerstand ($n = 0$: Luft, $\rho_0 > 10^8 \Omega m$)
ρ_a	scheinbarer spezifischer Widerstand
ρ_w	scheinbarer spezifischer Widerstand von (Meer-)Wasser
r	Abstands- oder Ortsparameter
R_1	komplexer Reflexionsfaktor
Rn	Radon
s	Sekunde
std	Standardabweichung
S	Sensitivität
SHP	Shaft Horse Power
SO, SW	Südosten, Südwesten
STD	Gesamtrauschen (Summe aller rel. STF)
STF	Standardfehler
STP	Standardbedingungen (Standardtemperatur und -druck)
t	Zeit
t_L	aktive Registrierzeit des Spektrometers
tanh	Tangens Hyperbolicus
topo	topografische Höhe
T	Kontrollprofilkennung (tieline)
T	Totalintensität des erdmagnetischen Feldes
T	Temperatur
T_0	Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala (273,15 K)
Th	Thorium
Tl	Thallium
TC	Gesamtstrahlung
U	Uran
U_UP	Urankanal (noch oben schauend)
U_R	Anteil Radon im Urankanal
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)

V	Volt
Vm	Voltmeter
Vs	Voltsekunde
VCX	vertikal-koaxial
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
W	Westen
WGS	World Geodetic System
xyz	Geosoft-Format (ASCII-Daten)
X, Y, Z	kartesische Koordinaten, X = N, Y = O, Z = Tiefenachse
z	Tiefe
z*	Schwerpunktstiefe
Z	relatives magnetisches Sekundärfeld

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 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.

Ziel der Befliegung Jever war es, zum Verständnis der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse beizutragen. Dabei lag der Fokus auf der Abschätzung des Gefährdungspotentials für die Versalzung von Süßwasservorkommen auf dem meernahen Festland sowie der Kartierung von oberflächennahen Ton- und Kleivorkommen, die sowohl als Ressource für Baurohstoffe dienen als auch zum Grundwasserschutz beitragen können. Die Ergebnisse können damit auch zur zukünftigen nachhaltigen und wirtschaftlichen Nutzung des norddeutschen Küstenraums genutzt werden, z. B. bei der Abschätzung von der Wasserentnahme aus den Süßwasservorkommen sowie den Auswirkungen einer möglichen Erhöhung des Meeresspiegels.

Das Messgebiet Jever wird im Norden und Nordosten durch die Küste, im Osten durch die Stadt Wilhelmshaven und die A27, im Süden durch die Ortschaft Friedeburg sowie im Westen durch die Ortschaft Werdum begrenzt. Die Gebietsgröße beträgt etwa 490 km². Zur Abdeckung des gesamten Messgebietes wurden 13 Messflüge benötigt. Die 90 N-S Messprofile wurden in einem Abstand von 250 m beflogen. Der Sollabstand der senkrecht dazu verlaufenden 13 W-O Kontrollprofile betrug 2000 m. Die Gesamtprofillänge beträgt 2139 km.

Das für die Befliegung 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 mittleren Messpunktabstand von etwa 4 m bzw. 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.

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

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

- Fluglinienkarte der vermessenen Profile (Ist-Flugwege);
- Digitales Geländemodell;
- Scheinbare spezifische Widerstände (Halbraumwiderstände) und Schwerpunkstiefen für sechs Messfrequenzen 380, 1.770, 5.410, 8.300, 41.000 und 129.500 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 6 bzw. 20 Schichten;
- Qualitätskontrollparameter für HEM-Daten;
- Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes;
- Gesamtstrahlung, Gehalte von Kalium im Boden, Äquivalenzgehalte von Thorium und Uran im Boden und die Dosisleistung am Boden.

Ferner sind für alle Fluglinien Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes im horizontalen Maßstab 1:50.000 mit 20-facher Überhöhung erstellt worden, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen mit 6 bzw. 20 Schichten.

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.

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 grundwasserführende Schichten, Grundwasserstauer und mögliche Versalzungszone 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., 2014b) und Varel (Siemon et al., 2014c) 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 im Messgebiet Jever.

3. Das Messgebiet

Das Messgebiet Jever wird im Norden und Nordosten durch die Küste, im Osten durch die Stadt Wilhelmshaven und die A27, im Süden durch die Ortschaft Friedeburg sowie im Westen durch die Ortschaft Werdum begrenzt (**Abbildung 1**). Es erstreckt sich von etwa 7°44' bis 8°05' östlicher Länge und 53°27' bis 53°42' nördlicher Breite. Das Messgebiet Jever stellt somit die östliche Fortsetzung des Messgebietes Esens bis zum Jadebusen dar.

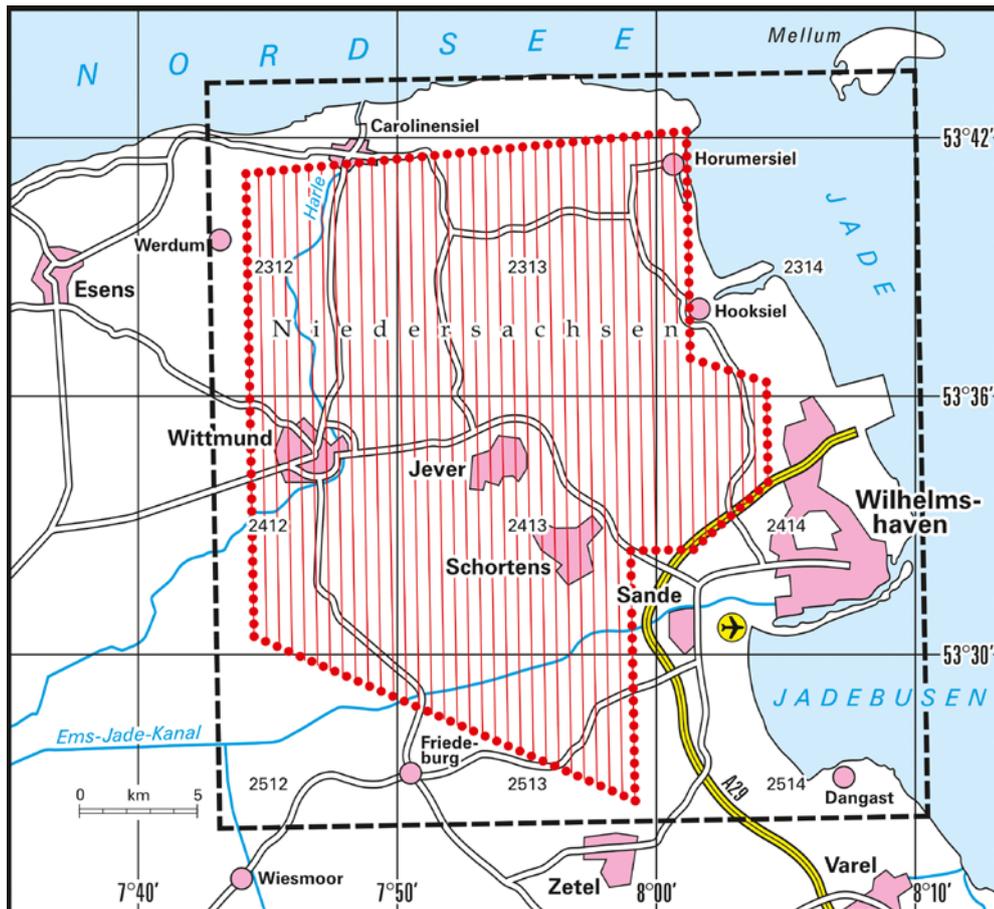


Abbildung 1: Lageskizze des Messgebietes Jever

Die Befliegung des Messgebietes Jever mit drei geophysikalischen Verfahren (Elektromagnetik, Magnetik, Radiometrie) wurde von dem Hubschrauberteam der BGR im Oktober 2009 begonnen, musste aber beim ersten Messflug aufgrund eines Systemausfalls abgebrochen werden. Da nach der Reparatur ein anderes Messgebiet (Nordenham) vorgezogen wurde, danach der Hubschrauber für etwa zwei Jahre nicht zur Verfügung stand und dann weitere Messgebiete mit höherer Priorität vorgezogen werden mussten, konnte die Befliegung Jever erst Ende April 2014 fortgesetzt werden. Nach weiteren 12 Messflügen, die vom Flughafen (JadeWeserAirport) in Wilhelmshaven-Mariensiel (EDWI) aus starteten, konnte nach drei Wochen die Messkampagne abgeschlossen werden. Mit den 13 Messflügen wurden insgesamt 3931 km geflogen und 1.039.580 Messpunkte erfasst, was einer Gesamtregistrierzeit von etwa 28,9 Stunden entspricht. Mit 90 Mess- und 13 Kontrollprofilen wurde eine Fläche von etwa 490 km² vermessen. Für die Auswertung konnten Profile mit einer Gesamtlänge von 2139 Profilkilometern mit 565.733 Messpunkten verwendet werden.

Die Messprofile sind durch L*.1 und die Kontrollprofile durch T*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L*.2 bzw. T*.8 gekennzeichnet (**Abbildung 2**). Zu Beginn und am Ende der Messflüge wurde – wenn möglich – in Messflughöhe die Fahrrinne der Jade sowie ein etwa 2 km langer Abschnitt auf dem Flughafen parallel zur Landebahn als Referenzstrecken für Kalibrierzwecke überflogen. Einzelheiten zum Messgebiet und den Messflügen 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 1:50.000 (DTK 50-V).

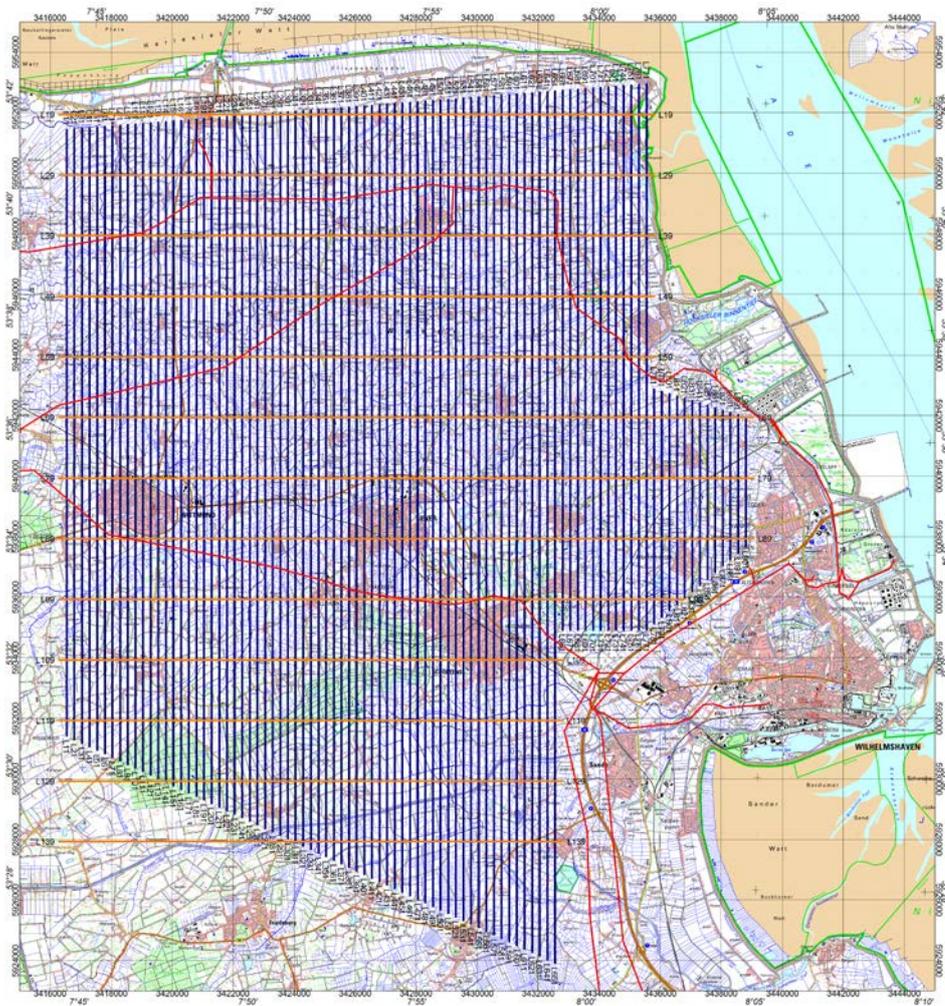


Abbildung 2: Fluglinienkarte (Soll-Fluglinien: Messprofile in blau und Kontrollprofile in orange) für das Messgebiet Jever; in rot: Hochspannungsleitungen; Hintergrund: Georeferenzierte Rasterdaten der Topographischen Karte 1:50.000 (DTK 50-V).

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Jever keine besonderen Ansprüche an den eingesetzten Piloten (M. Klenke, HeliJet Charter GmbH). In dem Messgebiet gab es aber einige Hindernisse, wie Windparks, Hochspannungsleitungen, Radaranlagen und Ortschaften, denen ausgewichen werden musste. Die zum Teil starken Störungen der Messungen, z. B. durch Stromleitungen, Straßen oder über Ortschaften, beeinträchtigten die Qualität der Messdaten, die aber generell sehr gut ist.

Tabelle 1: Technische Daten der Befliegung Jever

Messgebiet BGR-Gebietsnummer	Jever 133
Befliegungszeitraum	12.10.2009 28.04.–08.05.2014 19.–21.05.2014
Größe des Messgebietes	490 km ²
Gesamtprofilkilometer:	2139 km
Zahl der Messflüge	13
Bezeichnung der Messflüge	13301–13313
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	48 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit über Grund	136 km/h
Mittlerer Messpunktabstand	3,8 m
Zahl der Messprofile	90
Länge der Messprofile	5–29 km
Richtung der Messprofile	0° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	250 m
Zahl der Kontrollprofile	13
Länge der Kontrollprofile	9–23 km
Richtung der Kontrollprofile	90° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	2000 m
Zahl der Sonderprofile „Referenzstrecke“	9

Die Sollflughöhe des Hubschraubers mit Flugsonde, die etwa 40 m tiefer hängt, beträgt entlang der Messprofile 70 m über der Erdoberfläche (**Abbildung 3**). Über Wald, bebauten Gebieten und Hochspannungsleitungen kann die niedrige Flughöhe aus Sicherheitsgründen nicht immer eingehalten werden. Daher liegt die mittlere Flughöhe der Flugsonde meist oberhalb von 30 m. Bei der Befliegung des Messgebietes Jever 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.

Die Bodenstation zur Aufzeichnung der magnetischen Tagesvariationen wurde auf dem Flughafengelände aufgestellt, in 2009 bei 8°02'56" östlicher Länge und 53°30'00" nördlicher Breite und in 2014 bei 8°03'18" östlicher Länge und 53°30'28" nördlicher Breite.

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 3).

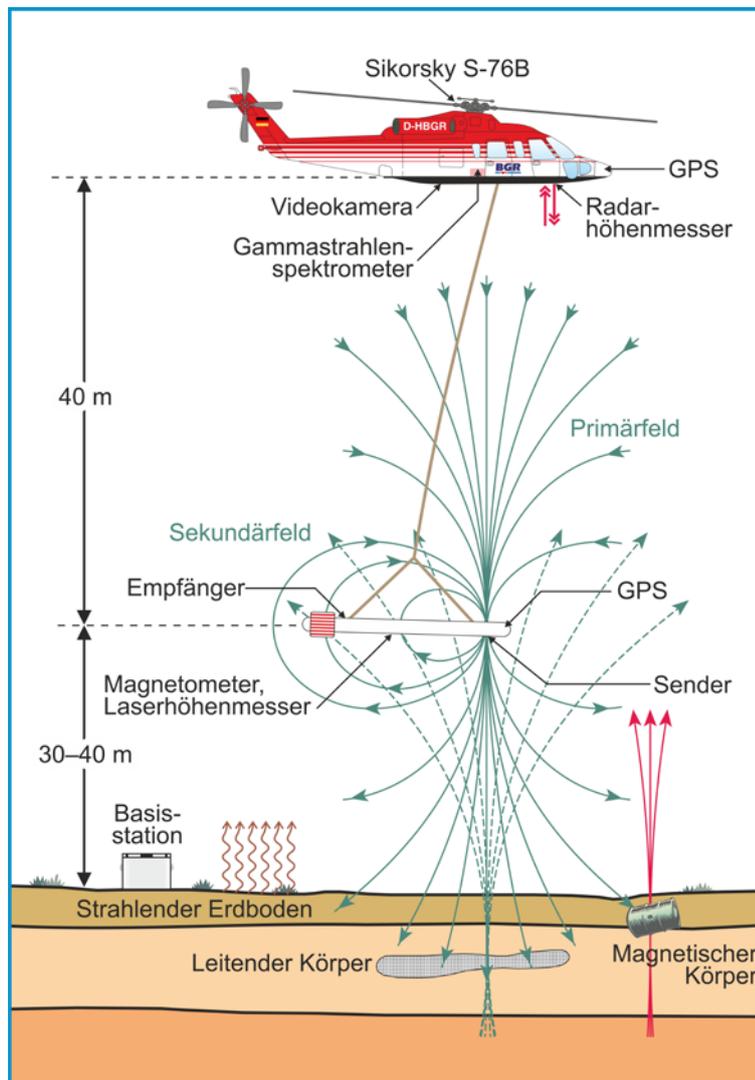


Abbildung 3: Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR

4.1. Messhubschrauber

Im Jahre 1986 wurde vom Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) der derzeit eingesetzte Hubschrauber vom Typ Sikorsky S-76B (siehe **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 3**). 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 (**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	I. Elektromagnetisches 6-Frequenz-Messsystem (HEM)	
	Aufgabe	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes bis zu Tiefen von etwa 150 m
	Hersteller	Fugro Airborne Surveys (FAS), Kanada; in 2013 übernommen von CGG (Compagnie Générale de Géophysique)
	Gerätebezeichnung	Resolve BGR, 2009: BKS36a (intern: 61), 2014: BKS60 (intern: 60)
	II. Cäsiummagnetometer	
	Aufgabe	Messung des erdmagnetischen Totalfeldes
	Hersteller	Geometrics, USA
	Gerätebezeichnung	G-822A
Hubschrauber	III. Gammastrahlenspektrometer	
	Aufgabe	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
	Hersteller	2009: Exploranium, Kanada, 2014: Radiation Solutions Inc., Kanada
	Gerätebezeichnung	2009: GR-820 mit separatem Kristalldetektor: GPX-1024/256 2014: 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 (siehe **Abbildung 3**).

Bei den hier verwendeten HEM-Systemen werden für jede der sechs Messfrequenzen im Bereich von 386 Hz bis 133 kHz (BKS36a, **Tabelle 4**) bzw. 380 Hz bis 130 kHz (BKS60, **Tabelle 4**) eigene Spulensysteme benutzt, die aus horizontal-koplanar bzw. vertikal-koaxial angeordneten Sende-, Empfänger-, Kompensations- und Kalibrierspulen bestehen.

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

Tabelle 4: HEM-Systemparameter für BKS36a und BKS60

Frequenz [Hz] BKS36a / BKS60	Spulenabstand [m] BKS36a / BKS60	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
386 / 380	7,938 / 7,918	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.817 / 1.770	7,931 / 7,918	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
5.390 / 5.410	9,055 / 9,042	vertikal-koaxial	EM_6	3. Frequenz
8.360 / 8300	7,925 / 7,957	horizontal-koplanar	EM_2	4. Frequenz
41.420 / 41.000	7,912 / 8,033	horizontal-koplanar	EM_1	5. Frequenz
133.200 / 129.500	7,918 / 7,906	horizontal-koplanar	EM_4	6. Frequenz

Mit Hilfe der Kalibrierspulen, die im Zentrum der jeweiligen Empfängerspulen 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 Empfängerspule 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 (In-phase I und Quadrature Q), kann die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes bzw. deren Kehrwert, der spezifische Widerstand, berechnet werden, wobei die Felder der 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 380 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 Krustefeld 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

Bodenstation	
Aufgabe	Automatische Registrierung des magnetischen Totalfeldes
Hersteller	Bodenstation: FAS, Kanada Magnetometer: Cs-Sensor H-8, SCINTREX, Kanada
Gerätebezeichnung	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 Photovervielfacherröhren 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 einem separaten Ka-

nal 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 (**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 (**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 ins HeliDAS 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.

Tabelle 7: Navigations- und Positionierungssysteme

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

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

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 ±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.

Tabelle 8: Höhenmesser

Höhenmesser		
Hubschrauber	Radarhöhenmesser	
	Aufgabe	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über der Erdoberfläche
	Hersteller	Sperry, USA
	Gerätebezeichnung	AA-200
	Barometrischer Höhenmesser	
	Aufgabe	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über NHN
	Hersteller	FAS, Kanada
	Gerätebezeichnung	HeliDAS
Flugsonde	Laserhöhenmesser	
	Aufgabe	Präzise Bestimmung der Höhe der Flugsonde über der Erdoberfläche
	Hersteller	Riegl, Österreich
	Gerätebezeichnung	LD90-3800VHS

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

4.7. Datenerfassung

Die Erfassung und Aufzeichnung der geophysikalischen und Positionsdaten erfolgt über das HeliDAS (**Helicopter Data Acquisition System**). Die Daten werden auf einer Compact Flash (CF) Karte gespeichert. Das HeliDAS (**Tabelle 9**) ist mit zwei Tablet-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		
Hubschrauber	Datenerfassungs- und Datenaufzeichnungssystem	
	Aufgabe	Digitalisierung analoger Signale; Zwischenspeicherung digitaler Daten; Zusammenstellung ausgewählter Daten und Speicherung der Positions- und Messdaten auf Speicherkarte
	Hersteller	FAS, Kanada
	Gerätebezeichnung	HeliDAS

4.8. Videosystem

Die im Boden des Hubschraubers fest installierte Videokamera 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. Eine Aufzeichnung des Flugweges erfolgte nicht.

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		
Hubschrauber	Zentrale Spannungsversorgung	
	Aufgabe	Pufferung der DC-Bordspannung des Hubschraubers
	Hersteller	Sikorsky, USA
	Geräteschrank	
	Aufgabe	Aufnahme von Messgeräten des aerogeophysikalischen Messsystems
	Hersteller	Aviation Support, Deutschland

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. gemeinsamem 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 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**). Im zugehörigen Zwischenbericht (Siemon et al., 2014b), der in der Regel auf diesem Bearbeitungsstand basiert, sind die Ergebnisse nach einigen weiterführenden Bearbeitungsschritten, wie z. B. die grundlegenden Niveauekorrekturen, beschrieben.

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;
- Korrektur von Niveaufehlern in den Daten;
- Korrektur von anthropogenen Effekten in den Daten;
- Zusammenführung der Profildaten aller Messflüge zu Gesamtgebietsdateien;
- Herstellung von thematischen Karten und Schnitten.

Methodenspezifisch sind vor allem die Umrechnungen der jeweiligen Messdaten in die gewünschten geophysikalischen Parameter sowie die Korrektur der anthropogenen Effekte.

5.2. Positionsdaten

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

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 Jever 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 Geoidundulationsmodells EGM2008 (Pavlis, 2012) auf in der Kartografie übliche Geoidhöhen umgerechnet und anschließend ebenfalls in das lokale Gauß-Krüger-Koordinatensystem transformiert. Das GCG2011 (German Combined QuasiGeoid 2011) wurde durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und das Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover (IfE) in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) entwickelt.

Ein vom ebenfalls vom BKG bereitgestelltes digitales Höhenmodell DGM25 liefert Geländehöhen auf einem 25 Meter Raster. Diese Höhen weisen das gleiche Bezugssystem auf wie die aus den GPS-Daten berechneten Höhen des Messsystems. Die Differenz dieser beiden Höhenwerte liefert schließlich die Werte für die Höhe des Hubschraubers über Grund. Diese Werte werden beispielsweise bei der Prozessierung der Radiometriedaten verwendet.

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. Die GPS-Daten in der Flugsonde BKS60 wiesen ferner eine zeitliche Verschiebung von 0,7 s (7 Werte) auf, was ebenfalls korrigiert wurde.

Die Höhenangaben in Deutschland sind bezogen auf DHHN92 und werden in m NHN angegeben.

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 Jever bei $c_1 = 40,0 \text{ m} (\pm 0,9 \text{ m})$.

5.2.2. Radarhöhen

Die Radarhöhenwerte, die vom Hubschrauber aus gemessen werden, sind nur bis 2010 der Datenerfassung zugeführt worden. Da dies im Messgebiet Jever nur für den ersten Messflug (13301), der in 2009 stattfand, erfolgte, wurden nur für diesen die Radarhöhenwerte nach dem bisherigen Verfahren bearbeitet. Dabei werden die Radarwerte h_{r_mess} , die zunächst in der Einheit „feet“ vorliegen, in Meter über Gelände (m üG) bezogen auf die Höhe der Flugsonde umgerechnet (h_r). Hierzu wird die effektive Kabellänge c_1 abgezogen und ein Korrekturfaktor angebracht:

$$h_r [m] = (h_{r_mess} [\text{feet}] / 2) \cdot 0,3048 [m/\text{feet}] \cdot r_1 - c_1 [m],$$

wobei fehlende Radarhöhen durch Laserhöhen ersetzt werden.

Bei allen anderen Flügen der Befliegung Jever wurden 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 (Δh_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 (Δh_{l_noise}) und der Maximalwerte (Δh_{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, nachdem einzelne Ausreißer durch Anwendung eines schmalen (1 Wert) nicht-linearen Filters eliminiert worden sind, 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 Maximalwerten 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 (Δh_{l_kor}) und die Addition der Basislinie, um die korrigierte Laserhöhe (h_{l_kor}) zu erhalten. **Tabelle 12** fasst die verwendeten Filterparameter zusammen.

Tabelle 12: 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)	Δh_l
Nicht-linear	Filterlänge: 2 Werte (\approx 8 m), Toleranz: 1,0	Δh_{l_noise}
Tiefpass	Abschneideperiode: 1 s (\approx 40 m)	Δh_{l_noise}
Nicht-linear	Filterlänge: 1 Wert (\approx 4 m), Toleranz: 2,0	Δh_l
Schwellwert	Schwellwert (Δh_{l_noise}): 0,2 m	Δh_l
Maximum	Filterlänge: 21 Werte (\approx 84 m)	Δh_l
Schwellwert	Schwellwert ($\Delta h_{l_max} - \Delta h_l$): 2 m	Δh_l
Tiefpass	Abschneideperiode: 1 s (\approx 40 m)	Δh_{l_kor}

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 (siehe **Tabelle 1**) hiervon abweichen, ergeben sich andere Meterangaben.

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 Laserhöhen, die durch die Neigung der Flugsonde (durchschnittlich etwa 6°) verursacht werden, 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° 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 Abstandmessung zwischen Flugsonde und Erdboden auftreten als in flachem Gelände.

Aufgrund der oben genannten Schwierigkeit wurden im Messgebiet Jever 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**):

$$h_{\text{DEM_kor}} [\text{m}] = h_{\text{GPS_kor}} [\text{m NHN}] - \text{DEM} [\text{m NHN}].$$

Daraus ergab sich eine mittlere Laserhöhe von 48,2 m ($\pm 27,8$ m).

5.2.4. Barometrische Höhen

Die barometrische Höhe kpa (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:

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

mit $P_0 = 1013,25$ hPa, $T_0 = 288,15$ K, $G = 0,0065$ 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_{kpa} und H_{GPS} .

5.2.5. Topografische Höhen

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

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

Sie wird benötigt, um die aus den Messdaten abgeleiteten Geländehöhen in Kartenform oder auch dreidimensional darstellen zu können. Ferner eignen sich die topografischen Höhen besser für die manuelle Nachkorrektur der Laserhöhe als die Laserhöhe bzw. die reduzierte Laserhöhe, da z. B. Baumbestände oder Täler und Bergrücken 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:

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

an die GPS-Höhe angebracht wurde:

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

5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik

Die Auswertung der gemessenen HEM-Daten, Realteil I (In-phase oder 0°-Phase) und Imaginärteil Q (Out-of-phase, Quadrature oder 90°-Phase) erfordert bis Level 3 (**Tabelle 11**) mehrere Bearbeitungsschritte:

- Berücksichtigung der Kalibrierung;
- Verschiebungs- 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 wie auch die nachfolgenden Datenverarbeitungsschritte wurden zunächst mit Geosoft Oasis montaj durchgeführt. Die in dieser Programmumgebung entwickelten Routinen wurden anschließend in eine eigene Software (HemView) übertragen und durch weitere Routinen ergänzt. Alle notwendigen Parameter sind in Konfigurationsdateien abgelegt.

5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems

Das HEM-System wurde von dem Hersteller Fugro Airborne Surveys (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 13a, b**) 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 mit einem Flug über die Nordsee vor Helgoland überprüft. Dort gibt es eine etwa 50 m tiefe Rinne, die eine ausreichend große Wassertiefe garantiert. Unter der Annahme homogener Leitfähigkeit des Meerwassers wurden die Halbraumwiderstände des Meerwassers und die Abstände der Wasseroberfläche zum Messsystem aus den HEM-Daten zu jeder Messfrequenz bestimmt und mit den Sollwerten, dem spezifischen Widerstand von Meerwasser und der Laserhöhe, verglichen. Die resultierenden Korrekturwerte für Amplitude und Phase wurden zunächst für die jeweiligen Messflüge verwendet (siehe Siemon et al., 2014b).

Im Messgebiet Jever kamen zwei HEM-Systeme zum Einsatz (siehe Tabelle 4). In 2009 wurde ein Flug (13301), welcher drei Profile umfasst, mit dem System BKS36a durchgeführt, in 2014 folgten dann zwölf weitere Flüge (13302–13313) mit dem System BKS60. Bei den Messflügen in 2014 wurden auch Messdaten über der Fahrrinne der Jade im Jadebusen bzw. über einem Testprofil am Flughafen in

Mariensiel aufgezeichnet. Diese Bereiche wurden genutzt, um manuell die Amplituden- und Phasenkorrektur für jede Messfrequenz und jeden individuellen Flug in HemView durchzuführen. Die neuermittelten Korrekturwerte sind in den Konfigurationsdateien abgelegt und in **Tabelle 13b** aufgelistet; dort mit Standardabweichungen (Werte in Klammern). Meist betragen die Amplitudenkorrekturen etwa 3% und die Phasenkorrekturen weniger als 2° mit geringen Standardabweichungen. Lediglich bei der höchsten Messfrequenz ($f = 129.500$ Hz) sowie bei den vertikal-koaxialen Spulen ($f = 5.410$ Hz) waren die Korrekturen etwas größer (10% bzw. 24% in der Amplitude). Bei einigen Flügen waren aber auch größere Korrekturen notwendig (insbesondere bei $f = 1.770$ Hz), um die durch fehlerhafte Autokalibrierung verursachten Amplituden- und Phasenfehler auszugleichen. Diese Werte wurden bei der Bestimmung der Mittelwerte und der Standardabweichungen nicht berücksichtigt. Die Kalibrierwerte für den Flug mit dem HEM-System BKS36a wurden iterativ unter Zuhilfenahme der Halbraumparameter (**Kapitel 5.3.6**) ermittelt. Hierzu wurden die Gitter der Halbraumparameter, die aus den Daten aller anderen Flüge erstellt worden waren, als Referenz verwendet. Die resultierenden Korrekturwerte sind in **Tabelle 13a** aufgelistet. Die z. T. großen Korrekturen stimmen tendenziell mit früheren Kalibrierungen überein (siehe Siemon et al., 2014b). Mit dieser Korrektur erfolgte auch eine Transformation auf die Spulenparameter von BKS60.

Tabelle 13a: Kalibrier- und Korrekturwerte für das HEM-System (BKS36a)

Frequenz in Hz	Kalibrierwerte FAS		Korrekturwerte BGR	
	I [ppm]	Q [ppm]	Amplitude []	Phase [°]
386	-205,0	-205,0	1,18	0,00
1.817	-175,0	-175,0	1,04	0,00
5.400	78,0	78,0	1,00	0,00
8.372	-143,6	-143,6	1,42	-3,20
41.415	-666,7	-666,7	1,02	0,00
133.200	-1387,0	-1387,0	0,51	11,10

Tabelle 13b: Kalibrier- und Korrekturwerte (plus Standardabweichungen) für das HEM-System (BKS60)

Frequenz in Hz	Kalibrierwerte FAS		Korrekturwerte (std) BGR	
	I [ppm]	Q [ppm]	Amplitude []	Phase [°]
380	-215,9	-215,9	0,97 (0,03)	0,24 (0,56)
1.770	-214,9	-214,9	0,97 (0,02)	-0,24 (0,56)
5.410	106,1	106,1	0,76 (0,02)	1,52 (0,99)
8.300	-224,9	-224,9	0,98 (0,01)	0,50 (0,35)
41.000	-581,9	-581,9	1,04 (0,02)	1,81 (0,54)
129.500	-566,9	-566,9	1,10 (0,03)	1,58 (1,59)

5.3.2. Verschiebungs- und Driftkorrektur

Die Sekundärfelddaten werden mit einer Rate von 1000 Hz erfasst und nach Hardwarefilterung mit 10 Hz registriert. Dabei entsteht eine zeitliche Verzögerung von 0,8 s, die vor der Weiterverarbeitung der HEM-Daten korrigiert wird.

Die Sekundärfelddaten können auch noch Primärfeldanteile enthalten, die nicht vollständig durch die verwendeten Kompensationsspulen erfasst worden sind. Ferner kann sich dieser Anteil durch temperaturbedingte Drift während des Fluges ändern. Daher ist es notwendig, diese Drift (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 jeweilige Nullniveau repräsentieren. Die Interpolationsgeraden zwischen jeweils benachbarten Stützstellen liefern die Bezugsniveaus, von denen aus die Messamplituden der Sekundärfelder zu bestimmen sind. Die Driftkorrektur 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 Nullniveaufassung 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 eine statistische Niveaueinstellung durchgeführt (**Kapitel 5.3.6**), die auf aus den relativen Sekundärfeldwerten abgeleiteten Halbraumparametern beruht (**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 zwar auf den gesamten Datensatz, aber Nachkorrekturen sind 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 (siehe **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 zugehörigen relativen Standardfehler, so wird dieser Wert eliminiert. Zur Unterdrückung von Ausreißern werden nicht-lineare Filter (NL) benutzt und zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die verbliebenen HEM-Daten anschließend mit einem Tiefpass-Filter (TP) geglättet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität sind unterschiedliche Filterparameter für die Daten der jeweiligen Frequenzen erforderlich (Tabelle 14).

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 (siehe 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 (siehe Kapitel 5.3.7).

Tabelle 14: Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung

Frequenz [Hz]	STF [Werte]	Schwellwert für rel. STF	NL-Filter [Werte/Toleranz]	TP-Filter [Werte]
380	25	0,15	20 / 3,0	30
1.770	25	0,10	20 / 2,0	30
5.410	20	0,05	10 / 2,0	30
8.300	15	0,05	10 / 2,0	30
41.000	15	0,05	10 / 2,0	30
129.500	15	0,05	10 / 2,0	30

5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter

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

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

wobei $\alpha_0^2 = \lambda^2 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0$ mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$, $\rho_0 > 10^8 \Omega\text{m}$ und $i = \text{imaginäre Einheit}$. J_0 ist eine Bessel-Funktion der ersten Art und nullten Ordnung und R_1 ist der komplexe Reflexionsfaktor, der die Materialparameter (spezifischer Widerstand ρ , magnetische Permeabilität μ und dielektrische Permittivität ϵ) 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 ρ_n , μ_n , ε_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 kalibrierten Sekundärfelder I und Q (in ppm) für jede Frequenz in die Parameter eines homogenen Halbraums

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

Hierzu wurden reduzierte Amplituden A' und Komponentenverhältnisse ε

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

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.

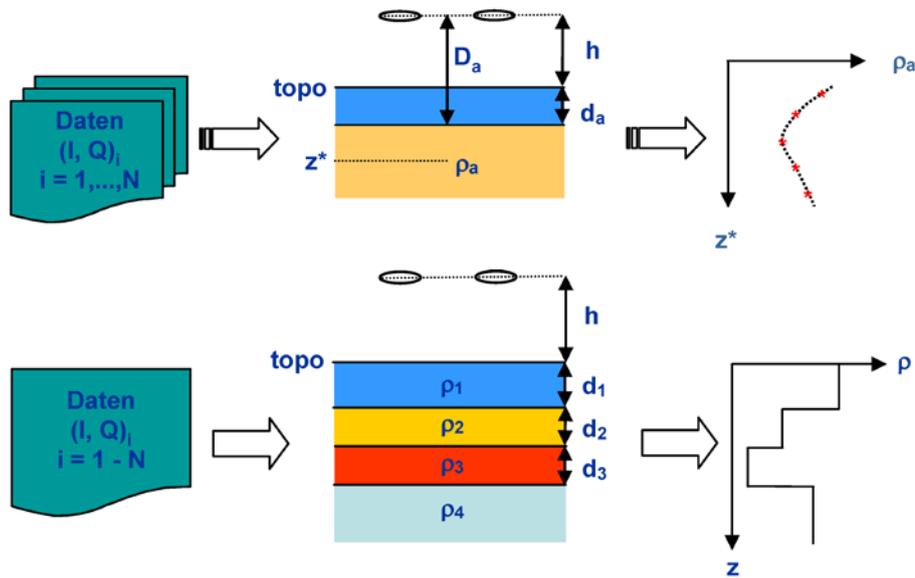


Abbildung 4: Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen (oben) und geschichteten (unten) Halbräumen

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

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

bestimmt (Siemon, 2001). Die Schwerpunkstiefe ist ein Maß für das mittlere Eindringen der induzierten Ströme in den leitenden Erduntergrund und ermöglicht eine Tiefenangabe für den scheinbaren spezifischen Widerstand, die $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven als erste Approximation der vertikalen Widerstandsverteilung (Abbildung 4).

Die berechneten Halbraumparameter können vor der Weiterverarbeitung auf Plausibilität überprüft werden, um beispielsweise bei zu großen Flughöhen ($h \geq 200$ 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 $\delta_p(\epsilon)$ 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 ρ_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, sodass 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 zweistufig: Die Daten in Bereichen mit geringer Beeinflussung werden automatisch durch die verwendeten Filter geglättet. Bei stärkerer Beeinflussung greift eine automatische Erkennung, die die Daten löscht, wenn vorgegebene Schwellwerte für den Datenfehler (siehe **Tabelle 14**) überschritten werden. Darüber hinaus ist eine manuelle Elimination von Daten möglich. Mit Hilfe von topografischen Karten und Google Maps wurden Hochspannungsleitungen, Windparks, Eisenbahnschienen und teilweise größere Häuseransammlungen (z. B. Jever) identifiziert und – falls erforderlich – entsprechende Bereiche in den Daten gelöscht.

Die durch das Löschen entstandenen Datenlücken werden im weiteren Verlauf der Auswertung durch die flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter geschlossen, sofern die Datenlücken nicht zu groß sind. Die interpolierten Bereiche sind auf den Ergebniskarten (siehe **Kapitel 5.3.7** und **Kapitel 6.3**) markiert.

5.3.6. Statistische Niveaueinpassung

Im Allgemeinen ist die herkömmliche Niveaueinpassung (**Kapitel 5.3.2**) nicht ausreichend, da aufgrund der Überfliegung von Ortschaften, Hochspannungsleitungen, Windparks, Radarstationen und Wäldern barometrische Höhenänderungen und folglich auch spürbare Temperaturschwankungen auf das Messsystem und somit auf das Nullniveau einwirkten. Daher ist meist eine statistische Niveaueinpassung erforderlich.

Die Nivellierung der HEM-Daten ist ein zweistufiger Prozess. Zunächst erfolgt die flächenhafte Niveaueinpassung auf Basis der Halbraumparameter, da die HEM-Daten nicht-linear von der Sensorhöhe abhängen und somit nicht direkt nivelliert werden können (Siemon, 2009). Die nivellierten Halbraumparameter werden dann genutzt, um die Niveaueinpassungen für die HEM-Daten abzuleiten.

Die flächenhafte Niveaueinpassung der logarithmierten Halbraumwiderstände ($\log \rho_a$) und der scheinbaren Tiefen (d_s) parallel zu den Messprofilen (L) erfolgt über das *Microlevelling*. Dieses Verfahren verwendet die Gitter der Messprofilaten, in denen Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpassfilters (Filterlänge etwa drei- bis vierfacher Linienabstand, hier 1000 m, Ordnung 8) und eines direktionalen Kosinusfilters (betont Strukturen senkrecht zu den Linien, hier Azimut 0° , Grad 2) identifiziert werden. Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten

entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Niveaufehlerwerte liefert. Die abgetasteten Fehlerwerte werden – ggf. nach Ausschluss von Extremwerten – mit einem Spline-Filter (Glätte 0,85, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den ursprünglichen Halbraumparametern abgezogen (siehe **Tabelle 15**).

Die Halbraumparameter entlang der Kontrollprofile (T) – wie auch entlang der Messprofile, die beim Microlevelling nicht verwendet wurden – werden nivelliert, indem diese auf die nivellierten Halbraumparameter der Messprofile bezogen werden. Hierzu werden die nivellierten Halbraumparameter entlang der Kontrollprofile aus den zugehörigen Gittern abgetastet und mit den vorhandenen Halbraumparametern verglichen. Die stark geglätteten Differenzen aus beiden werden schließlich von den Halbraumparametern der Kontrollprofile abgezogen. Vor der Glättung mit einem Spline-Filter (Glätte 0,80, Spannung 0,5) werden wieder Extremwerte ausgeschlossen.

Da bei diesem Verfahren aufgrund der lateralen Filterung der Halbraumparametergitter lokale Anomalien geglättet werden, was das gewünschte Ergebnis verfälschen kann, wird dieses Verfahren nur auf Halbraumparameter angewendet, bei denen zuvor die anthropogenen Effekte (wie in **Kapitel 5.3.5** beschrieben) entfernt worden sind. Verbliebene Verfälschungen, wie beispielweise parallel zu geogenen Strukturen, können im Nachhinein manuell markiert und aus den Fehlerwerten entfernt werden, bevor die finalen Gitter berechnet werden.

Tabelle 15: Filterparameter für die HEM-Niveaurektur

Filter	Filterparameter	Bezugsparameter
Butterworth (HP)	Länge: 1000 m; Ordnung: 8	$\log \rho_a, d_a$ (L)
Direkt. Kosinus	Azimut: 0°; Grad: 2	$\log \rho_a, d_a$ (L)
Spline	Glätte: 0,85; Spannung: 0,5	$\Delta \log \rho_a, \Delta d_a$ (L)
Schwellwert	Schwellwerte ($\Delta \log \rho_a / \Delta d_a$): 0,01 / 0,03	$\Delta \log \rho_a, \Delta d_a$ (T)
Spline	Glätte: 0,80; Spannung: 0,5	$\Delta \log \rho_a, \Delta d_a$ (T)
Nicht-linear	Filterlänge: 50 Werte (≈ 200 m), Toleranz: 10,0	$\Delta I, \Delta Q$
Schwellwert	Schwellwerte ($I_{\text{noise}}/Q_{\text{noise}}$): 0,04–0,1 / 0,04–0,1	$\Delta I, \Delta Q$
Spline	Glätte: 0,85–0,90; Spannung: 0,2	$\Delta I, \Delta Q$
Schwellwert	Schwellwerte ($I_{\text{noise}}/Q_{\text{noise}}$): 0,01–0,04	$I_{\text{lev}}, Q_{\text{lev}}$
Nicht-linear	Filterlänge: 10 Werte (≈ 40 m), Toleranz: 3,0	$I_{\text{lev}}, Q_{\text{lev}}$
Spline	Glätte: 0,55–0,70; Spannung: 0,5	$I_{\text{lev}}, Q_{\text{lev}}$

Im letzten Schritt (*I-Q-Levelling*) werden die Niveaurekturen für jedes Mess- und Kontrollprofil aus den stark geglätteten Differenzen ($\Delta I = I - I_c$ und $\Delta Q = Q - Q_c$) der originären, d. h. kalibrierten, aber ungefilterten HEM-Daten (I und Q) und den aus den nivellierten Halbraumparametern rückgerechneten HEM-Daten (I_c und Q_c) abgeleitet (Siemon, 2009). Hierzu werden – nach Anwendung eines nicht-linearen Filters (50 Werte, Toleranz 10) – die Differenzen ausgewählt, bei denen das Rauschen

(I_{noise} und Q_{noise} , rel. STF, siehe **Tabelle 15**) der originären HEM-Daten klein genug ist, die Sensorhöhe kleiner als 80 m ist und keine markierten, anthropogen beeinflussten Bereiche vorliegen. Die verbliebenen Differenzen werden mit einem Spline-Filter (Glätte 0,85–0,90, Spannung 0,2) geglättet und von den originären HEM-Daten abgezogen. Dabei werden die zuvor gelöschten Bereiche mit den Modelldaten (wie in **Kapitel 5.3.7** beschrieben) wieder aufgefüllt. Die Modelldaten werden auch verwendet, wenn das Rauschen (I_{noise} und Q_{noise}), das aus den korrigierten Daten (I_{lev} und Q_{lev}) neu berechnet wird, zu hoch ist. Auch hier ist es möglich, Niveauekorrekturen, die nicht plausibel sind, zurückzunehmen, indem die Niveauekorrekturen (ΔI und ΔQ) nicht angebracht oder die Lücken mittels Spline-Interpolation aufgefüllt werden. Eventuelle Sprünge in den niveauekorrigierten Daten (I_{lev} und Q_{lev}) an den Rändern der interpolierten Bereiche werden abschließend durch Anwendung von schwachen nicht-linearen und Spline-Filtern geglättet (siehe **Tabelle 15** und **Kapitel 5.3.7**).

5.3.7. Dateninterpolation und -glättung

Die Lücken in den HEM-Daten, die durch die Eliminierung von Daten, deren relative Rauschniveaus über einem Schwellwert lagen bzw. durch die Auswahl der anthropogen beeinflussten Bereiche entstanden sind, werden während der Niveauekorrektur (**Kapitel 5.3.6**) durch flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter mit nachfolgender Neuberechnung der relativen Sekundärfelder (Modellamplituden) geschlossen. Abschließend werden die korrigierten Daten analog zu **Kapitel 5.3.3** gefiltert, aber mit modifizierten Filterparametern. Insbesondere werden die Daten nach Anwendung des nicht-linearen Filters (10 Werte, Toleranz 3) nicht mehr mit einem Tiefpass-Filter, sondern mit einem Spline-Filter (Glätte 0,55–0,70, Spannung 0,5) geglättet (siehe **Tabelle 15**) und gleichzeitig interpoliert.

Somit liegen als finale Daten, die in die Inversion (**Kapitel 5.3.4** und **Kapitel 5.3.9**) eingehen, korrigierte (nivellierte, interpolierte und geglättete) Messwerte an den Messpunkten für jede Messfrequenz vor. In den Karten der Neuberechneten scheinbaren spezifischen Widerstände und der Schwerpunkstiefen (**Kapitel 5.3.10**) sind alle interpolierten Datenpunkte mit einem weißen Punkt markiert.

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. Nach Abschluss der Datenbearbeitung wird dieser über 30 benachbarte Werte, d. h. über eine Wegstrecke von etwa 120 m, aus den Differenzen der ungefilterten und gefilterten Niveaufehler (siehe **Kapitel 5.3.6**) neu berechnet und auf die Modellamplituden (≥ 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, sondern auch das Datenrauschen und die Sensorhöhe berücksichtigen. 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:

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

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 jeder Modellschicht, invertiert. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig. Dieses Startmodell wird automatisch aus den $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet. Das Startmodell kann 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 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. 10% beträgt.

Für die Inversion der HEM-Daten im Messgebiet Jever wurden nivellierte Daten (**Kapitel 5.3.6**) und ein Startmodell mit 6 bzw. 20 Schichten mit zur Tiefe hin ansteigenden Mächtigkeiten inklusive einer

variabel mächtigen Deckschicht verwendet. Bei der Inversion auf der Basis von wenigen (<10) Schichten, bei der alle Modellparameter frei sind, wirken die Modelle oft unruhig und sprunghaft. Demgegenüber erscheinen die Modelle mit vielen Schichten, bei denen die Schichtmächtigkeiten (bis auf die Deckschichtmächtigkeit) festgehalten werden, in vertikale Richtung geglättet. Der Grad der jeweiligen Glättung ist einstellbar durch die Stärke der Regularisierung (2,6 bzw. 2,8 bei 6 bzw. 20 Schichten). Da die Daten der dritten Messfrequenz (5.410 Hz) mit einem vertikal-koaxialen Spulensystem erfasst werden, das empfindlich gegenüber steil stehenden Leitfähigkeitsstrukturen (aber auch gegenüber externen Quellen) ist, während alle anderen horizontal-koplanare Spulensysteme verwenden, die empfindlich für die lateralen Leitfähigkeitsstrukturen sind, wurden diese Daten für die Inversion nicht benutzt.

5.3.10. Präsentation der HEM-Ergebnisse

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten (**Anhang IV**) und Vertikalschnitte (**Anhang V**) präsentiert. Karten (**Kapitel 6**) im Maßstab von 1:50.000 wurden für die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand ρ_a (in Ωm) und Schwerpunkstiefe z^* (in m unter GOK) für sechs Messfrequenzen produziert. Ferner wurden Tiefenschnitte erstellt, die die spezifischen Widerstände ρ (in Ωm) in zehn Tiefen (1–60 m unter NHN) darstellen. Tiefen- und Vertikalschnitte wurden aus den 1D-Inversionsmodellen mit 6 bzw. 20 Schichten abgeleitet. Obwohl die Inversion mit vielen Schichten meist plausiblere Ergebnisse lieferte, wurde für das Messgebiet Jever auch die Variante mit wenigen Schichten beibehalten in Analogie zu den anderen Messgebieten an der Nordseeküste. Im **Anhang IV** befinden sich die verkleinerten Karten zu den Halbraumparametern und den Tiefenschnitten der Inversionsmodelle mit 6 Schichten. Auf der **DVD** sind alle Karten abgelegt.

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 fehlen in Bereichen hoher Leitfähigkeit die Widerstandswerte bei größeren Tiefen, da dort aufgrund der geringeren Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder keine verlässlichen Informationen über die Höhe des spezifischen Widerstandes abgeleitet werden können. Wenn die Lücken nicht zu groß sind (< 700 m), werden sie durch Interpolation geschlossen. Graue Punkte markieren diese Bereiche sowie andere Lücken (bei QCPM = 1), in denen die Daten interpoliert worden sind. Es werden aber nicht nur die interpolierten Bereiche markiert, die für die einzelnen Tiefen auch unterschiedlich sein können, sondern es wird zusätzlich ein Datenqualitätsparameter (QCP) dargestellt. Für die Markierung von Bereichen mit niedriger Datenqualität werden in den Tiefenschnitten auf den schwarzen bzw. grauen Messpunkten weiße Punkte gedruckt, die mit abnehmender Datenqualität größer werden. Die Qualitätskontrollparameter QCP und QCPM (**Kapitel 5.3.8**) sind auch auf einer separaten Karte dargestellt.

In allen Karten können Lücken im Raum des Flughafens Jever sowie der Städte Wittmund, Jever und Schortens auftreten. Die Daten wurden in diesen anthropogen beeinflussten Bereichen gelöscht. Die entstandenen Lücken können aufgrund ihrer Größe nicht vernünftig durch flächenhafte Interpolation geschlossen werden und verbleiben somit in den Karten.

Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:50.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:2.500 wurden basierend auf den 1D-Inversionsergebnissen von jedem der regulären 90 Messprofile und der 13 Kontrollprofile (siehe **Liste der Vertikalsektionen**) 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 unterste Schicht (Substratum) wird mit konstanter Mächtigkeit von 15 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 in relativ homogenen Bereichen stark variieren können. Über den Modellen sind zusätzlich die Höhe der Flugsonde, der Datenqualitätsparameter QCP, der Anpassungsfehler der Inversion und die Messdaten dargestellt, die in einer Legende erklärt werden. Die 1D-Inversionsmodelle weisen in den Bereichen, wo der Marker des QCP existiert (QCPM = 1), Lücken auf. Denn dort ist per Definition des QCP die Datenqualität so gering, dass von einer Interpretation dieser Daten abgesehen werden sollte. Auf der **DVD** sind alle Vertikalschnitte abgelegt.

Im **Anhang V** sind die Vertikalschnitte mit 6 bzw. 20 Schichten in einer speziellen Übersicht dargestellt, um einen schnellen und übersichtlichen Eindruck von den spezifischen Widerständen im Messgebiet zu bekommen. Dort werden die 1D-Inversionsmodelle als Vertikalsektionen profilweise, fortlaufend in der Nummerierung mit 7 Profilen pro Seite dargestellt, wobei lediglich die Höhe der Flugsonde über den Modellen und der Qualitätsparameter QCP unter den Modellen abgebildet ist.

5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik

Die Magnetikdaten werden nach Hardwarefilterung mit 10 Hz registriert. Dabei entsteht eine zeitliche Verzögerung von 2,3 s, die vor der Weiterverarbeitung korrigiert wird. Die Verarbeitung der HMG-Daten erfolgte mit den korrigierten Positionsdaten (siehe **Kapitel 5.2.1** und **5.2.3**). 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 (ΔT) wird das alle fünf Jahre von der IAGA (1992) in Kugelfunktionsdarstellung zur Verfügung gestellte IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) 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 wurden manuell entfernt und durch die Anwendung eines Tiefpass-Filters der Breite 60 s geglättet.

5.4.4. Statistische Niveaueinpassung

Nach Abzug des Hauptfeldes und der Tagesvariationen von den gemessenen magnetischen Werten erfolgt eine statistische Niveaueinpassung. Dazu werden die Differenzen zwischen den magnetischen Anomalien der Mess- und Kontrollprofile an den Kreuzungspunkten berechnet und flugweise gemittelt (*Tieline-Levelling*). Die Differenzen werden dabei aus Gittern (*Grids*) der von anthropogenen Einflüssen befreiten (s. u.) Daten der Mess- und Kontrollprofile ermittelt. Die gemittelten Werte definieren die Niveaueinpassung zwischen den Flügen und stellen somit die Korrekturwerte für die statistische Niveaueinpassung dar. Abweichungen im Niveau der Daten können immer dann auftreten, wenn sich während der Kampagne Änderungen in der Konfiguration der Sensoren von der Bodenstation oder der Flugsonde ergeben haben.

Verbleibende Niveaueinpassungen können, abhängig von der Flugrichtung, von dem Eigenfeld des Hubschraubers hervorgerufen werden (*heading error*). Diese Unterschiede minimieren sich durch das nachfolgende *Microlevelling* deutlich. Das *Microlevelling* basiert auf dem Gitter der Messprofilaten, in welchem Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpass-Filters (Grenzwellenlänge 1500 m, Ordnung 8) und eines direktionalen Kosinus-Filters (Azimut 0°, Grad 1) identifiziert werden. Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Fehlerwerte liefert. Diese werden wiederum mit einem Spline-Filter (Glättung 1,0, Spannung 1,0) stark geglättet und dann von den bis dahin nur mittels Tieline-Levelling korrigierten Daten abgezogen. Das daraus resultierende ΔT -Gitter weist praktisch keine Niveaufehler mehr auf. Abschließend erfolgt auch die Berechnung der Abweichungen der Kontrollprofilaten von den aus dem niveaueinpassierten Gitter entlang der Kontrollprofile abgetasteten Daten. Diese Fehlerwerte werden ebenfalls mit einem Spline-Filter (Glättung 1,0, Spannung 1,0) stark geglättet und dann von den Kontrollprofilaten abgezogen.

In (teilweise) besiedelten Gebieten dominieren in den Karten der magnetischen Anomalien oft die durch anthropogene Quellen hervorgerufenen Effekte. Diese starken Signale wirken sich störend auf das *Microlevelling* und die Identifizierung schwacher geogener Anomalien aus. Daher wird vor dem

Microlevelling ein halbautomatischer Filterprozess zur Eliminierung starker, kleinräumiger Anomalien im ΔT -Gitter angewendet. Zur Lokalisierung der zu löschenden Bereiche wird das analytische Signal von ΔT auf Gitterebene berechnet. Hierin zeigen sich kleinräumige Störungen besonders deutlich und können durch die Anwendung eines einfachen Schwellwertes identifiziert werden. Die Messpunkte, an denen der Schwellenwert des analytischen Signals überschritten wird, sind in dem resultierenden Gitter nicht mehr enthalten. In diesen Filterprozess kann bei Bedarf manuell eingegriffen werden. Das so erzeugte Gitter ist weitgehend von anthropogenen Einflüssen befreit und dient als Basis für das Tieline- und Microlevelling. Bereiche, die durch die Filterung entfernt wurden, werden während des Microlevellings wieder eingefügt, indem dort die aus den umliegenden Bereichen interpolierten Fehlerwerte verwendet werden. Das aus den niveauekorrigierten Daten erzeugte Gitter enthält jedoch noch einige schwächere anthropogene Störanteile.

5.4.5. Präsentation der HMG-Ergebnisse

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

5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie

Die natürliche Gammastrahlung der Gesteine und Böden beruht im Wesentlichen auf den Radioelementen Kalium (K), Uran (U) und Thorium (Th). Entsprechend den Empfehlungen der IAEA (2003) sind die mit dem Gammastrahlenspektrometer im Hubschrauber gemessenen Zählraten in Gehalte von K, U und Th für das obere Erdreich umzurechnen. Die Radioisotope U und Th emittieren selbst keine Gammastrahlung. Um deren Gehalte 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:

- 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) 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 Ergebnis erhält man geglättete Spektren, aus denen die Zählraten der drei interessierenden Energiefenster (siehe **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 gemessen und aufgezeichnet. Die Lufttemperatur wird zu Beginn und Ende des Fluges am Boden an einem im Hubschrauber eingebauten 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_{TC}	19,0
a_K	1,10
a_U	0,35
a_{Th}	0,30
a_1	0,034
a_2	0,042

5.5.7. Compton-Streuung

Der Compton-Effekt beschreibt die Wechselwirkung von Gammaquanten mit Elektronen der äußeren Atomshale 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
α (Th \rightarrow U)	0,270
β (Th \rightarrow K)	0,400
γ (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 μ 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 μ werden die in einer Höhe h gemessenen Zählraten N_m (nach Berücksichtigung der Hintergrundstrahlung und der Einstreueraten) 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:

- μ = 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 μ (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 im Messgebiet Jever nur sehr begrenzt vorkommen, 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 $\mu\text{R}/\text{h}$) ergibt sich folgender Zusammenhang:

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

mit:

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

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

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

5.5.10. Filterung und statistische Niveauanpassung

Die ermittelten Radioelementgehalte und die Gesamtstrahlung 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 zeigten geringfügige Niveauunterschiede zwischen den Messprofilen (*Lines*). Das statistische Rauschen war im Verhältnis zu den sichtbaren, geologisch bedingten Anomalien ebenfalls relativ gering. Zur Verringerung des Rauschens und der Niveauunterschiede werden nach Berechnung der Radionuklidgehalte zwei weitere Bearbeitungsschritte auf die Daten angewendet: Anwendung eines adaptiven Tiefpass-Filters und Niveauekorrektur durch Microlevelling.

Der adaptive Tiefpass-Filter nach Mathis (1987) verringert das statistische Rauschen in den Daten, wobei Anomalien in ihrer Form weniger abgerundet werden als bei herkömmlichen Tiefpassfiltern. Die Filterbreiten betragen 7 Werte bei K, eTh und TC (Gesamtstrahlung) und 11 Werte bei eU. Der den Filterprozess steuernde TC-Kanal wurde zuvor mit einem herkömmlichen Tiefpass der Filterbreite 21 geglättet.

Für das Microlevelling wird zunächst durch Anwendung zweier Filter (Butterworth-Hochpass-Filter (Grenzwellenlänge 1400 m, Ordnung 8) und direktionalen Kosinus-Filter (Azimut 0°, Grad 2,0) auf die Gitter der Ausgangsdaten (Messprofile) ein Gitter erzeugt, welches Niveauunterschiede zwischen benachbarten Messprofilen in stark geglätteter Form enthält (*error grid*). Dieses Gitter wird entlang der Messprofile abgetastet und der so erzeugte Korrekturkanal mit einem Spline-Filter (Glätte 0,85, Spannung 1,0) geglättet. Die geglätteten Korrekturdaten werden von den ursprünglichen Daten abgezogen und aus den resultierenden, niveauekorrigierten Daten der Messprofile wird ein Gitter erzeugt. Dieses Gitter wird entlang der Kontrollprofile abgetastet und daraus ebenfalls ein geglätteter Korrekturkanal erzeugt für die Niveauekorrektur der Kontrolllinien.

5.5.11. Präsentation der HRD-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 (siehe **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 1:50.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurde eine topografische Karte mit Sonderblattschnitt auf Grundlage von Rasterdaten der DTK50-V (Topographische Karte 1:50.000) hergestellt. Zur Abdeckung des Messgebietes ergab sich ein Blatt mit der Ausdehnung von je 30 km × 32 km. **Tabelle 21** enthält die Eckpunktkoordinaten der Blätter.

Tabelle 21: Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Jever

Karteneckpunkt	Gauß-Krüger-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
NW	3415000	5955000
NO	3445000	5955000
SW	3415000	5923000
SO	3445000	5923000

Die Ergebniskarten 1:50.000 basieren auf Rasterdaten der DTK50-V. Für die Topografische Karte für das Messgebiet Jever kamen die Rasterdatenkacheln z2_09_09, z2_09_10, z2_10_09, z2_10_10, z2_11_09, z2_11_10 zur Verwendung. Herausgeber ist das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

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

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 22** zeigt die Gitterparameter, die für das Messgebiet Jever 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 22: *Gitterparameter*

Parameter	Wert
Methode zur Flächeninterpolation	minimale Krümmung
Gitterzellengröße [m]	50
Extrapolationsbereich [m]	700
Zellen außerhalb der Datenpunkte	5
Log-Option	linear, (außer: $\log \rho$, $\log z^*$)

6.3. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Jever wurden 40 geophysikalische Ergebniskarten sowie ein digitales Höhenmodell (DEM) jeweils mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:50.000 hergestellt (siehe Kartenverzeichnis und **Anhang IV**). Alle Karten sind mit einer ausführlichen Legende versehen, die Auskunft über das Messgebiet, die Kartengrundlagen, die Skalierung, den dargestellten Parameter und die beteiligten Institutionen und Personen gibt.

Ferner wurde im Maßstab 1:50.000 eine Fluglinienkarte produziert, die die Lage der Messprofile auf der Grundlage der topografischen Karten 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.

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 23** und **Anhang III**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Für die Darstellung in ArcGIS-Projekten wurden die auf den Karten dargestellten Parameter als Grids im ArcGIS-GRIDFLOAT-Format (*.flt) beigefügt.

Tabelle 23: *Inhalt der DVD*

Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Bericht		Technischer Bericht (PDF) (Acrobat Reader unter http://get.adobe.com/de/reader/)
\Daten...	\HEM	ASCII-Datei der Rohdaten (HEM133_RAW.xyz) ASCII-Datei der bearbeiteten Daten (HEM133_DAT.xyz) ASCII-Datei der abgeleiteten Parameter (HEM133_APP.xyz) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM133_INV_L6.xyz und HEM133_INV_L20.xyz)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Bodenstationsdaten etc. (HMG133.xyz)
	\HRD	ASCII-Datei der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Dosisleistung etc. (HRD133.xyz)
\Karten...	\ArcGIS	Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (*.flt)
	\Fluglinien	PDF-Karte 1:50.000 des Flugweges mit Topografie
	\DEM	PDF-Karte 1:50.000 des Digitalen Höhenmodells
	\HEM	PDF-Karten 1:50.000 der Halbraumwiderstände und Schwerpunktstiefen für die Frequenzen 380, 1.770, 5.410, 8.300, 41.000 und 129.500 Hz sowie der spezifischen Widerstände bei 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 und 60 m unter NHN, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen mit 6 bzw. 20 Schichten
	\HMG	PDF-Karten 1:50.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT mit und ohne anthropogene Effekte
	\HRD	PDF-Karten 1:50.000 der Gesamtstrahlung, der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Dosisleistung am Boden
\VRS\L6 \VRS\L20	PDF-Vertikalschnitte des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsmodellen mit 6 bzw. 20 Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:50.000 und Vertikalmaßstab 1:2.500	

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.
- DGM25. Geoinformationen © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)
- Grasty, R.L., Holman, P.B. & Blanchard, Y.B., 1991. Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers. Geological survey of Canada, Paper 90–23, 25p.
- Hovgaard, J. & Grasty, R.L., 1997. Reducing statistical noise in airborne gamma ray data through spectral component analysis. In “Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration” edited by A.G. Gubins, 753–764.
- IAEA, 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. *Geophys. J. Int.*, 108, 945–946.
- IAGA, 2010: International Geomagnetic Reference Field: the 11th 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.
- Mathis, G.L. 1987. Smoothing spectral gamma logs: A simple but effective technique. *Geophysics* 52, 363-367.
- Miensopust, M., Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J., 2014. Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Nordenham 2009/2010. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132100, Hannover.
- 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.
- 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., Noell, U., Schildknecht, F., Meyer, U. & Wiederhold, H., 2013. Airborne and ground geophysical investigation of the freshwater lenses of the Wadden Sea Island of Langeoog, Germany. In: *Program & Abstracts Book of IAH 2013 – Solving the Groundwater Challenges of the 21st Century*, 15.-20.9.2013, 251, Perth, Australia.
- 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 18th 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 18th 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.

Vofß, 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>

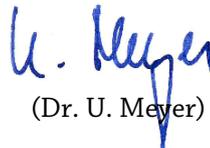
FIS-Geophysik (LIAG): <http://www.geophysics-database.de/>

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
BGR, HANNOVER



(Dr. T. Himmelsbach)

Leiter der Abteilung
„Grundwasser und Boden“



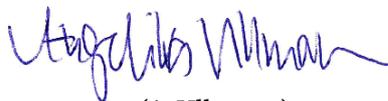
(Dr. U. Meyer)

Leiter des Fachbereichs
„Geophysikalische Erkundung –
Technische Mineralogie“



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs
„Aerogeophysik und
Luftfahrttechnischer Betrieb“



(A. Ullmann)

Sachbearbeiterin
im Arbeitsbereich
„Aerogeophysik und
Luftfahrttechnischer Betrieb“

Anhang I

Messgebiet 133 – Jever

Basis:	JadeWeserAirport (EDWI)	Flugplatzhöhe: 16 ft / 4,9 m
Bodenstation (2009):	8°03'18" östliche Länge,	53°30'28" nördliche Breite
Bodenstation (2014):	8°03'18" östliche Länge,	53°30'28" nördliche Breite
Messgebiet:		
Profilabstand:	Messprofile – 250 m	Kontrollprofile – 2000 m
Profilrichtung:	Messprofile – 0°	Kontrollprofile – 90°
Profile:	Messprofile – 90	Kontrollprofile – 13
Profilkilometer (Plan):	1877 Messprofile–km	252 Kontrollprofile–km
Größe des Messgebietes:	ca. 490 km ²	

Allgemeine Anmerkungen:

- 1) Die Messprofile sind durch L*.1 und die Kontrollprofile durch T*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L*.2 bzw. T*.8 gekennzeichnet.
- 2) Die Linien TL kennzeichnen die Testlinie, die am Ende jedes Messfluges auf dem Rückweg zum JadeWeserAirport (EDWI) überflogen wurde.
- 3) HeliDAS-Konsole: SYS14
- 4) Bird: BKS36a (12.10.2009)
BKS60a (ab 28.04.2014)
- 5) Magnetometer Kurze Ausfälle, besonders in Kurven
- 6) Spektrometer Wenige Ausfälle
- 7) Radarhöhenmesser Nur für Flugführung in 2014
- 8) Videokamera Nicht aktiv in 2014

Tabelle A-1: *Flugprotokoll*

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
13301	12.10.09	12:26 – 13:51	L2.1 L5.1 L8.1 L11.1 L14.1	Messprofilflug Abbruch wg. EM-Ausfall auf Linie L14.1 Wetter: bewölkt, windig, 15°C
13302	28.04.14	14:04 – 16:37	T1.9 T2.9 T3.9 T4.9 T5.9 T6.9 T7.9 T8.9 T9.9 T10.9	Kontrollprofilflug Abbruch nach T9.9 wegen EM-Ausfall aufgrund von Radar (Flugplatz) MAG: kurze Ausfälle auf ersten Profilen keine Bodenstation Wetter: sonnig-wolkig, kein Wind, 17°C
13303	29.04.14	07:42 – 10:29	L1.1 L4.1 L7.1 L10.1 L13.1 L16.1 L19.1 L22.1 L25.1 L28.1 L31.1 TL703.1	Messprofilflug keine Bodenstation Wetter: sonnig, wenig Wind, 15-19°C
13304	29.04.14	13:00 – 15:42	L34.1 L37.1 L40.1 L43.1 L46.1 L49.1 L52.1 L55.1 L58.1	Messprofilflug keine Bodenstation Wetter: sonnig, wenig Wind, 19°C

13305	30.04.14	07:26 – 09:14	L61.1 L64.1 L67.1 L70.1 L73.1 TL705.1	Messprofilflug EM2-Kaibrierspule nicht mehr bedienbar nach L70.1 Wetter: wolkig, leichter Regen, kein Wind, 15°C
13306	30.04.14	10:09 – 11:02	L76.1 L79.1 L82.1 L85.1 L88.1 TL706.1	Messprofilflug Wetter: wolkig, leichter Nieselregen, kein Wind, 15°C
13307	06.05.14	08:11 – 11:05	L3.1 L6.1 L9.1 L12.1 L15.1 L18.1 L21.1 L24.1 L27.1 L30.1 TL707.1	Messprofilflug EM6-Sprung bei 99300 (am Ende) Spektrometerausfälle bei: 16570 – 17300 (L3.1) 37420 – 39000 (L12.1) 59080 – 59920 (Kurve) 80040 – 80730 (L27.1) ab 100850 (am Ende) Wetter: bewölkt, kaum Wind, 16°C
13308	06.05.14	13:15 – 14:47	L33.1 L36.1 L39.1 L42.1 L88.1 TL708.1	Messprofilflug Wetter: wolkig, leichter Nieselregen, kaum Wind, 18°C

13309	07.05.14	07:20 – 10:02	L45.1 L48.1 L51.1 L54.1 L57.1 L60.1 L63.1 L66.1 L69.1 L72.1 TL709.1	Messprofilflug Abbruch nach L72 wegen Gewitter Kalibrierung am Ende nicht da Wetter: bewölkt, wenig Wind, 14°C
13310	08.05.14	08:47 – 10:19	T13.9 T12.9 T11.9 T10.8	Kontrollprofilflug Wetter: bewölkt mit Regen, windig, 11°C
13311	19.05.14	11:23 – 14:01	L75.1 L78.1 L81.1 L84.1 L87.1 L90.1 L89.1 L86.1 L83.1 L80.1 L77.1 L71.1 L68.1 L65.1 TL711.1	Messprofilflug EM5: AUTOCAL defekt Bodenstation um wenige Meter verschoben Wetter: bewölkt, zunehmend sonnig, kein Wind, 13°C
13312	20.05.14	07:33 – 10:18	L59.1 L56.1 L53.1 L50.1 L47.1 L44.1 L41.1 L38.1 L35.1 TL712.1	Messprofilflug Wetter: sonnig, kein Wind, 18°C

13313	21.05.14	07:21 – 10:03	L32.1 L29.1 L26.1 L23.1 L20.1 L17.1 L14.2 L11.2 L62.1 TL713.1	Messprofilflug Wetter: sonnig, kein Wind, 21°C
-------	----------	---------------	--	--

Tabelle A-2: Gebietsdateien

Methode	Name	# Profile/Flüge	# Werte	Größe [MB]	Bemerkungen
HEM	HEM133_RAW.xyz	13 (Flüge)	1.039.580	331,0	-
HEM	HEM133_DAT.xyz	90 (L) + 13 (T)	565.733	118,2	-
HEM	HEM133_APP.xyz	90 (L) + 13 (T)	565.733	138,1	-
HEM	HEM133_INV_L6.xyz HEM133_INV_L20.xyz	90 (L) + 13 (T)	565.733	111,6 243,1	-
HEM	HEM133_QCP.xyz	90 (L) + 13 (T)	565.733	110,0	-
HMG	HMG133.xyz	90 (L) + 13 (T)	565.733	102,2	-
HRD	HRD133.xyz	90 (L) + 13 (T)	56.666	12,6	-

Anhang II

Beschreibung der Datenformate

A) Elektromagnetik

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

Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/JEVER  
/AREACODE  
/133  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 3 BESSEL  
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/BIRD  
/60  
/NUMFREQ  
/ 6  
/FREQUENCY  
/ 380.00 1770.00 5410.00 8300.00 41000.00 129500.00  
/COILSEPERATION  
/ 7.92 7.92 9.04 7.96 8.03 7.91  
/COILGEOMETRY  
/ 1.00 1.00 4.00 1.00 1.00 1.00  
/TOWCABLE  
/ 40.00  
/DUMMY  
/ -999.99  
/DECIMATIONVALUE  
/ 1  
/PRIVTEXT  
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```


1) Rohdaten: HEM133_RAW.XYZ

Beispiel:

/XYZ EXPORT [07/14/2017]

/DATABASE [.\133_RAW.gdb]

/Unprocessed data

X_RAW Y_RAW LON_BIRD_RAW LAT_BIRD_RAW RECORD UTC_TIME ALTR ALTL_FP ZHG_BIRD_RAW ZHG_HELI_RAW ALTB EM1I EM1Q ... EM6I EM6Q EM1_FREQ ... EM6_FREQ CPPL CPSP

//Flight 13301

//Date 2009/10/12

Random 0.1

```
3428912 5928032 7.9281663 53.4790813 0 122541.01487.66 429.15 415.90 466.44 293.43-13120.14-10179.96 ...-255.55-4645.37 0 ... 0 0.0009 0.0018
3428909 5928031 7.9281242 53.479069 1 122541.11488.04 429.66 416.05 466.61 292.51-13119.79-10179.96 ...-258.34-4645.73 4142 ... 540 0.0012 0.0026
3428906 5928030 7.9280820 53.4790568 2 122541.21488.57 429.66 416.20 466.77 293.27-13119.67-10179.83 ...-261.24-4645.65 8284 ... 1080 0.0010 0.0026
```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X_RAW	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y_RAW	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON_BIRD_RAW	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT_BIRD_RAW	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALTR	ft	Messwert des Radarhöhenmessers, ab 2012 nicht aktiv
ALTL_FP	m	Messwert des Laserhöhenmessers
ZHG_BIRD_RAW	m	GPS-Höhe der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
ZHG_HELI_RAW	m	GPS-Höhe des Hubschraubers, Bezugssystem WGS84
ALTB	ft	barometrische Höhe des Hubschraubers, defekt
EM1I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
EM1Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
EM2I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
EM2Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
EM3I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=380 Hz
EM3Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=380 Hz
EM4I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=129500 Hz
EM4Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=129500 Hz
EM5I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
EM5Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
EM6I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz
EM6Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz
EM1_FREQ	Hz	Frequenz für EM1-Kanäle (etwa f=41000 Hz)
EM2_FREQ	Hz	Frequenz für EM2-Kanäle (etwa f=8300 Hz)
EM3_FREQ	Hz	Frequenz für EM3-Kanäle (etwa f=380 Hz)
EM4_FREQ	Hz	Frequenz für EM4-Kanäle (etwa f=129500 Hz)
EM5_FREQ	Hz	Frequenz für EM5-Kanäle (etwa f=1770 Hz)
EM6_FREQ	Hz	Frequenz für EM6-Kanäle (etwa f=5410 Hz)
CPPL		Powerline-Detektor
CPSP		Sferics-Detektor

Anmerkungen:

Verschiebung der GPS-Kanäle: -0,7 s.

Verschiebung der EM-Kanäle: 0,8 s.

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, die Dezimale gibt fortlaufende Nummerierung der Messflüge an.

2) Daten: HEM133_DAT.XYZ

Beispiel:

/Processing by A. Ullmann (BGR) using Oasis montaj and HemView

/Levelled data, man-made effects removed

/Transferred on 27.03.2017 15:59:27

```

/      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 13303
//Date 2014/04/29
Line 1.1
3416523  5951424  7.735356  53.687399  11660  80105.0  1.50  30.74  30.74  32.24  31.68  285.97  352.77  ...  3102.57  593.01
3416523  5951421  7.735363  53.687363  11661  80105.1  1.48  30.74  30.74  32.22  32.02  285.92  352.72  ...  3101.63  592.90
3416524  5951417  7.735371  53.687327  11662  80105.2  1.46  30.75  30.75  32.20  31.60  285.84  352.66  ...  3099.78  592.61

```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), 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 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (ab 2012 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=380 Hz
QUAD_1	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=380 Hz
REAL_2	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
REAL_3	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz, auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
QUAD_3	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz, auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
REAL_4	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
QUAD_4	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
REAL_5	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
QUAD_5	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
REAL_6	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=129500 Hz
QUAD_6	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=129500 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: HEM133_APP.XYZ

Beispiel:

/Processing by A. Ullmann (BGR) using Oasis montaj and HemView

/Levelled data, half-space parameters, man-made effects removed

/Transferred on 27.03.2017 15:59:56

```

/      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 13303
//Date 2014/04/29
Line 1.1
3416523  5951424  7.735356  53.687399  11660  80105.0  1.50  30.74  30.74  32.24  31.68  3.44  7.57  31.51 ... 10.30  0.60  2.84
3416523  5951421  7.735363  53.687363  11661  80105.1  1.48  30.74  30.74  32.22  32.02  3.44  7.57  31.50 ... 10.30  0.60  2.84
3416524  5951417  7.735371  53.687327  11662  80105.2  1.46  30.75  30.75  32.20  31.60  3.44  7.56  31.50 ... 10.31  0.60  2.84

```

In dieser Datei sind alle Positionsdaten und die berechneten Größen ρ_a , d_a und z^* in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), 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 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (ab 2012 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	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=380 Hz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=380 Hz
ZST_1	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=380 Hz
RHOA_2	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=1770 Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=1770 Hz
ZST_2	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=1770 Hz
RHOA_3	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=5410 Hz
KDA_3	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=5410 Hz
ZST_3	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=5410 Hz
RHOA_4	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=8300 Hz
KDA_4	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=8300 Hz
ZST_4	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=8300 Hz
RHOA_5	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=41000 Hz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=41000 Hz
ZST_5	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=41000 Hz
RHOA_6	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=129500 Hz
KDA_6	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=129500 Hz
ZST_6	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=129500 Hz

Anmerkungen: siehe 2)

4) Inversionsdaten HEM133_INV_L6.XYZ bzw. HEM133_INV_L20.XYZ

Beispiel:

/Processing by A. Ullmann (BGR) using Oasis montaj and HemView

/Inversion models, man-made effects removed

/Transferred on 12.04.2017 10:07:54

/ 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 13303

//Date 2014/04/29

Line 1.1

3416523 5951424 7.735356 53.687399 11660 80105.0 1.50 30.74 30.74 32.24 31.68 4984.13 0.25 ... 2.72 1.02

3416523 5951421 7.735363 53.687363 11661 80105.1 1.48 30.74 30.74 32.22 32.02 4984.20 0.25 ... 2.73 1.02

3416524 5951417 7.735371 53.687327 11662 80105.2 1.46 30.75 30.75 32.20 31.60 4984.20 0.25 ... 2.75 1.02

In dieser Datei sind alle Positionsdaten und die Ergebnisse ρ , d und q_{all} einer 1D-Inversion in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), 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 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (ab 2012 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	Ωm	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	Ωm	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:

/IFREQUENCY

/ 1 1 0 1 1 1

/NUMLAYER bzw. /NUMLAYER

/ 6 20

/MUELAYER

/ 0

5) Qualitätskontrollparameter HEM133_QCP.XYZ

Beispiel:

/Processing by A. Ullmann (BGR) using Oasis montaj and HemView
/Levelled data, data quality control parameters, man-made effects removed
/Transferred on 27.03.2017 16:01:27

```

/      X      Y      LON      LAT      RECORD      UTC_TIME      TOPO      H_RADAR      H_LASER      BIRD_NN      H_BARO      CHECK_1  ... CHECK_6      CHECK      STD      ALT      QCP      QCPM
//Flight 13303
//Date 2014/04/29
Line 1.1
3416523  5951424  7.735356  53.687399      11660      80105.0      1.50      30.74      30.74      32.24      31.68  -999.99  ... -999.99      0.00  0.03  0.00  0.97  -999.99
3416523  5951421  7.735363  53.687363      11661      80105.1      1.48      30.74      30.74      32.22      32.02  -999.99  ... -999.99      0.00  0.03  0.00  0.97  -999.99
3416524  5951417  7.735371  53.687327      11662      80105.2      1.46      30.75      30.75      32.20      31.60  -999.99  ... -999.99      0.00  0.03  0.00  0.97  -999.99

```

In dieser Datei sind alle Positionsdaten und notwendigen Parameter für die Qualitätskontrolle in der Reihenfolge der nachfolgenden Beschreibung abgespeichert:

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), 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 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (ab 2012 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
CHECK_1		Marker für EM1 (= 50, 51,...)
CHECK_2		Marker für EM2 (= 40, 41,...)
CHECK_3		Marker für EM3 (= 10, 11,...)
CHECK_4		Marker für EM4 (= 60, 61,...)
CHECK_5		Marker für EM5 (= 20, 21,...)
CHECK_6		Marker für EM6 (= 30, 31,...)
CHECK		Gesamtmarkerwert 0.04 pro CHECK_*, ohne CHECK_6
STD		Gesamtfehlerwert (in Promille maximal 0.8)
ALT		Höhenparameterwert ((H_LASER - 50)/150 >= 0)
QCP		dynamischer Qualitätsparameter (0.0 - 1.0)
QCPM		Qualitätsparametermarker (1.0)

Anmerkungen: siehe 2) und
im Header steht zusätzlich:

/IFREQUENCY

```

/      1      1      0      1      1      1

```


B) Magnetik

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

Magnetikdaten HMG133.XYZ

```
/BGR HEADER:  
/  
/AREANAME  
/JEVER  
/AREACODE  
/ 133  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 3 BESSEL  
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/ WGS84  
/DEVICE  
/ G-822A  
/IGRF  
/2010  
/LON_BASE  
/ 8.0551205  
/LAT_BASE  
/ 53.5078049  
/ALT_BASE  
/ 5  
/TOWCABLE  
/ 40.00  
/LAG  
/23  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT (hier können Kommentarzeilen stehen)
```


Beispiel:

/XYZ EXPORT [07/06/2017]

/DATABASE [HMG133_Split.gdb]

/Processing by M.Ibs (BGR) using HmgView04

/

/ X Y LON LAT RECORD UTC_DATE UTC_TIME ALT_BIRD H_LASER_RAW T_BASE_RAW T_BASE_F T_RAW DELTA_T DELTA_T_LEV DELTA_T_LEV_CE MASK MASK_CE

//Flight 13303

//Date 2014/04/29

Line 1.1

3416523 5951424 7.735356 53.687399 11660 20140429 80105.0 32.2 30.3 49555.09 49555.09 49453.37 -132.18 -118.83 -118.83 -9999.00 -9999.00

3416523 5951421 7.735363 53.687363 11661 20140429 80105. 32.2 30.3 49555.09 49555.09 49453.39 -132.17 -118.82 -118.82 -9999.00 -9999.00

3416524 5951417 7.735371 53.687327 11662 20140429 80105.2 32.2 30.4 49555.09 49555.09 49453.41 -132.16 -118.81 -118.81 -9999.00 -9999.00

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 (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
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
MASK		Datenmarker = "1" bei fehlerhaften und daher entfernten Daten (Sensor im blinden Winkelbereich), sonst Dummy
MASK_CE		wie MASK, aber zusätzlich auch bei anthropogen gestörten und daher entfernten Daten

Anmerkungen:

Verzögerung von T_RAW: 2,3 s.

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 niveaukorrigierten (gelevelten) Ergebnissen der Hubschrauberradiometrie (HRD).

Radiometriedaten HRD133.xyz

```
/BGR HEADER:  
/  
/AREANAME  
/JEVER  
/AREACODE  
/ 133  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 3 BESSEL  
/ELLIPSOID 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)  
/51.4, 1.0437, 6.59, 0.0619, 1.2, 0.0509, 0.02, 0.0649, 0.32, 0.0133  
/STRIPPING (IAEA 2003, S.65) alpha, beta, gamma, a  
/0.27, 0.4, 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)  
/24.5, 3.6, 1.78  
/TOWCABLE  
/ 39.50  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```


Beispiel:

/XYZ EXPORT [13/06/2017]

/DATABASE [HRD133_Split.gdb]

/Processing by M.Ibs (BGR) using HrdView114

/	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_KOR	POT_KOR	URA_KOR	THO_KOR	EXPO			
//Flight 13303													
//Date 2014/04/29													
Line 1.1													
3416521	5951426	7.735332	53.687412	1166	20140429	80105	71.5	30.3	70.0	101.094	17.0	999	50
3416523	5951387	7.735363	53.687058	1167	20140429	80106	71.5	30.8	70.1	101.084	17.0	999	54
3416524	5951347	7.735392	53.686705	1168	20140429	80107	71.0	30.4	69.7	101.105	17.0	999	67

Fortsetzung der letzten drei Zeilen:

789	72	21	26	6	551.5	1.95	1.71	8.68	6.54
756	82	17	24	1	563.5	2.02	1.71	8.89	6.71
842	97	18	25	2	578.9	2.08	1.72	9.12	6.87

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 (Bessel), Mittelmeridian 9°, Zone 3
Y	m	Hochwert, Bezugssystem Gauß-Krüger (Bessel), 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 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 und biomassekorrigiert)
POT_KOR	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden (korrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
URA_KOR	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden (korrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
THO_KOR	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden (korrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
EXPO	µR/h	Dosisleistung am Erdboden, ermittelt aus korrigierten Gehalten

Anmerkungen: siehe Magnetik

Anhang III

DVD-Inhalt

\	RHO_L20@010mbsl.ft.xml
Adobe - Adobe Reader herunterladen.URL	RHO_L20@010mbsl.hdr
\Bericht\ Technischer Bericht 133 Jever.pdf	RHO_L20@015mbsl.ft
\Daten\ \HEM\ Format_description_HEM133.txt	RHO_L20@015mbsl.ft.gi
HEM133_APP.xyz	RHO_L20@015mbsl.ft.xml
HEM133_DAT.xyz	RHO_L20@015mbsl.hdr
HEM133_INV_L20.xyz	RHO_L20@020mbsl.ft
HEM133_INV_L6.xyz	RHO_L20@020mbsl.ft.gi
HEM133_QCP.xyz	RHO_L20@020mbsl.ft.xml
HEM133_RAW.xyz	RHO_L20@020mbsl.hdr
\HMG\ Format_description_HMG133.txt	RHO_L20@025mbsl.ft
HMG133.xyz	RHO_L20@025mbsl.ft.gi
\HRD\ Format_description_HRD133.txt	RHO_L20@025mbsl.ft.xml
HRD133.xyz	RHO_L20@025mbsl.hdr
\Karten\ 133-Jever-ÜK.jpg	RHO_L20@030mbsl.ft
\ArcGis\ \DEM\ DEM.ft	RHO_L20@030mbsl.ft.gi
DEM.ft.gi	RHO_L20@030mbsl.ft.xml
DEM.ft.xml	RHO_L20@030mbsl.hdr
DEM.hdr	RHO_L20@040mbsl.ft
\HEM\ QCP.ft	RHO_L20@040mbsl.ft.gi
QCP.ft.gi	RHO_L20@040mbsl.ft.xml
QCP.ft.xml	RHO_L20@040mbsl.hdr
QCP.hdr	RHO_L20@050mbsl.ft
RHO_L20@001mbsl.ft	RHO_L20@050mbsl.ft.gi
RHO_L20@001mbsl.ft.gi	RHO_L20@050mbsl.ft.xml
RHO_L20@001mbsl.ft.xml	RHO_L20@050mbsl.hdr
RHO_L20@001mbsl.hdr	RHO_L20@060mbsl.ft
RHO_L20@005mbsl.ft	RHO_L20@060mbsl.ft.gi
RHO_L20@005mbsl.ft.gi	RHO_L20@060mbsl.ft.xml
RHO_L20@005mbsl.ft.xml	RHO_L20@060mbsl.hdr
RHO_L20@005mbsl.hdr	RHO_L6@001mbsl.ft
RHO_L20@010mbsl.ft	RHO_L6@001mbsl.ft.gi
RHO_L20@010mbsl.ft.gi	RHO_L6@001mbsl.ft.xml
RHO_L20@010mbsl.ft.xml	RHO_L6@001mbsl.hdr
RHO_L20@010mbsl.hdr	RHO_L6@005mbsl.ft
RHO_L20@015mbsl.ft	RHO_L6@005mbsl.ft.gi
RHO_L20@015mbsl.ft.gi	RHO_L6@005mbsl.ft.xml
RHO_L20@015mbsl.ft.xml	RHO_L6@005mbsl.hdr
RHO_L20@015mbsl.hdr	RHO_L6@010mbsl.ft
RHO_L20@015mbsl.hdr	RHO_L6@010mbsl.ft.gi
	RHO_L6@010mbsl.ft.xml
	RHO_L6@010mbsl.hdr
	RHO_L6@015mbsl.ft
	RHO_L6@015mbsl.ft.gi
	RHO_L6@015mbsl.ft.xml
	RHO_L6@015mbsl.hdr

RHO_L6@020mbsl.fl
RHO_L6@020mbsl.fl.gi
RHO_L6@020mbsl.fl.xml
RHO_L6@020mbsl.hdr
RHO_L6@025mbsl.fl
RHO_L6@025mbsl.fl.gi
RHO_L6@025mbsl.fl.xml
RHO_L6@025mbsl.hdr
RHO_L6@030mbsl.fl
RHO_L6@030mbsl.fl.gi
RHO_L6@030mbsl.fl.xml
RHO_L6@030mbsl.hdr
RHO_L6@040mbsl.fl
RHO_L6@040mbsl.fl.gi
RHO_L6@040mbsl.fl.xml
RHO_L6@040mbsl.hdr
RHO_L6@050mbsl.fl
RHO_L6@050mbsl.fl.gi
RHO_L6@050mbsl.fl.xml
RHO_L6@050mbsl.hdr
RHO_L6@060mbsl.fl
RHO_L6@060mbsl.fl.gi
RHO_L6@060mbsl.fl.xml
RHO_L6@060mbsl.hdr
RHOA1@380Hz.fl
RHOA1@380Hz.fl.gi
RHOA1@380Hz.fl.xml
RHOA1@380Hz.hdr
RHOA2@1770Hz.fl
RHOA2@1770Hz.fl.gi
RHOA2@1770Hz.fl.xml
RHOA2@1770Hz.hdr
RHOA3@5410Hz.fl
RHOA3@5410Hz.fl.gi
RHOA3@5410Hz.fl.xml
RHOA3@5410Hz.hdr
RHOA4@8300Hz.fl
RHOA4@8300Hz.fl.gi
RHOA4@8300Hz.fl.xml
RHOA4@8300Hz.hdr
RHOA5@41000Hz.fl
RHOA5@41000Hz.fl.gi
RHOA5@41000Hz.fl.xml
RHOA5@41000Hz.hdr
RHOA6@129500Hz.fl
RHOA6@129500Hz.fl.gi
RHOA6@129500Hz.fl.xml
RHOA6@129500Hz.hdr
ZST1@380Hz.fl
ZST1@380Hz.fl.gi
ZST1@380Hz.fl.xml
ZST1@380Hz.hdr
ZST2@1770Hz.fl
ZST2@1770Hz.fl.gi
ZST2@1770Hz.fl.xml
ZST2@1770Hz.hdr
ZST3@5410Hz.fl
ZST3@5410Hz.fl.gi
ZST3@5410Hz.fl.xml
ZST3@5410Hz.hdr
ZST4@8300Hz.fl
ZST4@8300Hz.fl.gi
ZST4@8300Hz.fl.xml
ZST4@8300Hz.hdr
ZST5@41000Hz.fl
ZST5@41000Hz.fl.gi
ZST5@41000Hz.fl.xml
ZST5@41000Hz.hdr
ZST6@129500Hz.fl
ZST6@129500Hz.fl.gi
ZST6@129500Hz.fl.xml
ZST6@129500Hz.hdr
\\HMG\
DeltaT.fl
DeltaT.fl.gi
DeltaT.fl.xml
DeltaT.hdr
DeltaT_CE.fl
DeltaT_CE.fl.gi
DeltaT_CE.fl.xml
DeltaT_CE.hdr
\\HRD\
EXPO.fl
EXPO.fl.gi
EXPO.fl.xml
EXPO.hdr
K.fl
K.fl.gi
K.fl.xml
K.hdr
TC.fl
TC.fl.gi
TC.fl.xml
TC.hdr
Th.fl
Th.fl.gi
Th.fl.xml
Th.hdr
U.fl
U.fl.gi
U.fl.xml
U.hdr

\Karten\ \DEM\ 133 Jever Höhenmodell DEM.pdf		133 Jever Widerstand 15m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 15m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 20m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 20m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 25m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 25m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 30m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 30m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 40m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 40m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 50m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 50m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 60m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 60m unter NHN L6.pdf	
\Flightlines\ 133 Jever Fluglinien.pdf			
\HEM\ 133 Jever Halbraumwiderstand rhoa1.pdf 133 Jever Halbraumwiderstand rhoa2.pdf 133 Jever Halbraumwiderstand rhoa3.pdf 133 Jever Halbraumwiderstand rhoa4.pdf 133 Jever Halbraumwiderstand rhoa5.pdf 133 Jever Halbraumwiderstand rhoa6.pdf 133 Jever Qualitätskontrollparameter.pdf 133 Jever Schwerpunktstiefe zst1.pdf 133 Jever Schwerpunktstiefe zst2.pdf 133 Jever Schwerpunktstiefe zst3.pdf 133 Jever Schwerpunktstiefe zst4.pdf 133 Jever Schwerpunktstiefe zst5.pdf 133 Jever Schwerpunktstiefe zst6.pdf 133 Jever Widerstand 01m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 01m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 05m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 05m unter NHN L6.pdf 133 Jever Widerstand 10m unter NHN L20.pdf 133 Jever Widerstand 10m unter NHN L6.pdf		\HMG\ 133 Jever Magnetik← mit anthropogenen Effekten.pdf 133 Jever Magnetik← ohne anthropogene Effekte.pdf	
			\HRD\ 133 Jever Dosisleistung.pdf 133 Jever Gesamtstrahlung.pdf 133 Jever Kalium.pdf 133 Jever Thorium.pdf 133 Jever Uran.pdf
\VRS\ \L20\ VRS1330011.pdf VRS1330019.pdf VRS1330021.pdf VRS1330029.pdf VRS1330031.pdf VRS1330039.pdf VRS1330041.pdf VRS1330049.pdf VRS1330051.pdf VRS1330059.pdf VRS1330061.pdf VRS1330069.pdf VRS1330071.pdf VRS1330079.pdf VRS1330081.pdf VRS1330089.pdf VRS1330091.pdf VRS1330099.pdf VRS1330101.pdf VRS1330108.pdf VRS1330112.pdf VRS1330119.pdf VRS1330121.pdf	VRS1330129.pdf VRS1330131.pdf VRS1330139.pdf VRS1330141.pdf VRS1330151.pdf VRS1330161.pdf VRS1330171.pdf VRS1330181.pdf VRS1330191.pdf VRS1330201.pdf VRS1330211.pdf VRS1330221.pdf VRS1330231.pdf VRS1330241.pdf VRS1330251.pdf VRS1330261.pdf VRS1330271.pdf VRS1330281.pdf VRS1330291.pdf VRS1330301.pdf VRS1330311.pdf VRS1330321.pdf VRS1330331.pdf VRS1330341.pdf VRS1330351.pdf	VRS1330361.pdf VRS1330371.pdf VRS1330381.pdf VRS1330391.pdf VRS1330401.pdf VRS1330411.pdf VRS1330421.pdf VRS1330431.pdf VRS1330441.pdf VRS1330451.pdf VRS1330461.pdf VRS1330471.pdf VRS1330481.pdf VRS1330491.pdf VRS1330501.pdf VRS1330511.pdf VRS1330521.pdf VRS1330531.pdf VRS1330541.pdf VRS1330551.pdf VRS1330561.pdf VRS1330571.pdf VRS1330581.pdf VRS1330591.pdf VRS1330601.pdf	

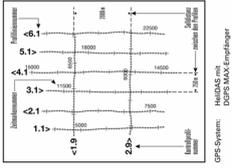
VRS1330611.pdf	VRS1330079.pdf	VRS1330461.pdf
VRS1330621.pdf	VRS1330081.pdf	VRS1330471.pdf
VRS1330631.pdf	VRS1330089.pdf	VRS1330481.pdf
VRS1330641.pdf	VRS1330091.pdf	VRS1330491.pdf
VRS1330651.pdf	VRS1330099.pdf	VRS1330501.pdf
VRS1330661.pdf	VRS1330101.pdf	VRS1330511.pdf
VRS1330671.pdf	VRS1330108.pdf	VRS1330521.pdf
VRS1330681.pdf	VRS1330112.pdf	VRS1330531.pdf
VRS1330691.pdf	VRS1330119.pdf	VRS1330541.pdf
VRS1330701.pdf	VRS1330121.pdf	VRS1330551.pdf
VRS1330711.pdf	VRS1330129.pdf	VRS1330561.pdf
VRS1330721.pdf	VRS1330131.pdf	VRS1330571.pdf
VRS1330731.pdf	VRS1330139.pdf	VRS1330581.pdf
VRS1330741.pdf	VRS1330141.pdf	VRS1330591.pdf
VRS1330751.pdf	VRS1330151.pdf	VRS1330601.pdf
VRS1330761.pdf	VRS1330161.pdf	VRS1330611.pdf
VRS1330771.pdf	VRS1330171.pdf	VRS1330621.pdf
VRS1330781.pdf	VRS1330181.pdf	VRS1330631.pdf
VRS1330791.pdf	VRS1330191.pdf	VRS1330641.pdf
VRS1330801.pdf	VRS1330201.pdf	VRS1330651.pdf
VRS1330811.pdf	VRS1330211.pdf	VRS1330661.pdf
VRS1330821.pdf	VRS1330221.pdf	VRS1330671.pdf
VRS1330831.pdf	VRS1330231.pdf	VRS1330681.pdf
VRS1330841.pdf	VRS1330241.pdf	VRS1330691.pdf
VRS1330851.pdf	VRS1330251.pdf	VRS1330701.pdf
VRS1330861.pdf	VRS1330261.pdf	VRS1330711.pdf
VRS1330871.pdf	VRS1330271.pdf	VRS1330721.pdf
VRS1330881.pdf	VRS1330281.pdf	VRS1330731.pdf
VRS1330891.pdf	VRS1330291.pdf	VRS1330741.pdf
VRS1330901.pdf	VRS1330301.pdf	VRS1330751.pdf
	VRS1330311.pdf	VRS1330761.pdf
\L6\	VRS1330321.pdf	VRS1330771.pdf
VRS1330011.pdf	VRS1330331.pdf	VRS1330781.pdf
VRS1330019.pdf	VRS1330341.pdf	VRS1330791.pdf
VRS1330021.pdf	VRS1330351.pdf	VRS1330801.pdf
VRS1330029.pdf	VRS1330361.pdf	VRS1330811.pdf
VRS1330031.pdf	VRS1330371.pdf	VRS1330821.pdf
VRS1330039.pdf	VRS1330381.pdf	VRS1330831.pdf
VRS1330041.pdf	VRS1330391.pdf	VRS1330841.pdf
VRS1330049.pdf	VRS1330401.pdf	VRS1330851.pdf
VRS1330051.pdf	VRS1330411.pdf	VRS1330861.pdf
VRS1330059.pdf	VRS1330421.pdf	VRS1330871.pdf
VRS1330061.pdf	VRS1330431.pdf	VRS1330881.pdf
VRS1330069.pdf	VRS1330441.pdf	VRS1330891.pdf
VRS1330071.pdf	VRS1330451.pdf	VRS1330901.pdf

Anhang IV

Karten

(Originalkarten 1:50.000 verkleinert auf 1:200.000)

AEROGEOPHYSIKALISCHE MESSUNGEN IM GEBIET JEVER FLUGLINIEN



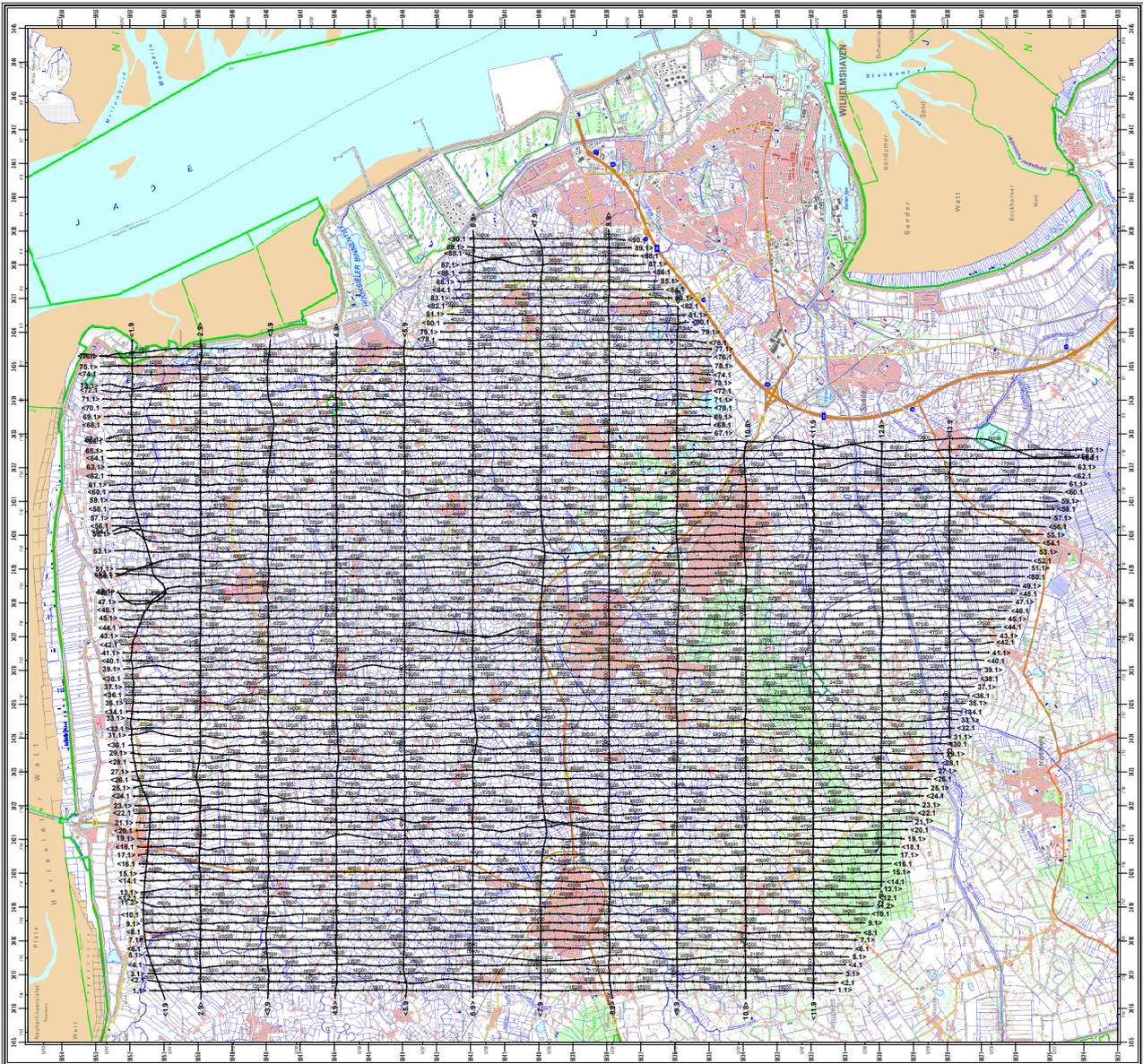
Die Luftaufnahme ist georeferenziert und entspricht der Luftaufnahme des Bundesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) vom 2009. Die Luftaufnahme ist georeferenziert und entspricht der Luftaufnahme des Bundesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) vom 2009.



BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
2009 Hannover, Bundesrepublik Deutschland

Geobild: Jever
Topographie und Fluglinien

Parameter:
Befliegung: 13.03.2009 bis 14.03.2009
Missionshöhe: 1000 m
Missionsbreite: 1000 m
Missionslänge: 1000 m
Missionshöhe: 1000 m
Missionsbreite: 1000 m
Missionslänge: 1000 m
Missionshöhe: 1000 m
Missionsbreite: 1000 m
Missionslänge: 1000 m



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.