

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



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Technischer Bericht Hubschraubergeophysik Befliegung Geyer

2013/14



B2.1 · Aerogeophysik · 11/2015



**Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe**

Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Befliegung Geyer

2013/14

Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie



Kooperationspartner:

Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie am
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

Technische Universität
Bergakademie Freiberg

Projekt:

ErzExploration Erzgebirge E³

BGR-Teilprojekt:

Pilotstudie zur Erkundung eines möglichen Erzvorkommens
im Randbereich des nördlichen Erzgebirges
(A-0201009.A – ErzExplora)

B 2.1 · Geophysikalische Erkundung –
Technische Mineralogie · Aerogeophysik

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

Datum: 09.11.2015

Inhaltsverzeichnis

Personal	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Kartenverzeichnis	V
Liste der Vertikalsektionen	VI
Abkürzungen	VIII
1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	3
3. Das Messgebiet	4
4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR	8
4.1. Messhubschrauber	9
4.2. Messausrüstung.....	9
4.3. Elektromagnetik	10
4.4. Magnetik	12
4.5. Radiometrie.....	13
4.6. Navigations- und Positionierungssystem.....	14
4.7. Datenerfassung.....	16
4.8. 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	19
5.2.4. Barometrische Höhen	21
5.2.5. Topografische Höhen	21
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik	22
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems	22
5.3.2. Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur	24
5.3.3. Datenkorrektur.....	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.....	30
5.3.8. 1D-Inversion der HEM-Daten	31
5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse	32

5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik.....	32
5.4.1. Magnetisches Totalfeld.....	32
5.4.2. Berechnung des IGRF.....	33
5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen.....	33
5.4.4. Statistische Niveaueinpassung.....	33
5.4.5. Präsentation der Magnetikergebnisse	34
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie	34
5.5.1. Energiekalibrierung	35
5.5.2. Verminderung des Rauschens	35
5.5.3. Effektive Höhe	36
5.5.4. Registrierzeitkorrektur	36
5.5.5. Hintergrundstrahlung	37
5.5.6. Radonkorrektur.....	38
5.5.7. Compton-Streuung	41
5.5.8. Zählraten in Standardflughöhe	42
5.5.9. Radioelementgehalte und Dosisleistung	42
5.5.10. Filterung und statistische Niveaueinpassung	44
5.5.11. Präsentation der Ergebnisse.....	45
6. Kartografische Arbeiten	46
6.1. Topografische Karten 1:50.000	46
6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software	46
6.3. Ergebniskarten	47
7. Archivierung.....	48
8. Literatur.....	49
Unterschriften.....	51
Anhang I: Befliegungsdaten Messgebiet 146 Geyer.....	53
Anhang II: Beschreibung der Datenformate.....	61
Anhang III: DVD-Inhalt	81
Anhang IV: Karten.....	85
Anhang V: Vertikalsektionen	115
Anlage: DVD (Double Layer DVD+R)	

Personal:

Leitung und Management

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

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

Auswertung und Interpretation

Dr. Bernhard **Siemon**, Projektleiter, Datenauswertung, B2.1, BGR

Dr. Malte **Ibs-von Seht**, Geologe, B2.1, BGR

Dr. Annika **Steuer**, Geophysikerin, B2.1, BGR

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

Messgruppe

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

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

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

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

Martin **Klenke**, Pilot, HeliJet Charter GmbH

Adresse: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Fachbereich B2.1

„Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie“

Stilleweg 2

D-30655 Hannover

Tel.: (0511) 643 3212 (Meyer)

3488 (Siemon)

Fax: (0511) 643 3662

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

Abbildungsverzeichnis:

- 1 Lageskizze des Aufsuchungsgebietes und des Messgebietes Geyer
- 2 Fluglinienkarte für das Aufsuchungsgebiet im Messgebiet Geyer
- 3 Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR
- 4 Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen und geschichteten Halbräumen

Tabellenverzeichnis:

- 1 Technische Daten der Befliegung Geyer
 - 2 Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
 - 3 Geophysikalische Messsysteme
 - 4 **a** HEM-Systemparameter für BKS36a
b HEM-Systemparameter für BKS60
 - 5 Bodenstation
 - 6 Energiebereiche und Kanalzuordnungen 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 **a** Kalibrierwerte für das HEM-System BKS36a
b Kalibrierwerte für das HEM-System BKS60
 - 14 Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung
 - 15 Filterparameter für die halbautomatische Erkennung von anthropogenen Störungen
 - 16 Filterparameter für die HEM-Niveaurektur
 - 17 Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung
 - 18 Koeffizienten der Einstreueraten
 - 19 Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen
 - 20 Sensitivitäten
 - 21 Lineare Abschwächungskoeffizienten μ_v der Vegetation
 - 22 Eckpunktkoordinaten der Blattschnitte Geyer
 - 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_{a6}) in Ωm
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 41.000 Hz (ρ_{a5}) in Ωm
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8300 Hz (ρ_{a4}) in Ωm
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 5410 Hz (ρ_{a3}) in Ωm
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1773 Hz (ρ_{a2}) in Ωm
8. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 380 Hz (ρ_{a1}) 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 8300 Hz (zst4) in m unter GOK
12. Schwerpunktstiefe bei 5410 Hz (zst3) in m unter GOK
13. Schwerpunktstiefe bei 1773 Hz (zst2) in m unter GOK
14. Schwerpunktstiefe bei 380 Hz (zst1) in m unter GOK
15. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter GOK
16. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter GOK
17. Spezifischer Widerstand bei 25 m unter GOK
18. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter GOK
19. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter GOK
20. Spezifischer Widerstand bei 100 m unter GOK
21. Spezifischer Widerstand bei 140 m unter GOK
22. Spezifischer Widerstand bei 200 m unter GOK
23. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
24. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT, bezüglich anthropogener Signale korrigiert
25. Gehalte von Kalium im Boden in %
26. Äquivalentgehalte von Uran im Boden in ppm
27. Äquivalentgehalte von Thorium im Boden in ppm
28. Gesamtstrahlung in cps
29. Ionendosisleistung am Boden in $\mu\text{R/h}$

Liste der Vertikalsektionen:

Messprofile:

1. VRS 1.1	34. VRS 34.1	67. VRS 67.1	100. VRS 100.1
2. VRS 2.1	35. VRS 35.1	68. VRS 68.2	101. VRS 101.2
3. VRS 3.2	36. VRS 36.1	69. VRS 69.1	102. VRS 102.1
4. VRS 4.1	37. VRS 37.1	70. VRS 70.1	103. VRS 103.1
5. VRS 5.1	38. VRS 38.1	71. VRS 71.2	104. VRS 104.2
6. VRS 6.1	39. VRS 39.1	72. VRS 72.1	105. VRS 105.1
7. VRS 7.1	40. VRS 40.1	73. VRS 73.1	106. VRS 106.1
8. VRS 8.1	41. VRS 41.1	74. VRS 74.2	107. VRS 107.2
9. VRS 9.1	42. VRS 42.1	75. VRS 75.1	108. VRS 108.1
10. VRS 10.1	43. VRS 43.1	76. VRS 76.1	109. VRS 109.2
11. VRS 11.1	44. VRS 44.2	77. VRS 77.2	110. VRS 110.1
12. VRS 12.1	45. VRS 45.1	78. VRS 78.1	111. VRS 111.1
13. VRS 13.1	46. VRS 46.1	79. VRS 79.1	112. VRS 112.2
14. VRS 14.1	47. VRS 47.1	80. VRS 80.2	113. VRS 113.1
15. VRS 15.1	48. VRS 48.1	81. VRS 81.1	114. VRS 114.1
16. VRS 16.1	49. VRS 49.1	82. VRS 82.1	115. VRS 115.2
17. VRS 17.1	50. VRS 50.2	83. VRS 83.1	116. VRS 116.1
18. VRS 18.1	51. VRS 51.1	84. VRS 84.1	117. VRS 117.2
19. VRS 19.1	52. VRS 52.1	85. VRS 85.1	118. VRS 118.2
20. VRS 20.1	53. VRS 53.2	86. VRS 86.1	119. VRS 119.2
21. VRS 21.1	54. VRS 54.1	87. VRS 87.1	120. VRS 120.1
22. VRS 22.1	55. VRS 55.1	88. VRS 88.1	121. VRS 121.1
23. VRS 23.1	56. VRS 56.2	89. VRS 89.1	122. VRS 122.2
24. VRS 24.1	57. VRS 57.1	90. VRS 90.1	123. VRS 123.1
25. VRS 25.1	58. VRS 58.1	91. VRS 91.1	124. VRS 124.1
26. VRS 26.1	59. VRS 59.2	92. VRS 92.1	125. VRS 125.2
27. VRS 27.1	60. VRS 60.1	93. VRS 93.1	126. VRS 126.1
28. VRS 28.1	61. VRS 61.1	94. VRS 94.1	127. VRS 127.1
29. VRS 29.1	62. VRS 62.2	95. VRS 95.1	128. VRS 128.2
30. VRS 30.1	63. VRS 63.1	96. VRS 96.1	129. VRS 129.1
31. VRS 31.1	64. VRS 64.1	97. VRS 97.1	130. VRS 130.1
32. VRS 32.1	65. VRS 65.2	98. VRS 98.1	131. VRS 131.1
33. VRS 33.1	66. VRS 66.1	99. VRS 99.1	132. VRS 132.1

Kontrollprofile:

133. VRS 133.1	162. VRS 162.1	190. VRS 1.9
134. VRS 134.2	163. VRS 163.1	191. VRS 2.9
135. VRS 135.1	164. VRS 164.1	192. VRS 3.9
136. VRS 136.1	165. VRS 165.1	193. VRS 4.9
137. VRS 137.1	166. VRS 166.1	194. VRS 5.9
138. VRS 138.1	167. VRS 167.1	195. VRS 6.9
139. VRS 139.1	168. VRS 168.1	196. VRS 7.9
140. VRS 140.1	169. VRS 169.1	197. VRS 8.9
141. VRS 141.1	170. VRS 170.1	198. VRS 9.9
142. VRS 142.1	171. VRS 171.1	199. VRS 10.9
143. VRS 143.1	172. VRS 172.1	200. VRS 11.9
144. VRS 144.1	173. VRS 173.1	201. VRS 12.9
145. VRS 145.1	174. VRS 174.1	202. VRS 13.9
146. VRS 146.1	175. VRS 175.1	203. VRS 14.9
147. VRS 147.1	176. VRS 176.1	
148. VRS 148.1	177. VRS 177.1	
149. VRS 149.1	178. VRS 178.1	
150. VRS 150.1	179. VRS 179.1	
151. VRS 151.1	180. VRS 180.1	
152. VRS 152.1	181. VRS 181.1	
153. VRS 153.1	182. VRS 182.1	
154. VRS 154.1	183. VRS 183.1	
155. VRS 155.1	184. VRS 184.1	
156. VRS 156.1	185. VRS 185.1	
157. VRS 157.1	186. VRS 186.1	
158. VRS 158.1	187. VRS 187.1	
159. VRS 159.1	188. VRS 188.1	
160. VRS 160.1	189. VRS 189.1	
161. VRS 161.1		

Abkürzungen

°	Grad
°C	Grad Celsius
'	Minute
%	Prozent
1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional
α, β, γ, a	Einstreuratzen
$\alpha_e, \beta_e, \gamma_e$	höhenkorrigierte Einstreuratzen
α_n	komplexe Wellenzahl ($n=0$: Luft)
A, A'	Amplituden
a	Zählrate der Hintergrundstrahlung des Hubschraubers inkl. des Messsystems
a_x	Proportionalitätsfaktoren ($x = 1, 2, K, TC, Th, U$)
AC	Wechselstrom
A/D	analog/digital
IfE	Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
Ah	Amperestunden
Am	Amperemeter
As	Amperesekunden
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
b	kosmische Einstreuung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bi	Bismut
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
bmp	Bitmap
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (heute: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie)
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
B_n	Schichtadmittanz
C	Gehalt eines Radioelementes im Boden
C_0	Radioelementgehalt am Boden
C_D	Radioelementgehalt, beeinflusst von der Vegetation
CF	Compact Flash
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
C_H	Zählrate im Höhenstrahlungskanal
ch	Kanalnummer
c_l	effektive Kabellänge
cm	Zentimeter
cps	counts per second

Cs	Cäsium
CSRS	Canadian Spatial Reference System
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
ΔI	Nullniveaufehler der In-phase-Komponente
ΔQ	Nullniveaufehler der Quadrature-Komponente
ΔT	Anomalien des erdmagnetischen Feldes
ΔV	magnetische Tagesvariationen
δ	Residual
δ_p	inverse, normierte Skintiefe (= h/p)
D	Vegetationshöhe
D_a	scheinbarer Abstand
d_a	scheinbare Tiefe
DC	Gleichstrom
DEM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DH	Differenz aus DEM und topo
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
d_n	Schichtmächtigkeiten
dpi	dots per inch (Pixel pro Zoll)
DTK	Digitale Topographische Karte
DVD	Digital Versatile Disc
ε	Komponentenverhältnis (= Q/I)
$\varepsilon_0, \varepsilon_n$	dielektrische Permittivität ($n = 0$: Luft, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
E	Energie
E	Ionendosisleistung am Erdboden
e	Basis des natürlichen Logarithmus ($1/e \approx 0.37$)
E ³	<u>Er</u> <u>Ex</u> ploration <u>Er</u> <u>z</u> gebirge
EDCJ	ICAO-Flughafen-Code: Chemnitz-Jahnsdorf
EM	Elektromagnetik
eTh	Äquivalentgehalt von Thorium
ETRS	European Terrestrial Reference System
eU	Äquivalentgehalt von Uran
EU	Europäische Union
F	IGRF
f	Frequenz
FAS	Fugro Airborne Surveys (heute: CGG)

FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik
ft	feet (Fuss)
G	Temperaturkoeffizient (= 0,0065 K/m)
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 (Flugsondenhöhe)
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_lkor	korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_lDEM_kor	DEM-korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_r	Radarhöhe der Flugsonde (in Metern)
h_rmess	Radarhöhe des Hubschraubers (in feet)
h ₀	Normhöhe des Spektrometers (h ₀ = 80 m)
HCP	horizontal-koplanar
h _e	effektive Höhe (in Metern)
HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HIF	Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF)
HMG	Hubschraubermagnetik
H _N	berechnete Normalhöhe
hPa	Hektopascal
h _r	Radarhöhe des Hubschraubers (in Metern)
HRD	Hubschrauberradiometrie
Hz	Hertz
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
IAEA	International Atomic Energy Association
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IBS	interaktive Bereichsselektion
ICBM	Institut für Chemie und Geologie des Meeres, Universität Oldenburg
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
I	In-phase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten
i	Laufparameter (Daten)
i	imaginäre Einheit
I _c	berechnete In-phase-Komponente
I _{noise}	Fehler der In-phase-Komponente

J_0	Bessel-Funktion (1. Art, 0. Ordnung)
K	Grad Kelvin
K	Kalium, Kaliumkanal
K_{COR}	korrigierte Kaliumzählraten
K_R	Zählraten im Kaliumfenster (K)
keV	Kiloelektronenvolt
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
km^2	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kPa	Kilopascal
λ	Wellenzahl
L	Messprofilkennung (line)
l	Liter
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
log	Logarithmus
μ	Absorptionskoeffizient
μ_V	Abschwächungskoeffizient der Vegetation
μ, μ_n	magnetische Permeabilität ($n = 0$: Luft, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$)
$\mu\text{R/h}$	Mikroröntgen pro Stunde
m	Meter
m NHN	Meter über Normalhöhennull
MeV	Megaelektronenvolt
MHz	Megahertz
ms	Millisekunde
mxd	ArcGIS-Datenformat
N	Norden
N	Anzahl Frequenzen
n	Laufparameter (Modellparameter)
N_c	Zählrate der Hintergrundstrahlung
NaI	Natriumiodid
NASVD	noise adjusted singular value decomposition
NHN	Normalhöhennull (Höhe nach DHHN92)
NN	Normalnull
NL	nicht-linear
N_L	Anzahl Schichten
N_m	Zählraten $N_{Th(corr)}$, $N_{U(corr)}$, $N_{K(corr)}$ und $N_{c,TC}$ bei effektiver Höhe h_e
NO	Nordosten

N_R	registrierzeitkorrigierte Rohzählrate
n_R	Rohzählrate
N_s	Zählraten N_m , bezogen auf die Standardhöhe h_0
nT	Nanotesla
NW	Nordwesten
N_x	bzgl. Hintergrundstrahlung und STD-Bedingungen korrigierte Zählraten ($x = K, U, Th$)
$N_{x(corr)}$	bzgl. der Einstreuratens korrigierte Zählraten ($x = K, U, Th$)
O	Osten
Ωm	Ohmmeter ($Ohm \cdot m$)
ω	Kreisfrequenz
π	Kreiszahl (= 3,14159265...)
P	im Hubschrauber gemessener Luftdruck
p	Skintiefe
P_0	mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe ($P_0 = 101,325 \text{ kPa}$)
PC	Personalcomputer
PDF	Portable Document Format
ppm	parts per million
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
Q_c	berechnete Quadrature-Komponente
Q_{noise}	Fehler der Quadrature-Komponente
ρ, ρ_n	spezifischer (Schicht-)Widerstand ($n = 0$: Luft, $\rho_0 > 10^8 \Omega m$)
ρ_a	scheinbarer spezifischer Widerstand
ρ_{LIM}	scheinbarer spezifischer Widerstand für <u>L</u> ow <u>I</u> nduction <u>M</u> ode
r	Abstands- oder Ortsparameter
R_1	komplexer Reflexionsfaktor
r_l	mittlere Amplitudenkorrektur
r_{mess}	gemessene Radarhöhe
Rn	Radon
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
S	Sensitivität
S	Süden
s	Sekunde
SO	Südosten
SOBA	Sächsisches Oberbergamt
STD	Standardbedingungen (Standardtemperatur und -druck)
STF	Standardfehler
STP	Standard-Temperatur-Druck
SW	Südwesten
T	Kontrollprofilkennung (tieline)

T	Totalintensität des erdmagnetischen Feldes
T	Temperatur
t	Zeit
T ₀	Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala (273,15 K)
tanh	Tangens Hyperbolicus
TC	Gesamtstrahlung
TC _{COR}	korrigierte Gesamtstrahlungszählraten
TC _R	Zählraten im Gesamtstrahlungsfenster (TC)
Th	Thorium, Thoriumkanal
TH _{G,R}	Zählraten im Thoriumfenster (TH)
Tl	Thallium
t _L	aktive Registrierzeit des Spektrometers
topo	topografische Höhe
TP	Tiefpass
TUBAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg
U/U-UP	Uran, Urankanal (UP: nach oben)
U _{COR}	korrigierte Uranzählraten
u _{G,R}	Zählraten im Uranfenster (U-UP)
U _{G,R}	Zählraten im Uranfenster (U)
USB	Universal Serial Bus
USA	United States of America
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
UTM	Universal Transverse Mercator Projection
V	Volt
VCX	vertikal-koaxial
Vm	Voltmeter
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
Vs	Voltsekunde
W	Westen
WGS	World Geodetic System
X, Y, Z	kartesische Koordinaten, X = N, Y = O, Z = Tiefenachse
xyz	Geosoft-Format (ASCII-Daten)
Z	relatives magnetisches Sekundärfeld
z	Tiefe
z*	Schwerpunktstiefe

1. Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt ein Forschungsprojekt zur Erkundung von metallischen Rohstoffen im Erzgebirge (ErzExploration Erzgebirge E³) gemeinsam mit dem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) und der Technische Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) durch. Das Projekt wird begleitet durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Das Sächsische Oberbergamt (SOBA) hat hierzu die Aufsuchungsgenehmigung für die wissenschaftliche Erkundung der Umgebung der Stadt Geyer erteilt. Dieses Gebiet ist ein historisches Bergbaugebiet. Aktuell soll der Geyerschen Wald nach Rohstoffen wie Zinn, Wolfram, Zink und Indium erkundet werden, wofür auch geophysikalische Methoden aus der Luft eingesetzt werden.

Das BGR-Teilprojekt „Pilotstudie zur Erkundung eines möglichen Erzvorkommens im Randbereich des nördlichen Erzgebirges (ErzExplora)“ hat das Ziel, das Messgebiet „Geyer“ mit verschiedenen Verfahren der Hubschrauber-Geophysik zu untersuchen. Das Messgebiet liegt am nördlichen Rand des Erzgebirges zwischen Stollberg und Annaberg-Buchholz. Es hat eine Breite von etwa 6-8 km und – von Südwest nach Nordost – eine Länge von etwa 19 km. Das Befliegungsgebiet schließt das vom HIF beantragte Aufsuchungsgebiet sowie das südlich liegende Gebiet um die Ortschaften Geyer und Ehrenfriedersdorf mit ein.

Zunächst wurde das Hubschraubermesssystem der BGR eingesetzt. Es 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.

Die Befliegung des Messgebietes Geyer wurde von der BGR im Oktober 2013 begonnen, musste aber nach einer Woche aufgrund eines Systemausfalls abgebrochen werden. Nach Reparatur in der Winterpause konnte die Befliegung Geyer Anfang April 2014 fortgesetzt und Mitte April 2014 abgeschlossen werden. Mit insgesamt 16 Messflügen, die vom Flughafen Chemnitz-Jahnsdorf (EDCJ) aus starteten, wurde eine Fläche von etwa 135 km² vermessen. Die Gesamtprofillänge beträgt etwa 1880 Profilkilometer. Hiervon werden die Ergebnisse im Aufsuchungsgebiet entlang der 189 Mess- und 14 Kontrollprofile mit etwa 1410 Profilkilometer in diesem Bericht dargestellt. Der mittlere Profilabstand lag bei den Messprofilen bei 100 m und bei den Kontrollprofilen bei 500 m. Mit den Messflügen wurden insgesamt 4052 km geflogen und 1.080.204 Messpunkte erfasst, was einer Gesamtregistrierzeit von etwa 30 Stunden entspricht.

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 Schwerpunkttiefen für sechs Messfrequenzen 380, 1.1773, 5.410, 8.300, 41.000 und 129.500 Hz;
- Spezifische Widerstände in den Tiefen 5, 15, 25, 40, 60, 100, 140 und 200 m unter GOK, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen;
- Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes;
- Gehalte von Kalium im Boden in %, die Äquivalenzgehalte von Thorium und Uran im Boden in ppm, die Gesamtstrahlung in cps und die Ionendosisleistung am Boden in $\mu\text{R/h}$.

Ferner sind für 203 Fluglinien Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes erstellt worden.

Dieser „Technische Bericht“ enthält keine Interpretation der erzielten Ergebnisse hinsichtlich des Vorkommens metallischer Rohstoffe. Dies soll zu einem späteren Zeitpunkt gemeinsam mit den Projektpartnern erfolgen.

2. Einleitung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt ein Forschungsprojekt zur Erkundung von metallischen Rohstoffen im Erzgebirge (ErzExploration Erzgebirge E³) gemeinsam mit dem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) und der Technische Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) durch. Das Projekt wird begleitet durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Das Sächsische Oberbergamt (SOBA) hat hierzu die Aufsuchungsgenehmigung für die wissenschaftliche Erkundung erteilt.

Die Umgebung der Stadt Geyer ist ein historisches Bergbauggebiet. Aktuell soll der Geyerschen Wald nach Rohstoffen wie Zinn, Wolfram, Zink und Indium erkunden werden, wofür auch geophysikalische Methoden aus der Luft zum Einsatz kommen. Im Unterschied zu Erkundungsbohrungen ermöglicht die Aerogeophysik eine flächendeckende Erkundung und greift nicht in den Boden ein. Mit der Aeroelektromagnetik wird die elektrische Leitfähigkeit im Untergrund erkundet, welche wiederum Anzeichen für im Gestein vorhandene Erzminerale liefern kann. Voraussetzung hierfür ist, dass diese sich in ihrer elektrischen Leitfähigkeit vom Umgebungsgestein unterscheiden und miteinander in Kontakt stehen, sodass sich Stromsysteme ausbilden können.

Mit der ersten Befliegung ab Oktober 2013 sollte der Untergrund zunächst bis in eine Tiefe von etwa 150 m untersucht werden. In den folgenden beiden Jahren waren weitere Befliegungen geplant. Im Rahmen des Projektes sollten zudem mathematische Verfahren entwickelt werden, mit denen aus den erfassten geophysikalischen Daten ein realitätsnahes dreidimensionales Modell des geologischen Untergrundes erstellt werden kann. Ein solches Modell ist für den Untergrund im Gebiet Geyer-Ehrenfriedersdorf geplant (HZDR, 2013).

Das BGR-Teilprojekt „Pilotstudie zur Erkundung eines möglichen Erzvorkommens im Randbereich des nördlichen Erzgebirges (ErzExplora)“ hat das Ziel, das Messgebiet „Geyer“ mit verschiedenen Verfahren der Hubschrauber-geophysik zu untersuchen (BGR, 2013). In Ergänzung zu dem Einsatz des derzeitigen BGR-Systems (Frequenz-Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD)) sollen später weitere geophysikalische Verfahren in dem Pilotgebiet eingesetzt werden.

Dieser „Technische Bericht“ protokolliert die Befliegung Geyer mit dem Hubschraubermesssystem der BGR und stellt die erzielten Ergebnisse in Form von thematischen Karten und Vertikalschnitten (nur HEM) dar.

Die Ergebnisse dieser Befliegungen sollen nach Abschluss der Projektes – wie alle anderen in Deutschland mit dem Hubschraubermesssystem der BGR beflogenen Gebiete – in das Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des LIAG (www.geophysics-database.de) eingestellt werden.

3. Das Messgebiet

Das Messgebiet Geyer liegt am nördlich Rand des Erzgebirges zwischen Stollberg und Annaberg-Buchholz. Es hat eine Breite von etwa 6-8 km und – von Südwest nach Nordost – eine Länge von etwa 19 km. Das Messgebiet wird nach Nordwesten durch die Ortschaften Bernsbach, Zwönitz, Hormersdorf, Auerbach und Gelenau, sowie nach Südosten durch die Ortschaften Grünhain Beierfeld, Hermannsdorf, Tannenbergl und Drehbach begrenzt (Abbildung 1). Es erstreckt sich von etwa 12°46' bis 13°01' östlicher Länge und 50°33' bis 50°42' nördlicher Breite.

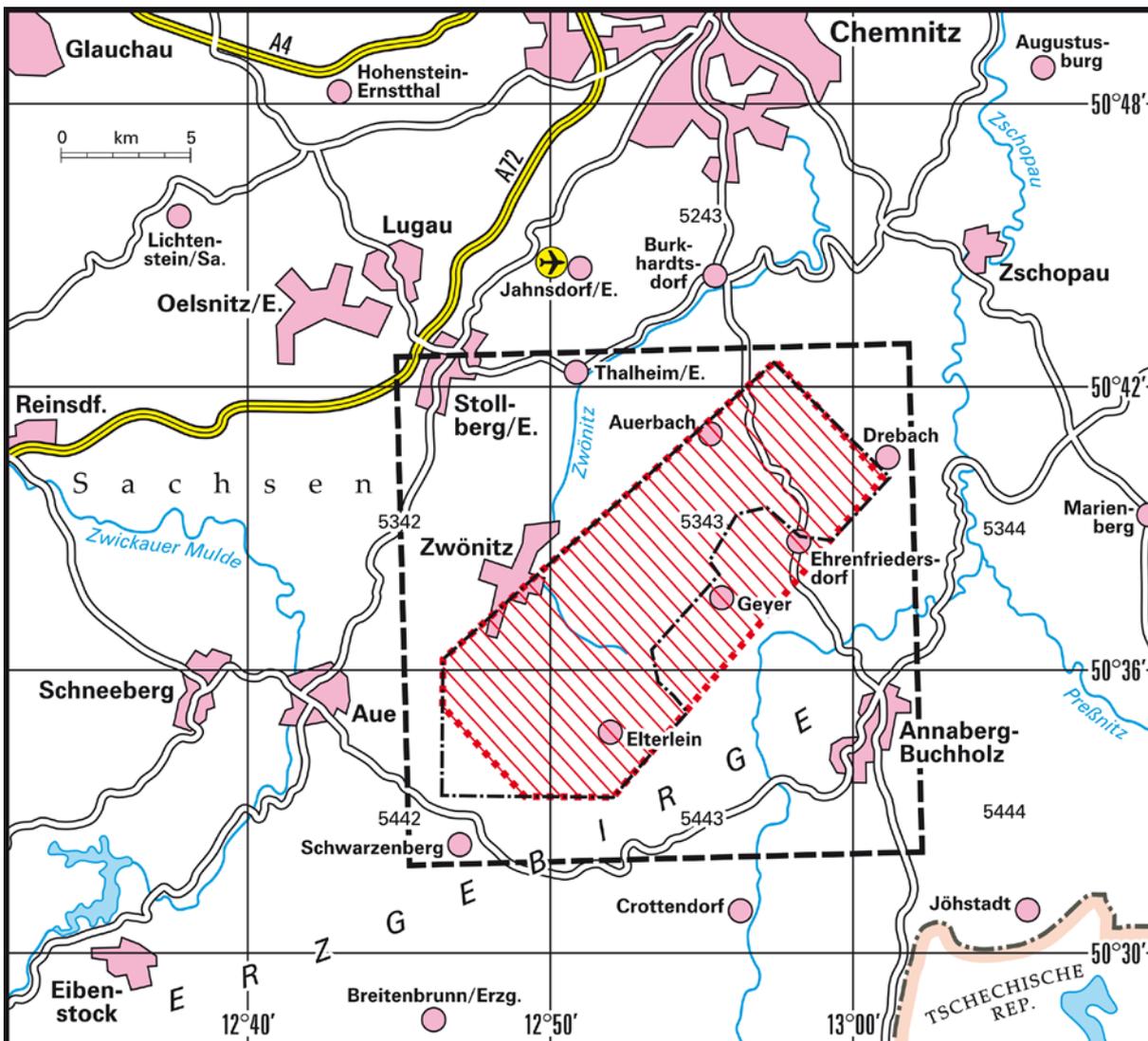


Abbildung 1. Lageskizze des Aufsuchungsgebietes (strich-punktiert) und des Messgebietes Geyer (rot).

Das Befliegungsgebiet schließt das vom HIF beantragte Aufsuchungsgebiet (Abbildung 1) sowie das südlich liegende Gebiet um die Ortschaften Geyer und Ehrenfriedersdorf mit ein. Ferner wurden die Fluglinien etwa 1-2 km über die Messgebietsgrenzen hinaus verlängert, um beim Anflug die Pendelbewegungen der Flugsonde nach der Kehre zu minimieren.

Die Befliegung des Messgebietes Geyer mit drei geophysikalischen Verfahren (Elektromagnetik, Magnetik, Radiometrie) wurde von dem Hubschrauberteam der BGR im Oktober 2013 begonnen, musste aber nach einer Woche aufgrund eines Systemausfalls abgebrochen werden. Nach Reparatur in der Winterpause konnte die Befliegung Geyer Anfang April 2014 fortgesetzt werden. Mit insgesamt 16 Messflügen, die vom Flughafen Chemnitz-Jahnsdorf (EDCJ) aus starteten, konnte nach weiteren zwei Wochen die Messkampagne Mitte April 2014 abgeschlossen und eine Fläche von etwa 135 km² vermessen werden. Insgesamt wurden 189 Mess- und 14 Kontrollprofilen geflogen sowie 30 Profile aufgrund technischer Probleme wiederholt. Die Gesamtlänge aller Profile beträgt etwa 1880 Profilkilometer. In diesem Bericht sind nur die ausgewählten Mess- und Kontrollprofilabschnitte im Aufsuchungsgebiet dargestellt (**Abbildung 2**), die eine Gesamtlänge von 1410 Profilkilometern haben. Die Flugrichtung der Messprofile war NW-SO, die der Kontrollprofile SW-NO. Die mittleren Profilabstände lagen bei 100 m bei den Messprofilen und bei 500 m bei den Kontrollprofilen. Der mittlere Messpunktabstand auf den Profilen war etwa 4 m. Mit allen Messflügen wurden insgesamt 4052 km geflogen und 1.080.204 Messpunkte erfasst, was einer Gesamtregistrierzeit von etwa 30 Stunden entspricht.

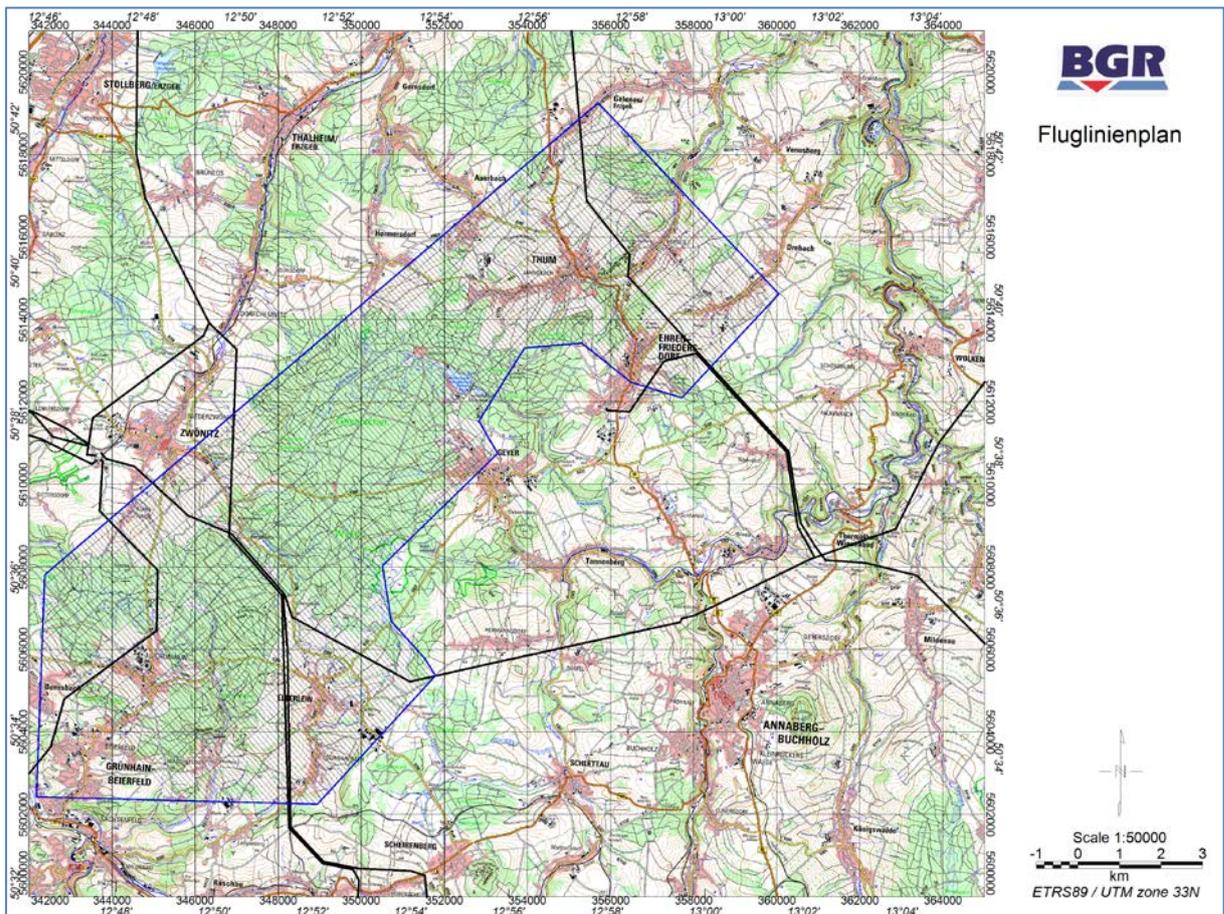


Abbildung 2. Fluglinienkarte für das Aufsuchungsgebiet im Messgebiet Geyer; Hintergrund: Georeferenzierte Rasterdaten der Topographischen Karte 1:50.000 (DTK 50-V); die Hochspannungsleitungen sind als schwarze Linien markiert.

Die Messprofile (*Lines*) sind durch L*.1 und die Kontrollprofile (*Tie-lines*) durch T*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L*.2 bzw. L*.3 gekennzeichnet. Am Ende der Messflüge wurde – wenn möglich – in Messflughöhe 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 Zwischenbericht haben als Hintergrund georeferenzierte Rasterdaten der Topographischen Karte 1:50.000 (DTK 50-V).

Tabelle 1. Technische Daten der Befliegung Geyer

Messgebiet BGR-Gebietsnummer	Geyer 146
Befliegungszeitraum	21.–25.10.2013 01.–09.04.2014
Größe des Messgebietes	135 km ²
Gesamtprofilkilometer	1410 km (insg. 1880 km)
Gesamtanzahl der Messpunkte	347.388 (insg. 472.733)
Zahl der Messflüge	16
Bezeichnung der Messflüge	14601–14621 (ohne 14603–04,06,09–10)
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	63 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit über Grund	146 km/h
Mittlerer Messpunktabstand	4 m
Zahl der Messprofile	189 (+ 30)
Länge der Messprofile	6–8 km
Richtung der Messprofile	139,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	100 m
Zahl der Kontrollprofile	14
Länge der Kontrollprofile	19 km
Richtung der Kontrollprofile	49,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	500 m
Zahl der Sonderprofile „Referenzstrecke“	16

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Geyer aufgrund der bewegten Topografie und der Bewaldung besondere Ansprüche an den eingesetzten Piloten (M. Klenke) der Firma HeliJet Charter GmbH. In dem Messgebiet gab es zudem weitere Hindernisse wie Hochspannungsleitungen, Radaranlagen/Sendemasten und Ortschaften, denen ausgewichen werden musste. Die zum Teil starken Störungen der Messungen, z. B. durch Stromleitungen in der Nähe von

Sendern oder über Ortschaften, beeinträchtigten die Qualität der elektromagnetischen Messdaten erheblich, da auch aufgrund der geringen elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes die Messsignale generell niedrig waren.

Die Sollflughöhe des Hubschraubers beträgt entlang der Messprofile 70 m über der Erdoberfläche. Über Wald, bebauten Gebieten und Hochspannungsleitungen kann die niedrige Flughöhe aus Sicherheitsgründen nicht immer eingehalten werden. Daher liegt die mittlere Flughöhe der Flugsonde meist oberhalb von 30 m. Bei der Befliegung des Messgebietes Geyer lag sie bei etwa 63 m über der Erdoberfläche. Während eines Messfluges, speziell vor dem ersten und nach dem letzten Profil, aber auch zwischen den Profilen, stieg 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 zunächst auf dem Flughafengelände aufgestellt, in 2013 bei 12,833754° östlicher Länge und 50,747926° nördlicher Breite und in 2014 bei 12,833691° östlicher Länge und 50,727160° nördlicher Breite. Zusätzlich wurde in 2014 eine weitere Bodenstation auf einem Bergrücken zwischen Flughafen und Messgebiet bei 12,833618° östlicher Länge und 50,727268° nördlicher Breite aufgestellt.

4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR

Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR besteht aus einem Messhubschrauber und diversen aerogeophysikalischen und fernerkundlichen Verfahren (Meyer & Siemon, 2014). Mit dem Standardmesssystem werden die Daten für die drei Methoden Elektromagnetik, Magnetik und Radiometrie (Gammastrahlenspektrometrie, Szintillometrie) erfasst. Die dafür erforderliche Messtechnik ist zusammen mit den zur Durchführung von Messflügen erforderlichen Navigations- und Positionierungssystemen, der 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).

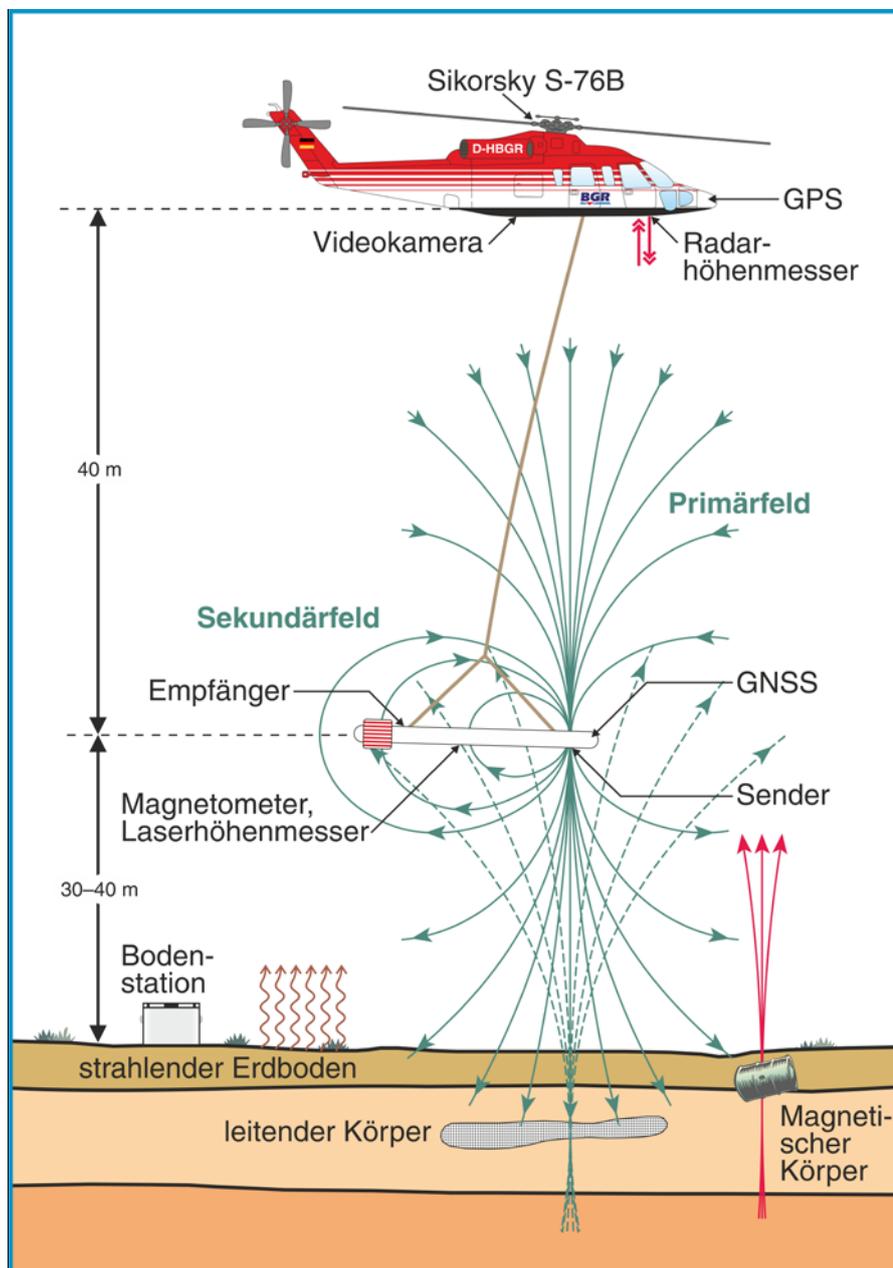


Abbildung 3. Prinzipische Skizze des Hubschraubermesssystems der BGR

4.1. Messhubschrauber

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

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

Hubschrauber	
Typ	Sikorsky S-76B (Hersteller: Sikorsky, USA)
Baujahr	1986
Antrieb	2 Turbinen Pratt & Whitney PT6B-36A mit je 1.033 SHP (<i>shaft horse power</i>)
Maximales Abfluggewicht	11.700 pounds (5.363 kg)
Maximales Gewicht der Außenlast	3.300 pounds (1.500 kg)
Maximale Messflugzeit	2:50 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-System (Helicopter Data Acquisition System) gesteuert, das auch die Datenerfassung und -speicherung sowie die Navigation während des Messfluges unterstützt. Hierzu können sowohl der Operator als auch der Navigator auf den Displays ihrer Tablet-Computer diverse Informationen, wie z. B. den Flugweg oder die jeweiligen Messkanäle, grafisch darstellen lassen.

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, 2013: BKS36a (intern: 61), 2014:BKS60 (intern: 60)
	II. Cäsiummagnetometer	
	Aufgabe	Messung des erdmagnetischen Totalfeldes
	Hersteller	Geometrics, USA
Hubschrauber	Gerätebezeichnung	G-822A
	III. Gammastrahlenspektrometer	
	Aufgabe	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
	Hersteller	Radiation Solutions Inc., Kanada
Gerätebezeichnung	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, bei diskreten Sendefrequenzen abgestrahlt. Die magnetischen Felder dringen in den Erduntergrund ein und induzieren dort, abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes, elektrische Wirbelströme. Die magnetischen Felder dieser Wirbelströme, die Sekundärfelder, induzieren ihrerseits sehr schwache Spannungen in den zugeordneten Empfängerspulen des EM-Systems (vgl. **Abbildung 3**).

Bei dem hier verwendeten HEM-System wird für jede der sechs Messfrequenzen im Bereich von 386 Hz bis 133 kHz (BKS36a, eingesetzt in 2013, **Tabelle 4a**) bzw. 380 Hz bis 130 kHz (BKS60, eingesetzt in 2014, **Tabelle 4b**) ein eigenes Spulensystem benutzt, das aus horizontal-koplanar bzw. vertikal-koaxial angeordneten Sende-, Empfangs-, Kompensations- und Kalibrierspulen besteht.

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

Tabelle 4a. HEM-Systemparameter für BKS36a

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
386	7,938	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.817	7,931	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
5.390	9,055	vertikal-koaxial	EM_6	3. Frequenz
8.360	7,925	horizontal-koplanar	EM_2	4. Frequenz
41.420	7,912	horizontal-koplanar	EM_1	5. Frequenz
133.200	7,918	horizontal-koplanar	EM_4	6. Frequenz

Tabelle 4b. HEM-Systemparameter für BKS60

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
380	7,918	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.773	7,918	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
5.410	9,042	vertikal-koaxial	EM_6	3. Frequenz
8.300	7,957	horizontal-koplanar	EM_2	4. Frequenz
41.000	8,033	horizontal-koplanar	EM_1	5. Frequenz
129.500	7,906	horizontal-koplanar	EM_4	6. Frequenz

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

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

4.4. Magnetik

Die Totalintensität des erdmagnetischen Feldes wird mit Hilfe eines in der Flugsonde montierten hochempfindlichen Cs-Magnetometers (**Tabelle 3**) gemessen und in der Einheit Nanotesla (nT) angegeben. Die Funktion eines Cs-Magnetometers basiert auf der Messung der sogenannten Larmor-Frequenz, welche sich in einem speziellen optisch gepumpten System einstellt. Diese Frequenz ist direkt proportional zur magnetischen Feldstärke und lässt sich mit hoher Genauigkeit bestimmen. Die Auflösung der magnetischen Registrierungen beträgt 0,01 nT.

Das gemessene Magnetfeld setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen. Das magnetische Normalfeld der Erde hat seine Ursache im Erdinneren und weist eine vom Äquator zu den Polen hin zunehmende Intensität auf. In Norddeutschland hat es eine Stärke von etwa 49.000 nT. Es wird vom 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 sicher identifizieren. Schließlich unterliegt das geogene Magnetfeld aufgrund von Schwankungen im Zustand der Ionosphäre einem Tagesgang. Diese Prozesse bewirken in Deutschland Variationen von etwa 10 bis 20 nT.

Zur Erfassung des magnetischen Tagesganges wird eine ebenfalls mit einem Cs-Magnetometer bestückte Bodenstation betrieben (**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

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

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

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

Das Gammastrahlenspektrometer summiert die Spektren über jeweils eine Sekunde auf, daher wird als Einheit für die Zählraten cps (*counts per second*) verwendet. Für die Datenerfassung mit dem HeliDAS-System (siehe **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 Spek-

tren. Die Aufzeichnung des Uran-Energiebereichs erfolgt getrennt für die nach unten gerichteten und den nach oben gerichteten Kristallen.

4.6. Navigations- und Positionierungssystem

Ein GPS-Empfänger, dessen Antenne außen am Hubschrauber montiert ist, liefert laufend Positionsangaben an das Navigationssystem. Die GPS-Daten werden zusammen mit den geophysikalischen Daten im HeliDAS-System (**Kapitel 4.5**) gespeichert.

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

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 (über NHN) der Flugsonde
	Hersteller	Positionserfassung und Anzeige: FAS, Kanada GPS-Empfänger: CSI Wireless, Kanada
	Gerätebezeichnung	Positionserfassung: HeliDAS GPS-Empfänger: DGPS MAX

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

Die genaue Höhe der Flugsonde (**Tabelle 8**) über der Erdoberfläche wird zur Auswertung der elektromagnetischen Daten und zur Erstellung eines digitalen Geländemodells benötigt. Durch einen in die Flugsonde eingebauten Laserhöhenmesser wird diese Höhe auf $\pm 0,2$ m genau bestimmt, wenn die Lage der Flugsonde bekannt ist. Fehlt diese, dann können die Ungenauigkeiten aufgrund des Pendelns der Flugsonde auch mehrere Meter betragen. Ein weiterer Vorteil des Laserhöhenmessers ist der fokussierte Durchmesser des Laserstrahls, der es ermöglicht, über lichten Wäldern häufig die Entfernung bis zum Boden zu erfassen und nicht nur den Abstand bis zu den Baumkronen.

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

Mit Hilfe eines GPS-Empfängers wird die Höhe des Hubschraubers über NHN bestimmt, die jedoch ohne Verwendung einer Referenzstation am Boden oder einem anderen Korrekturverfahren einen Fehler von einigen Metern aufweisen kann. Die Flughöhe des Hubschraubers (**Tabelle 8**) über der Erdoberfläche bzw. über Hindernissen (z. B. Wäldern und Gebäuden) wird im Normalfall zur Auswertung der radiometrischen Daten benötigt. Sie wird über die Differenz der GPS-Höhe des Hubschraubers und einem digitalem Geländemodell, z. B. DGM25, bestimmt. Die mit dem Radarhöhenmesser erfassten Höhen über der Erdoberfläche bzw. Bewuchs dienen nur zur Flugführung.

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
Flugsonde	Gerätebezeichnung	HeliDAS
	Laserhöhenmesser	
	Aufgabe	Präzise Bestimmung der Höhe der Flugsonde über der Erdoberfläche
	Hersteller	Riegl, Österreich
	Gerätebezeichnung	LD90-3800VHS

4.7. Datenerfassung

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

Tabelle 9. *Datenerfassung und -aufzeichnung*

Datenerfassung / Datenaufzeichnung		
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. 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 Holzplatte 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	Sikorsky, USA

5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten

Die Ziele der Datenverarbeitung können wie folgt zusammengefasst werden:

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

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

Tabelle 11. HEM-Auswertung (Übersicht)

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

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

5.1. Prozessabläufe

Die aerogeophysikalischen Daten 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 sowie einige daraus abgeleitete Parameter grafisch dar (Level 1 in **Tabelle 11**). Im zugehörigen Zwischenbericht (Siemon et al., 2014), der in der Regel auf diesem Bearbeitungsstand basiert, sind die Ergebnisse nach einigen weiterführenden Bearbeitungsschritten, um die z. T. erheblichen Niveaukorrekturen ansatzweise durchzuführen, 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;
- Zusammenführung der Profildaten aller Messflüge zu Gesamtgebietsdateien;
- Korrektur von Niveaufehlern in den Daten;
- Herstellung von thematischen Karten und Schnitten.

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

5.2. Positionsdaten

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

5.2.1. GPS-Koordinaten

Die während des Fluges registrierten Koordinaten, die die Positionen des Hubschraubers und der Flugsonde angeben, beziehen sich auf das WGS84-System. Diese geografischen Koordinaten werden mittels Oasis montaj für die Flugsondenposition in ein lokales, kartesisches Koordinatensystem transformiert, wobei auch fehlende Koordinatenwerte durch lineare Interpolation ergänzt werden. Alle Ergebnisse für das Messgebiet Geyer sind auf ETRS89-Koordinaten (UTM-Zone 33N) 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 $<0,3\text{m}$) zu erhalten. Die Nachprozessierung der GPS-Rohdaten erfolgt über den Web-Dienst *Precise Point Positioning* des geologischen Dienstes von Canada (*Natural Resources Cana-*

da). Die vom Dienst gelieferten Ellipsoidhöhen der präzisen Koordinaten werden unter Verwendung des Geoidundulationsmodells GCG2011 auf in der Kartografie übliche Geoidhöhen umgerechnet und anschließend ebenfalls in das lokale Koordinatensystem UTM-Zone 33N 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 (Version vom 05.06.2012) 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 GPS-Rohdaten, die für die oben beschriebene Korrektur notwendig sind, nicht zur Verfügung. Daher konnte zunächst lediglich ein fehlerhafter Bezugswert korrigiert werden, um die Höhe der Flugsonde zu anzupassen.

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

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

Im Mittel lag die effektive Kabellänge im Messgebiet Geyer bei $c_1 = 38,6$ m.

Im weiteren Verlauf der Auswertung wurde die GPS-Höhe der Flugsonde (h_{GPS}) durch Vergleich der aus den Flugdaten berechneten mit den aus dem vorliegenden Geländemodell (DGM25) abgeleiteten Höhen (siehe **Kapitel 5.2.5**) korrigiert, indem die geglättete Differenz aus beiden als Korrektur verwendet wurde. Die GPS-Daten in der Flugsonde BKS60 wiesen ferner eine zeitliche Verschiebung von 0,7 s (7 Werte) auf, was ebenfalls korrigiert wurde.

5.2.2. Radarhöhen

Die Radarhöhenwerte, die vom Hubschrauber aus gemessen werden, sind nur bis 2010 der Datenerfassung zugeführt worden. Daher wurden bei der Befliegung Geyer neue Höhen, die der alten Radarhöhe (bezogen auf die Flugsonde) entsprechen sollen, aus der Differenz der GPS-Höhen der Flugsonde (h_{GPS}) und einem digitalem Geländemodell (DEM) berechnet:

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

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 (verursacht durch Neigung oder seitliche Auslenkung der Flugsonde) oder zu kleine Werte (Bewuchs, Bebauung) auftreten. Die zu kleinen Werte werden standardmäßig durch eine Kombination von Filtern korrigiert. Hierzu wird zunächst eine reduzierten 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

($\Delta h_{l_{noise}}$) und der Maximalwerte ($\Delta h_{l_{max}}$) der reduzierten Laserhöhe in vorgegebenen Intervallen mit Fensterbreiten von jeweils 7 bzw. 21 Messwerten, wobei einzelne Ausreißer der Standardabweichung durch Anwendung eines schmalen (2 Werte) nicht-linearen 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 nicht zu groß (2 m) ist und die Standardabweichung über einem vorzugebenden Schwellwert (0,2) liegt. Zur Vermeidung von Sprüngen der gegenüber den reduzierten Laserhöhen stets größeren Maximalwerte werden die Maximalwerte auf das Niveau der angrenzenden reduzierten Laserhöhen bezogen. Abschließend erfolgt eine leichte Glättung (Tiefpass-Abschneideperiode = 1 s, d. h. 10 Werte) der korrigierten reduzierten Laserhöhe ($\Delta h_{l_{kor}}$) und die Addition der Basislinie, um die korrigierte Laserhöhe ($h_{l_{kor}}$) zu erhalten. **Tabelle 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	$\Delta h_{l_{noise}}$
Nicht-linear	Filterlänge: 1 Wert (\approx 4 m), Toleranz: 2,0	Δh_l
Schwellwert	Schwellwert ($\Delta h_{l_{noise}}$): 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)	$\Delta h_{l_{kor}}$

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

Die zu großen Laserhöhen, die durch die Neigung der Flugsonde (durchschnittlich etwa 10°) 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 senkrecht 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 Abstandsmessung zwischen Flugsonde und Erdboden auftreten als in flachem Gelände.

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

$$h_{\text{DEM_kor}} [\text{m}] = h_{\text{GPS_hor}} [\text{m NHN}] - \text{DGM25} [\text{m NHN}].$$

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 1,0, Spannung 0,5) stark 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 ($h_{\text{l_kor}}$) berechnet

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

Sie wird benötigt, um die aus den Messdaten abgeleiteten Geländehöhen (DEM) in Kartenform oder auch dreidimensional darstellen zu können. Ferner eignen sich die topografische Höhen besser für die manuelle Nachkorrektur der Laserhöhe als die Laserhöhe bzw. die reduzierte Laserhöhe, da z. B. Baumbestände oder Täler und Bergrücken 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 bewegten Topografie und der Pendelbewegungen der Flugsonde sind die Laserhöhenwerte oft ungenau und somit auch das daraus abgeleitete Geländemodell. Daher wurde als Geländemodell DGM25, herausgegeben vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), verwendet.

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

$$\text{DH} [\text{m}] = \text{DGM25} [\text{m NHN}] - \text{topo} [\text{m NHN}].$$

an die GPS-Höhe angebracht wurde:

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

5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik

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

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

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

Neben dem eigentlichen Nutzsignal, das von elektrisch leitfähigem Material an und unter der Erdoberfläche herrührt, treten auch Störsignale in den Messdaten auf, die durch z. B. Bewegung des Systems oder durch externe Felder verursacht werden und im Zuge der Datenverarbeitung eliminiert oder geglättet werden müssen.

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

Diese grundlegenden wie auch die nachfolgenden Datenverarbeitungsschritte wurden im Rahmen der Feldprozessierung mit Oasis montaj von Geosoft durchgeführt. Die in dieser Programmumgebung entwickelten Routinen wurden anschließend in eine BGR-eigene Software (EM_view) übertragen und durch weitere Routinen ergänzt. Alle notwendigen Parameter sind in Konfigurationsdateien abgelegt.

5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems

Das HEM-System wurde von dem Hersteller (Fugro Airborne Surveys (FAS), heute: CGG) mit Hilfe von externen Spulen auf schlecht leitendem Untergrund in Kanada (Mountsbury Conservation Area südwestlich von Toronto) kalibriert. Nach der Optimierung der Phaseneinstellungen mit Hilfe eines Ferritstabes lassen sich mit diesen externen Kalibrierspulen Signale bekannter Größe in den Empfängern erzeugen. Diese Kalibrierwerte werden benutzt, um die Ausschläge, die durch die internen

Kalibrierspulen erzeugt werden, in ppm anzugeben. Da Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht auszuschließen sind, 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.

Zunächst wurden die Korrekturen für die Kalibrierwerte verwendet, die über der Nordsee vor Helgoland bestimmt wurden (**Tabelle 13a** und **Tabelle 13b**). Bei den für das HEM-System BKS36a bestimmten Korrekturfaktoren traten die größten Abweichungen gegenüber den vom Hersteller gelieferten Werten bei der höchsten (133 kHz) und dritthöchsten (8 kHz) Frequenz auf (70% bzw. 15% in der Amplitude und 6,5° bzw. 0% in der Phase), während sich bei BKS60 die größten Abweichungen bei den beiden höchsten Frequenzen (8% bzw. 20% in der Amplitude) und bei den Koaxialspulen (24% in der Amplitude und 2,5° in der Phase) ergaben (**Tabelle 13b**).

Im weiteren Verlauf der Prozessierung wurden die im Mai 2014 für HEM-System BKS60 bestimmten mittleren Korrekturfaktoren verwendet (**Tabelle 13b**), die an der Nordseeküste über der Fahrrinne der Jade im Jadebusen bzw. über einem Testprofil am Flughafen in Mariensiel gewonnen wurden. Diese Nachkorrekturen ermöglichten eine individuelle, meist geringe Anpassung der Kalibrierfaktoren, die im Mittel weniger als 3% Amplitudenkorrektur und 2° Phasenkorrektur erforderten. Lediglich bei der höchsten Messfrequenz waren die Korrekturen etwas größer (11% in der Amplitude), wodurch die vorhergehende Korrektur abgeschwächt wurde. Während der Feldprozessierung zeigte sich auch, dass beim HEM-System BKS36a erhebliche Phasenkorrekturen notwendig waren (8° bei den Flügen 14602 und 14605 und 26° beim Flug 14607). Die flugabhängigen Korrekturen können auftreten, wenn bei der Kalibrierung zu Beginn eines jeden Messfluges (s. u.) externe Störsignale auf dem HEM-System einwirken.

Zu Beginn eines Messfluges werden in großer Flughöhe die durch die internen Kalibrierspulen hervorgerufenen Ausschläge überprüft und das Messsystem wird automatisch anhand von Sollwerten nachjustiert (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. Diese in großer Flughöhe mehrmals aufgezeichneten Signale werden automatisch bei der Datenverarbeitung in den Messdaten erkannt. Aus dem Vergleich der Amplituden und Phasen der Messdaten mit den Erwartungswerten erhält man für jede Messfrequenz kleine Korrekturen, die – über den gesamten Flug stark geglättet – an die Rohdaten bei Bedarf angebracht werden können.

Da die Temperaturänderung auch Einfluss auf die Kalibrierausschläge selbst haben, wurde auf eine Amplituden- und Phasenkorrektur über Kalibrierausschläge verzichtet. Stattdessen wurden Amplitude und Phase indirekt über statistische Niveauanpassung korrigiert (siehe **Kapitel 5.3.6**).

Tabelle 13a. Kalibrierwerte für das HEM-System BKS36a

Frequenz in Hz	Kalibrierwerte FAS		Kalibrierwerte BGR (2014)	
	I [ppm]	Q [ppm]	I [ppm]	Q [ppm]
386	-205,3	-205,3	-205,0	-205,0
1.817	-175,4	-174,7	-175,0	-175,0
5.400	76,6	76,8	78,0	78,0
8.372	-144,4	-144,2	-168,9	-168,9
41.415	-667,3	-665,2	-598,5	-669,4
133.200	-1404,2	-1406,4	-718,5	-903,3

Tabelle 13b. Kalibrierwerte für das HEM-System BKS60

Frequenz f [Hz]	Kalibrierwerte FAS 2005		Kalibrierwerte BGR 2008		Kalibrierwerte BGR 2014	
	I [ppm]	Q [ppm]	I [ppm]	Q [ppm]	I [ppm]	Q [ppm]
380	-215.50	-214.90	-220.74	-210.95	-213.24	-205.92
1.773	-216.30	-216.20	-201.79	-207.50	-201.79	-207.50
5.410	108.90	106.40	81.83	89.14	80.69	85.03
8.300	-224.60	-224.80	-229.49	-229.49	-228.49	-230.49
41.000	-577.30	-580.70	-630.51	-634.48	-600.41	-637.13
129.500	-585.40	-580.60	-700.29	-716.86	-622.35	-651.25

5.3.2. Nullniveaubestimmung und Driftkorrektur

Die Sekundärfelddaten können noch Primärfeldanteile enthalten, die nicht vollständig durch die verwendeten Kompensationsspulen erfasst worden sind. Ferner kann sich dieser Anteil durch temperaturbedingte Drift während des Fluges ändern. Daher ist es notwendig, dieses so genannte Nullniveau mehrmals während eines Fluges zu erfassen. Dies geschieht in der Regel in großen Flughöhen (Höhe der Flugsonde >350 m), da in diesen Höhen das Sekundärfeld weitgehend abgeklungen ist. In den Bereichen mit großer Flughöhe und möglichst ruhigem Messsignalverlauf werden sogenannte Stützstellen gesetzt, an denen Messwerte erfasst werden, die das Nullniveau repräsentieren. Die Interpolationsgeraden zwischen jeweils benachbarten Stützstellen liefern die Bezugsniveaus, von denen aus die Messamplituden der Sekundärfelder zu bestimmen sind. Die Nullniveaubestimmung wird für jeden Messkanal (I und Q für sechs Frequenzen) durchgeführt.

Mit der oben beschriebenen Vorgehensweise lassen sich die langfristigen, quasi-linearen Driften in den Nullniveaus beseitigen. 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).

Neben den automatisch gesetzten Stützstellen wurden während der Feldprozessierung auch etliche Stützstellen manuell gesetzt, um die besonders an den warmen Tagen auftretenden starken Driften der Messwerte (vor allem bei den Daten der höchsten Messfrequenz) näherungsweise zu erfassen.

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

5.3.3. Datenkorrektur

Störungen, die durch externe EM-Signale hervorgerufen werden (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen, Sferics, Ortschaften, Bahnlinien), werden durch geeignete Filterung bzw. Eliminierung bereits bei der Feldprozessierung automatisch unterdrückt. Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen elektrischen Installationen beruhen (vgl. **Kapitel 5.3.7**), werden bei der Detailprozessierung manuell aus den Daten entfernt (**Tabelle 11**, Level 3). Unterschreitet ein Amplitudenwert den relativen Standardfehler (rel. STF) der Messamplituden (I und Q) in einem Intervall um diesen Messwert, so wird dieser Wert eliminiert und später auf Basis der in der Fläche interpolierten Halbraumparameter neu berechnet (vgl. **Kapitel 5.3.7**). Zur Unterdrückung von Ausreißern werden nicht-lineare (NL) Filter benutzt und zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die HEM-Daten anschließend mit einem Tiefpass-Filter geglättet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität sind unterschiedliche Filterparameter für die Daten der jeweiligen Frequenzen erforderlich (**Tabelle 14**).

Tabelle 14. Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung

Frequenz [Hz]	STF [Werte]	Schwellwerte (I/Q) für rel. STF	NL-Filter [Werte/Toleranz]	TP-Filter [Werte]
380	25	0,40 / 0,40	10 / 2,0	50
1.773	20	0,25 / 0,30	10 / 2,0	40
5.410	20	0,22 / 0,22	10 / 4,0	35
8.300	15	0,20 / 0,20	10 / 4,0	35
41.000	15	0,10 / 0,10	10 / 4,0	25
129.500	20	0,30 / 0,25	10 / 4,0	20

Ferner kann ein stark magnetisierter Untergrund die elektromagnetischen Messungen beeinflussen, da die magnetische Permeabilität (vgl. **Kapitel 5.3.4**) auch einen nicht zu vernachlässigen Beitrag zum Gesamtsignal bewirken kann. Dies kann zu einer deutlichen Verringerung der In-phase-Messwerten und einer leichten Erhöhung der Quadrature-Messwerten führen, was sich insbesondere bei den Daten der niedrigen Frequenzen bemerkbar macht (Huang & Fraser, 2000). Im Messgebiet Geyer traten diese Effekte an vielen Stellen auf und führten auch zu deutlich negativen In-phase-Messwerten, die mit den herkömmlichen Auswerteverfahren nicht zu bearbeiten waren. Daher wurden diese Bereiche zunächst aus den Daten entfernt und wie die anthropogenen Effekte behandelt (siehe **Kapitel 5.3.5**).

5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter

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

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

wobei $\alpha_0^2 = \lambda^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0$ mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$, $\rho_0 > 10^8 \text{ }\Omega\text{m}$ 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 Spulenordnung (VCX), die auf kleine Sekundärfelder führt ($\text{VCX} \approx -0,25 \cdot \text{HCP}$). Nach Weidelt (1991) lässt sich der Reflexionsfaktor R_1 für einen Halbraum mit N_L Schichten rekursiv berechnen:

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

mit

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

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

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 Komponentenverhältnissen ε

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

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

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

berechnet. Aus den resultierenden Funktionen $A'(\delta_p)$ und $\delta_p(\varepsilon)$, 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 Höhe der Flugsonde (in m über der Erdoberfläche) abweichen. Der Abstand zwischen der Halbraumoberfläche und der aus den Höhenmessungen berechneten Erdoberfläche wird als scheinbare Tiefe

$$d_a = D_a - h$$

definiert. Falls d_a positiv ist, wird über dem Halbraum eine „schlecht leitende“, bei negativem d_a eine „gut leitende“ Deckschicht angenommen.

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

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

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

Die berechneten Halbraumparameter werden vor der Weiterverarbeitung auf Plausibilität überprüft, d. h. bei zu großen Flughöhen ($h > 80$ m) und extremen Werten ($\rho_a \geq 9999 \Omega\text{m}$, $d_a > 50\text{-}250$ m) werden die Halbraumparameter begrenzt bzw. gelöscht.

Abweichend von diesem bei Siemon (2001) beschriebenen Verfahren wurde hier eine genauere Ausbreitung der elektromagnetischen Felder berücksichtigt und für jede Messfrequenz eigene Polynomkoeffizienten für die Funktionen $A'(\delta_p)$ und $\delta_p(\varepsilon)$ bestimmt (Siemon, 2012). Es ergaben sich im Allgemeinen nur geringfügige Änderungen, vor allem bei den beiden höchsten Frequenzen. Über sehr gut leitenden Untergrund (Salzwasser) sind die Abweichungen insbesondere für die Q -Komponente der sekundären Magnetfelder jedoch erheblich, sodass die Neuberechnung der Polynomkoeffizienten notwendig war, die für verschiedene Höhen im Bereich $h = 10\text{-}300$ m durchgeführt wurde. Alternativ zu den Polynomen für verschiedene diskrete Höhen werden auch Flächeninterpolationen (Gitter) verwendet, die für jede Kombination aus I und Q die zugehörigen ρ_a - und D_a -Werte enthalten.

Bei hohen spezifischen Widerständen im Erduntergrund können die gemessenen HEM-Amplituden sehr klein werden, insbesondere für die I -Komponente bei niedrigen Messfrequenzen. Da in diesem Fall selbst kleine Niveaufehler oder geringfügiges Datenrauschen sowie magnetische Effekte, die ebenfalls die I -Komponente verringern, das Komponentenverhältnis ε massiv beeinträchtigen kön-

nen und somit zu stark variierenden Halbraumparameter hervorrufen, empfiehlt es sich, bei kleinen In-phase-Messwerten ($I \ll Q$, „low induction mode“ = LIM) den scheinbaren spezifischen Widerstand nur aus der Q-Komponente zu berechnen (Sengpiel & Siemon, 2005):

$$\rho_{LIM} = 0,2 r^3 p^2 f (4h^2 + r^2)^{-1/2} / Q$$

und als Grenzwiderstand zu verwenden. Allerdings geht hierbei die Höhenmessung direkt ein.

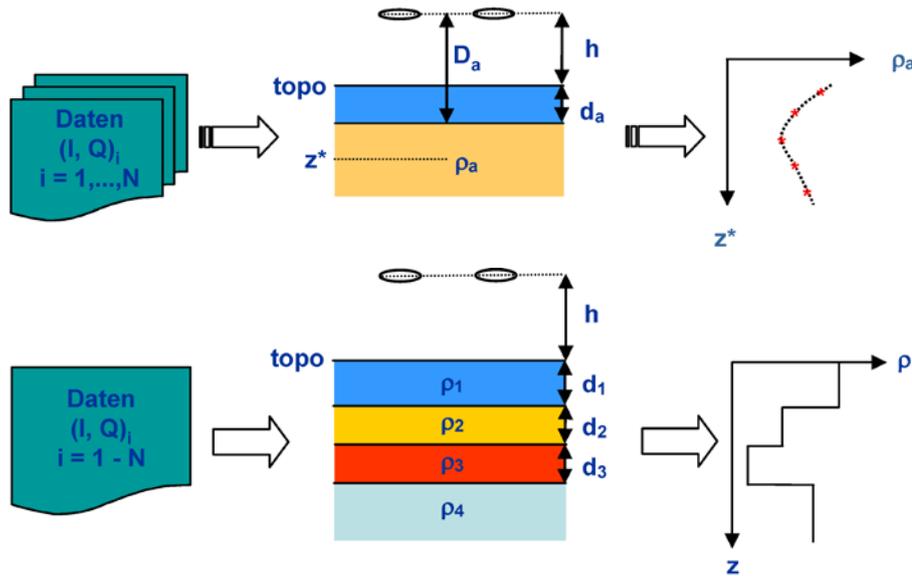


Abbildung 4. Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen (oben) und geschichteten (unten) Halbräumen

5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten

Die Sekundärfelder enthalten in dicht besiedelten Gebieten neben dem geogenen Anteil oft auch anthropogene Anteile, die von Bebauungen und elektrischen Installationen wie z. B. Elektrokabel, Metallzäunen und Eisenbahnschienen herrühren können. Oft sind diese Einflüsse auf die HEM-Daten gering und können mit der Standarddatenverarbeitung weitgehend eliminiert werden. In einigen Fällen, wie beispielsweise bei Ortschaften oder großen Bauwerken mit einem hohen Metallanteil, ist der anthropogene Anteil in den HEM-Daten nicht mehr vernachlässigbar. In der Nähe von Hochspannungsleitungen, elektrifizierten Eisenbahnlinien oder Ortschaften können außerdem externe elektromagnetische Felder vorkommen, die die HEM-Messungen empfindlich stören können. Dies ist insbesondere bei den niedrigen Messfrequenzen zu beobachten, da dort der geogene Anteil des Sekundärfeldes deutlich kleiner ist als bei den höheren Messfrequenzen, sodass der anthropogene Anteil, der oft nur eine geringe Frequenzabhängigkeit aufweist, überwiegen kann (Siemon et al., 2011).

Der anthropogene Einfluss wirkt sich durch eine Verringerung des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunkttiefe aus. In den Karten, die die unkorrigierten Halbraumparameter zeigen (wie z. B. im Zwischenbericht, Siemon et al., 2014), ist daher oft eine Korrelation von niedrigen Halbraumwiderständen bzw. geringeren Schwerpunkttiefen mit Ortschaften oder Straßen zu beobachten, die vor allem in den Karten der niedrigen Frequenzen auftreten.

Die Entfernung der anthropogen betroffenen Bereiche erfolgte rein manuell. Mit Hilfe von topografischen Karten und Google Maps wurden Hochspannungsleitungen, Straßen und Ortschaften identifiziert und entsprechende Bereiche in den Daten gelöscht. Die dadurch entstandenen Datenlücken wurden durch das flächenhafte Interpolieren der Halbraumparameter größtenteils geschlossen.

Die Erkennung von anthropogen beeinflussten HEM-Daten ist ferner durch deren typische Form oder durch Korrelation mit den Magnetikdaten möglich. Die genaue Identifizierung aller typischen Effekte war im Messgebiet Geyer nicht möglich. Daher war eine Ortsbegehung notwendig, um die Ursache für zahlreiche Anomalien mit z. T. recht hohen Amplituden, für die es zunächst keine Erklärung gab, zu suchen. Als Ursachen hierfür stellten sich Schonungszäune heraus, die mit etwa 2 m hohem Maschendraht und Kantenlängen in der Größenordnung von etwa 100 m nahezu ideal – wie eine Spule – an das HEM-System ankoppelten. Es konnten jedoch wegen der Vielzahl derartiger Anomalien nicht alle Ursachen vor Ort geklärt werden, sodass viele Anomalien aufgrund ihrer Signalform als anthropogen verursacht eingestuft und aus den HEM-Daten entfernt worden sind. Insgesamt musste mehr als die Hälfte der HEM-Daten im Aufsuchungsgebiet entfernt und, sofern möglich, interpoliert werden. Diese Bereiche sind auf den Ergebniskarten (siehe **Kapitel 6.3**) markiert.

5.3.6. Statistische Niveauanpassung

Im Allgemeinen ist die herkömmliche Niveauanpassung (nach **Kapitel 5.3.2**) nicht ausreichend, da aufgrund der Überfliegung von Ortschaften, Hochspannungsleitungen, Radarstationen und Wäldern barometrische Höhenänderungen und folglich auch spürbare Temperaturschwankungen auf das Messsystem und somit auf das Nullniveau einwirkten. Im Messgebiet Geyer änderten sich zudem noch die Geländehöhen gewaltig, sodass die Höhe der Flugsonde um bis zu mehrere Hundert Meter variierte.

Die Nivellierung der logarithmierten Halbraumwiderstände und der Differenzen der scheinbaren Tiefen parallel zu den Messprofilen (*Microlevelling*) wird mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft vorgenommen.

Das Microlevelling basiert auf dem Gitter der Messprofilaten, in welchem Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpass-Filters (Grenzwellenlänge 600 m, Ordnung 8) und eines direktionalen Kosinus-Filters (Azimut $-40,5^\circ$, Grad 2) identifiziert werden. Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Niveaufehlerwerte liefert. Die abgetasteten Fehlerwerte werden mit einem Spline-Filter (Glätte 0,7, Spannung 0,5) geglättet und dann von den ursprünglichen Halbraumparametern abgezogen.

Die Kontrollprofile werden nivelliert, indem die mit einem Spline-Filter (Glätte 0,7, Spannung 0,5) geglätteten Differenzen aus den entlang der Kontrollprofile abgetasteten Halbraumparametern der Messprofile und den Halbraumparametern der Kontrollprofile von Letzteren abgezogen werden.

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

Abschließend werden beim I-Q-Levelling die variablen Korrekturwerte für jedes Mess- und Kontrollprofilprofil aus den stark geglätteten Differenzen der originären HEM-Daten (I und Q) und der aus

den nivellierten Halbraumparametern rückgerechneten HEM-Daten (I_c und Q_c) abgeleitet (Siemon, 2009). Hierzu werden Bereiche ausgewählt, in denen die Datenfehler (I_{noise} und Q_{noise}) klein genug sind. Auch die anthropogen beeinflussten Bereiche werden entfernt. Diese verbliebenen Differenzen ($\Delta I = I - I_c$ und $\Delta Q = Q - Q_c$) werden nicht-linear gefiltert, geglättet und von den originären HEM-Daten (I und Q) abgezogen. Die Filterparameter für die Bereichsauswahl und Glättung sind in **Tabelle 15** aufgelistet.

Tabelle 15. Filterparameter für die HEM-Niveauekorrektur

Filter	Filterparameters	Bezugsparameter
Schwellwert	Schwellwert: 80 m	($h_{I_{kor}}$)
Schwellwert	Schwellwerte (I/Q): 0,05-0,30 / 0,01-0,10	(I_{noise} , Q_{noise})
Nicht-linear	Filterlänge: 10 Werte (≈ 40 m), Toleranz: 1,0-5,0	ΔI , ΔQ
Spline	Glätte: 0,75-0,90; Spannung: 0,2	ΔI , ΔQ

Die Halbraumparameter der Flüge aus der ersten Messkampagne, die mit der Flugsonde BKS36a durchgeführt wurde, wurden in das Microlevelling einbezogen und wie die Halbraumparameter der Kontrollprofile aus der zweiten Messkampagne, die mit der Flugsonde BKS60 durchgeführt wurde, behandelt. Beim I-Q-Levelling wurden schließlich nur die Systemparameter der Flugsonde BKS60 verwendet, um die synthetischen Daten (I_c und Q_c) zu berechnen, sodass sich alle bearbeiteten HEM-Daten auf dieses HEM-System (**Tabelle 4b**) beziehen. Mit diesem Verfahren war es auch möglich, fehlende HEM-Daten zu ersetzen.

5.3.7. Dateninterpolation und -glättung

Die Lücken in den HEM-Daten, die durch die Eliminierung von Daten, deren relative Rauschniveaus über einem Schwellwert lagen bzw. durch die Berücksichtigung der anthropogenen Effekte entstanden sind, werden durch flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter mit nachfolgender Neuberechnung der relativen Sekundärfelder geschlossen. Die relativen Rauschniveaus werden jeweils aus 30 benachbarten Werten bestimmt und auf die (Modell-) Amplituden normiert. Abschließend werden die korrigierten Daten analog zu **Kapitel 5.3.3** gefiltert, aber evtl. mit leicht modifizierten Filterparametern. Insbesondere werden die Daten nicht mehr mit einem Tiefpass-Filter, sondern mit einem Spline-Filter (Glätte 0,6-0,7, Spannung 0,5) geglättet. Somit liegen als finale Daten, die in die Inversion (vgl. **Kapitel 5.3.8**) eingehen, korrigierte (nivellierte, interpolierte und geglättete) Messwerte an den Messpunkten für jede Messfrequenz vor.

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

5.3.8. 1D-Inversion der HEM-Daten

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

Für die Inversion der HEM-Daten im Messgebiet Geyer wurden nivellierte Daten (vgl. **Kapitel 5.3.6**) und ein Startmodell mit 6 bzw. 20 Schichten ansteigender Mächtigkeiten inklusive einer variabel mächtigen Deckschicht verwendet. Mit dem Modell mit wenigen Schichten können Schichtgrenzen schärfer abgebildet werden, was bei einem geschichteten Untergrund von Vorteil ist. Allerdings können sich bei diesem Ansatz auch Artefakte deutlicher bemerkbar machen, die insbesondere auftreten können, wenn der Untergrund nicht lateral geschichtet ist (3D-Effekte) oder frequenzabhängige Datenfehler existieren (unzureichende Kalibrierung). Bei der Inversion auf der Basis von vielen Schichten, bei der die Schichtmächtigkeiten (bis auf die Deckschichtmächtigkeit) festgehalten werden, erscheinen die Modell in vertikale Richtung geglättet. Der Grad der Glättung ist einstellbar durch die Stärke der Regularisierung. 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 Frequenzen horizontal-koplanare Systeme verwenden, die empfindlich für die lateralen Leitfähigkeitsstrukturen sind, wurden für die Inversion nicht benutzt.

Im Messgebiet Geyer sind viele Datenbereiche aufgrund der anthropogenen Störungen interpoliert worden. Die Inversionsergebnisse in diesen Bereichen sind daher mit Vorsicht zu betrachten. Des Weiteren sind die Amplituden der niedrigen Frequenzen oft sehr klein, da der Untergrund in weiten Bereichen sehr hohe spezifische Widerstände aufweist. Daher können auch sehr kleine Niveauunterschiede in den Daten eine große Wirkung haben und zu unsicheren Werten, insbesondere für die unterste Modellschicht, führen. Modellstudien zeigten, dass die Halbraumwiderstände bei der niedrigsten Messfrequenz (380 Hz) offenbar häufig zu klein waren. Daher wurden in den Startmodellen diese Halbraumwiderstände um einen Faktor zwei vergrößert.

5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten (siehe **Anhang IV**) und Vertikalschnitte (siehe **Anhang V**) präsentiert. Karten (vgl. **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 und die spezifischen Widerstände ρ (in Ωm) in acht Tiefen (5–200 m unter Gelände), abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen, produziert.

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

In den Tiefenschnitten ab 120 m unter NHN treten in Bereichen hoher Leitfähigkeit Lücken in den Widerstandskarten auf, da dort aufgrund der geringen Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder keine verlässlichen Informationen über die Höhe des spezifischen Widerstandes abgeleitet werden konnten. Graue Linien markieren die Bereiche mit Lücken im Modell, die im Gitter interpoliert wurden. Die weißen Punkte markieren wieder Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind. Diese Punkte sind umso dicker, je mehr Frequenzen betroffen sind.

Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:50.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:5.000 wurden basierend auf den 1D-Inversionsergebnissen von jedem der 189 Messprofile und der 14 Kontrollprofile hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen Modellen mit 20 Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topografischen Höhe längs eines Profils nebeneinandergestellt werden. Die Mächtigkeit der untersten Schicht (Substratum) wurde auf 5 m festgelegt. Bei geringen Widerstandskontrasten verschwindet die Bedeutung der Schichtgrenzen, sodass Schichtmächtigkeiten auch zu groß oder verschwindend klein werden können. Bei den hier gezeigten Modellen mit 20 Schichten sind die Schichtmächtigkeiten (bis auf die Deckschicht) jedoch festgehalten worden. Über den Modellen sind zusätzlich die Höhe der Flugsonde, der Anpassungsfehler der Inversion, die Interpolationsbereiche und die Messdaten dargestellt, die in einer Legende erklärt werden. Im **Anhang V** sind die Vertikalschnitte mit 20 Schichten dargestellt, die auch auf der DVD abgelegt sind.

5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik

5.4.1. Magnetisches Totalfeld

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

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

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

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 „International Geomagnetic Reference Field“ (IGRF) verwendet, mit dem für jeden Punkt auf und oberhalb der Erdoberfläche und für einen bestimmten Zeitpunkt ein Feldwert berechnet werden kann. Das aktuell gültige Modell IGRF-11 aus dem Jahr 2010 (IAGA, 2010) diente zur Berechnung des magnetischen Hauptfeldes an jedem Messpunkt zur entsprechenden Messzeit.

5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen

Referenzstationen zur Erfassung der magnetischen Tagesvariationen $\Delta V(t)$ befanden sich auf dem Flugplatz Chemnitz-Jahnsdorf sowie zusätzlich (zeitweise) auf einem Bergrücken in der Nähe des Flugplatzes. $\Delta V(t)$ ergibt sich aus dem Messwert der Bodenstation abzüglich des IGRF-Feldes am Ort der Bodenstation und zum Zeitpunkt der Messung. Kurzzeitige Störeinflüsse in den Daten der Bodenstation könnten durch die Anwendung eines Tiefpass-Filters beseitigt werden.

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 (Kreuzungspunktstatistik). Die gemittelten Werte definieren demzufolge die Niveauunterschiede zwischen den Flügen und stellen somit gleichzeitig 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, meist geringe Niveauunterschiede können, abhängig von der Flugrichtung, von dem Eigenfeld des Hubschraubers hervorgerufen werden (*heading error*). Diese Unterschiede minimieren sich durch das nachfolgende Microlevelling deutlich. Das Microlevelling basiert auf dem Gitter der Messprofilaten, in welchem Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpass-Filters (Grenzwellenlänge 1600 m, Ordnung 4) und eines direktionalen Kosinus-Filters (Azimut -40° , Grad 1) identifiziert werden. Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, welches durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Fehlerwerte liefert. Diese werden wiederum mit einem Spline-Filter (Glättung 0,95, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den bis dahin nur mittels der Kreuzungspunktstatistik korrigierten Daten abgezogen. Das daraus resultierende ΔT -Gitter weist praktisch keine Niveaufehler mehr auf. Abschließend erfolgt auch die Berechnung der Abweichungen der Kontrollprofilaten von den aus dem niveaueingeglätteten Gitter entlang der Kontrollprofile abgetasteten Daten. Diese Fehlerwerte werden ebenfalls mit einem Spline-Filter (Glättung 0,95, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den Kontrollprofilaten abgezogen.

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

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

5.4.5. Präsentation der Magnetikergebnisse

Die Kartendarstellungen der Magnetfeldanomalien sind in **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:

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

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

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

5.5.1. Energiekalibrierung

Da die automatische Verstärkungsstabilisierung von Gammaskpektrometern infolge von Temperaturveränderungen nicht immer optimal funktioniert, kann die Energie-Kanal-Zuordnung während eines Fluges leicht driften. Es wird daher nachträglich eine Energiekalibrierung der aufgezeichneten Spektren durchgeführt. Dazu wird für jeden Messpunkt ein mittleres Spektrum einer großen Zahl benachbarter Spektren berechnet. Im mittleren Spektrum werden jeweils die Kanalpositionen der Zentren der Kalium- und Thoriumspitzen bestimmt. Danach wird die Kanalzuordnung sämtlicher Spektren so modifiziert, dass die Zentren der Spitzen (*peaks*) genau auf den durch IAEA vorgegebenen Sollwerten (**Tabelle 6**) liegen.

5.5.2. Verminderung des Rauschens

Aufgrund des relativ großen Abstandes zwischen den Quellen der radioaktiven Strahlung an der Erdoberfläche und dem Strahlungsdetektor im Hubschrauber sind die Zählraten in der Aerogamma-spektrometrie allgemein gering. Dies führt dazu, dass die aufgenommenen Gammaskpektren, und damit auch die daraus ermittelten Radionuklidgehalte, starkes statistisches Rauschen aufweisen. In der Datenaufbereitung kommt daher ein von Hovgaard & Grasty (1997) entwickeltes Verfahren zur Reduktion des Rauschens zur Anwendung. Das NASVD-Verfahren (*Noise Adjusted Singular Value Decomposition*) basiert auf einer statistischen Analyse sämtlicher Spektren eines Messgebietes und einer Rekonstruktion der Spektren mit vermindertem Rauschen. „*Noise Adjusted*“ bedeutet, dass die Spektren zunächst einer kanalspezifischen, varianzabhängigen Skalierung unterzogen werden, damit eine gleichmäßige Wichtung über das gesamte betrachtete Spektrum vorherrscht. Die Grundlage für diese Skalierung bildet ein *a priori*-Modell des Rauschens, welches die Varianz für jeden Kanal liefert. Durch das Zusammenführen der skalierten Spektren entsteht eine Matrix, für die anschließend eine Singulärwertzerlegung (*singular value decomposition*) erfolgt. Die dabei ermittelten Hauptkomponenten werden entsprechend der Größe des Eigenwertes, d. h. entsprechend der Stärke ihres Einflusses auf die Kurvenform der skalierten Spektren, sortiert. Da das Nutzsignal zwischen den Kanälen für Uran, Thorium und Kalium korreliert, basieren die Hauptkomponenten geringer Ordnung in erster Linie auf den geogenen Daten und sind damit maßgeblich für die Kurvenform der Spektren verantwortlich. Die unkorrelierten Signale des statistischen Rauschens spiegeln sich dagegen gleichmäßig

in allen Hauptkomponenten wider. Um das Rauschen zu minimieren, werden für die Rekonstruktion der Spektren nur die Hauptkomponenten verwendet, die die Nutzsignale enthalten. Die Rekonstruktion erfolgt demnach durch die Linearkombination der ersten sechs Hauptkomponenten. Als Ergebnis erhält man geglättete Spektren, aus denen die Zählraten der drei interessierenden Energiefenster (vgl. **Tabelle 6**) neu bestimmt werden.

Während dieses Verarbeitungsschrittes erfolgt auch eine Begrenzung auf eine maximale Flughöhe: Alle Daten, die bei einer Flughöhe über Grund von mehr als 130 m aufgenommen wurden, werden auf Grund ihrer geringen Signalstärke und damit verbundenem starken Rauschen verworfen.

5.5.3. Effektive Höhe

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

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

mit:

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

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

5.5.4. Registrierzeitkorrektur

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

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

mit:

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

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

5.5.5. Hintergrundstrahlung

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

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

mit:

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

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

Tabelle 16. Korrekturfaktoren der Hintergrundstrahlung.

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

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 wird 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. Soll ein Spektrometer, welches mit einem nach oben gerichteten Detektor ausgestattet ist zur Radonkorrektur verwendet werden, so sind zunächst eine Reihe von Kalibrierwerten zu bestimmen: Zunächst müssen die Relationen der Zählraten zwischen nach oben und nach unten gerichtetem Detektor für das Uranfenster bei Uranquellen am Boden und ohne Vorhandensein von atmosphärischem Radon bestimmt werden. Die Zählrate im Uranfenster des nach oben gerichteten Detektors u_G lässt sich darstellen als Linearkombination der Zählraten im Uran- (U_G) und Thoriumfenster (Th_G) des nach unten gerichteten Detektors (die Zählraten sind jeweils hintergrundkorrigiert, vgl. Kapitel 5.5.5):

$$u_G = a_1 \cdot U_G + a_2 \cdot Th_G$$

Die beiden Konstanten a_1 und a_2 können über eine statistische Analyse einer großen Zahl vorhandenen Messdaten und nachfolgender Lösung eines zweidimensionalen linearen Gleichungssystems nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen ermittelt werden (IAEA, 1991):

$$\begin{aligned} a_1 \cdot \Sigma(U_G)^2 + a_2 \cdot \Sigma(U_G \cdot Th_G) &= \Sigma(u_G \cdot U_G) \\ a_1 \cdot \Sigma(U_G \cdot Th_G) + a_2 \cdot \Sigma(Th_G)^2 &= \Sigma(u_G \cdot Th_G) \end{aligned}$$

Die in die Berechnungen einfließenden Daten sind jedoch stets mit einem noch unbekanntem, in diesem Zusammenhang als Radonhintergrund bezeichneten Anteil behaftet, der die Bestimmung von a_1 und a_2 verfälscht. Es wurde daher ein heuristischer Ansatz verfolgt, um plausible Werte für a_1 und a_2 zu ermitteln. Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass die Werte der beiden Faktoren bei steigendem Radonhintergrund ebenfalls ansteigen. Diese Annahme ist gerechtfertigt, weil der nach oben gerichtete Detektor auf atmosphärisches Radon im Verhältnis stärker reagiert als auf Uran am Boden. Ein Datensatz von insgesamt 35 Flügen aus vier verschiedenen Messgebieten in Deutschland wurde dazu verwendet, nach den oben angegebenen Formeln Werte für a_1 und a_2 zu bestimmen. Es

war bekannt, dass der Radonhintergrund von Flug zu Flug mehr oder weniger stark schwankt. Nach Aussortieren der Flüge, bei denen die a_1 und a_2 Werte statistisch zu schwach belegt waren, wurde aus dem verbleibenden Datensatz derjenige Flug herausgesucht, der den geringsten Wert für a_1 aufweist. Der Proportionalitätsfaktor a_1 ist im Vergleich zu a_2 statistisch deutlich stabiler, da das Thoriumspektrum nur wenig in das Uranfenster einstrahlt. Die Werte a_1 und a_2 des gewählten Fluges wurden als repräsentativ für Verhältnisse mit minimalem Radongehalt in der Luft angesehen und im Folgenden als Kalibrierwerte verwendet. Es sei darauf verwiesen, dass in IAEA (1991) ein Verfahren beschrieben ist, mit dem der Radonhintergrund durch Subtraktion aufeinanderfolgender Datensektionen aus den Daten entfernt werden kann. Dieser Ansatz erbrachte weniger plausible Ergebnisse als der hier beschriebene heuristische Ansatz.

Des Weiteren müssen die Verhältnisse solcher Zählraten untersucht werden, die ausschließlich durch atmosphärisches Radon ohne Einfluss von Strahlung vom Boden hervorgerufen werden. Dazu sind eine Reihe von Messflügen über ausgedehnten Wasserflächen, landfern (>500 Meter) und bei möglichst stark variierenden Radongehalten der Luft erforderlich. Die ausschließlich durch Radon hervorgerufenen Zählraten der Kanäle u_R (Uran im nach oben gerichteten Detektor) und K_R , Th_R und TC_R (Kalium, Thorium und Gesamtzählrate im nach unten gerichteten Detektor) sind durch folgende Beziehungen mit der (ebenfalls durch Radon hervorgerufenen) Zählrate U_R (Uran im nach unten gerichteten Detektor) verknüpft (IAEA, 1991):

$$u_R = a_U \cdot U_R$$

$$Th_R = a_{Th} \cdot U_R$$

$$K_R = a_K \cdot U_R$$

$$TC_R = a_{TC} \cdot U_R$$

Die Kalibrierungsfaktoren a_U , a_K , a_{Th} und a_{TC} werden bestimmt durch lineare Regression der für jeweils einen Flug gemittelten hintergrundkorrigierten Zählraten. Die Radonkomponente U_R kann dann nach folgender Formel berechnet werden:

$$U_R = (u - a_1 \cdot U - a_2 \cdot Th) / (a_U - a_1 - a_2 \cdot a_{Th})$$

und die Korrekturen schließlich nach folgenden Beziehungen angebracht werden:

$$U_{COR} = U - U_R$$

$$K_{COR} = K - a_K \cdot U_R$$

$$TC_{COR} = TC - a_{TC} \cdot U_R$$

mit:

U_R = Radonkomponente,

u = Zählrate im Uranfenster des nach oben gerichteten Detektors, hintergrundkorrigiert,

U = Zählrate im Uranfenster des nach unten gerichteten Detektors, hintergrundkorrigiert,

Th = Zählrate im Thoriumfenster des nach unten gerichteten Detektors, hintergrundkorrigiert,

K = Zählrate im Kaliumfenster des nach unten gerichteten Detektors, hintergrundkorrigiert,

TC = Gesamtzählrate des nach unten gerichteten Detektors, hintergrundkorrigiert,

U_{COR} = korrigierte Zählrate Uran,

K_{COR} = korrigierte Zählrate Kalium,

TC_{COR} = korrigierte Gesamtzählrate.

Diese Art der Bestimmung der Kalibrierfaktoren a_U , a_{Th} , a_K und a_{TC} erfordert, wie oben beschrieben, Datensätze von landfernen Flügen über Wasser mit jeweils variierendem Radonhintergrund. Dabei ist zu beachten, dass jeder Flug nur einen Datenpunkt für die Regressionsanalyse liefert. Es sind also Datensätze einer Vielzahl von Flügen über Wasser erforderlich, um statistisch ausreichend abgesicherte Werte zu erhalten. Zudem kommen als Wasserflächen vorzugsweise nur ausgedehnte Seen infrage, da hier die Wahrscheinlichkeit von signifikantem Gehalt von Radon in der Luft deutlich höher ist als für Bereiche über dem offenen Meer. In der Praxis kann eine ausreichende Anzahl solcher geeigneter Datensätze nur während eines langjährigen Flugbetriebes gesammelt werden. Für das von der BGR verwendete Spektrometer ist das noch nicht der Fall. Die oben genannten Kalibrierfaktoren wurden daher heuristisch bestimmt.

Grundlage hierfür waren Datensätze einer Vielzahl von Messgebieten in Deutschland und den Niederlanden, deren Befliegungen während mehrerer Tage stattgefunden haben. Es war bekannt, dass die Datensätze eine große Bandbreite in Bezug auf den jeweiligen Radonhintergrund aufweisen. Unterschiede im Radonhintergrund werden in Kartendarstellungen, insbesondere der Zählrate im Urkanal, als streifenförmige Niveauunterschiede sichtbar. Zunächst wurde eine heuristische Bestimmung der Faktoren a_U und a_{Th} vorgenommen, da diese zusammen mit den bereits ermittelten Faktoren a_1 und a_2 den Wert der Radonkomponente U_R bestimmen. Ausgehend von Werten aus der Literatur wurden a_U und a_{Th} solange variiert und justiert, bis in den Kartendarstellungen von U_{COR} aller betrachteten Messgebiete die oben beschriebenen Niveauunterschiede minimal waren. Mit der nun verlässlich bestimmten Radonkomponente U_R konnten in einem weiteren Schritt auf ähnliche Weise, ebenfalls durch Minimierung von Streifenartefakten in den K_{COR} - und TC_{COR} -Karten, Werte für a_K und a_{TC} bestimmt werden. In **Tabelle 17** sind die so ermittelten Korrekturfaktoren aufgelistet.

Tabelle 17. Konstanten für die Radonkorrektur.

Konstante	Wert
a_1	0,091
a_2	0,0023
a_U	0,3
a_{Th}	0,1
a_K	1,0
a_{TC}	18,0

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.

Die Ausführungen in diesem Kapitel machen deutlich, dass eine exakte Bestimmung der zur Radonkorrektur mit der Methode des nach oben gerichteten Detektors benötigten Kalibrierkonstanten kaum möglich ist. Zudem ist zu beachten, dass die Grundannahme bei dieser Methode, nämlich die gleichmäßige Durchmischung des Radons in der Luft oberhalb und unterhalb des Messsystems in der Praxis nicht immer zutrifft. Dass die Methode und die hier beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Kalibrierkonstanten dennoch zu schlüssigen Ergebnissen führt, ist in Ibs-von Seht et al. (2015) gezeigt.

5.5.7. Compton-Streuung

Der Compton-Effekt beschreibt die Wechselwirkung von Gammaquanten mit Elektronen der äußeren Atomschale beim Durchgang durch Materie. Ein Teil der Energie der Gammaquanten wird auf diese sogenannten Compton-Elektronen übertragen und die Gammaquanten selbst werden gestreut. Praktisch hat dies zur Folge, dass ein bestimmter Anteil z. B. von der ursprünglichen Thoriumstrahlung in den niedrigeren Energiebereichen des Uran- und Kaliumfensters enthalten ist. Ebenso streuen Urananteile in den Kaliumkanal. Der umgekehrte Effekt, d. h. die Einstreuung in höhere Energiekanäle, existiert auch, ist aber deutlich geringer. Die Koeffizienten der Einstreuratzen (*stripping ratios*) wurden 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)
K	0,01255
U	0,00667
Th	0,00982
TC	0,00983

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. Eine Korrektur des Vegetationseinflusses ist unter der Annahme möglich, dass die Absorption exponentiell mit der Höhe der Vegetation zunimmt:

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

mit:

- C_0 = Elementgehalt am Boden,
- C_D = Elementgehalt, beeinflusst von der Vegetation,
- D = Vegetationshöhe,
- μ_V = linearer Abschwächungskoeffizient der Vegetation.

Die Werte der Vegetationshöhe wurden aus den Daten des Laserhöhenmessers ermittelt. Der Laserhöhenmesser erfasst den Abstand zwischen Hubschrauber und Geländeoberfläche in schneller Folge (10 Messungen pro Sekunde). Beim Überfliegen von nicht zu dichten Waldgebieten kommt es im Datenstrom zu einer Abfolge von Werten, die sich aus Reflexionen an der oberen Waldgrenze (Blätterdach) und der Erdoberfläche ergeben. Für solche Bereiche werden die unteren und oberen Einhüllenden der Laserdaten gebildet. Die Differenz der beiden Einhüllenden ergibt dann in guter Näherung die Höhe der Vegetationsbedeckung. Bei sehr dichtem Wald treffen nur wenige Laserstrahlen durch das Blattwerk und die Vegetationshöhen müssen manuell nachbearbeitet werden.

Da das am Detektor empfangene Signal nicht nur durch die Vegetationsbedeckung unmittelbar unterhalb des Detektors beeinflusst wird, wurden die Baumhöhendaten mit einem Filter auf Gitterebene bearbeitet. Der Filter bildet für jeden Gitterpunkt durch abstandsabhängig gewichtete Mittelung der Baumhöhen der Umgebung eine mittlere, effektive Vegetationshöhe. Die Werte für die linearen Abschwächungskoeffizienten μ_V (**Tabelle 21**) wurden empirisch ermittelt. Das Gitter der effektiven Vegetationshöhe wird dann mit den ebenfalls in Gitterform repräsentierten Daten der Elementgehalte bzw. der Gesamtstrahlung verrechnet.

Bei der beschriebenen Vegetationskorrektur ist zu beachten, dass die so für Waldgebiete ermittelten korrigierten Elementgehalte größeren Ungenauigkeiten unterworfen sein können. Die Ursachen hierfür liegen zum einen an den nur näherungsweise bestimmbar und naturgemäß variierenden Abschwächungskoeffizienten. Zum anderen sind die Zählraten über Waldgebieten vergleichsweise niedrig und weisen daher auch höheres statistisches Rauschen auf. Dieses Rauschen wird durch die Korrektur verstärkt.

Tabelle 21. Lineare Abschwächungskoeffizienten μ_v der Vegetation

Element	μ_v
K	0,011
U	0,010
Th	0,010
TC	0,010

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

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

mit:

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

5.5.10. Filterung und statistische Niveaueinpassung

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

Die so kontrollierten Messdaten 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 zwei weitere Bearbeitungsschritte auf die Daten angewendet: Anwendung eines Tiefpass-Filters auf die Daten nach Berechnung der Radionuklidgehalte im Boden und Niveaueinpassung durch Microlevelling nach der Vegetationskorrektur.

Der Tiefpass-Filter schwächt Variationen in den Daten ab, deren Wellenlänge kürzer als die Filterbreite ist. Dadurch wird hochfrequentes Datenrauschen vermindert. Die Breite des Filters betrug drei Datenpunkte entsprechend etwa 120 m.

Für das Microlevelling wird zunächst durch Anwendung verschiedener Filter (Butterworth-Hochpass-Filter (Grenzwellenlänge 400 m, Ordnung 8) und direktionalen Kosinus-Filter (Azimut $-40,5^\circ$, Grad 0.5)) auf die Gitter der jeweiligen Ausgangsdaten (alle Profile) ein Gitter erzeugt, welches nur noch Niveauunterschiede zwischen benachbarten Messprofilen in stark geglätteter Form enthält (*error grid*). Dieses Gitter wird von dem Gitter der jeweiligen Ausgangsdaten abgezogen. Die resultierenden Gitter enthalten praktisch keine sichtbaren Niveauunterschiede mehr und die geogenbedingten Strukturen bleiben erhalten. Sie werden in einem letzten Schritt entlang der Fluglinien abgetastet und die abgetasteten Werte weiter verwendet.

5.5.11. Präsentation der Ergebnisse

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

6. Kartografische Arbeiten

6.1. Topografische Karten 1:50.000

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

Tabelle 22: Eckpunktkoordinaten (ERTS89, UTM Zone 33N) des Blattschnittes Geyer

Karteneckpunkt	ERTS89-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
NW	341000	5620000
NO	361000	5620000
SW	341000	5600000
SO	361000	5600000

Die Ergebniskarten 1:50.000 basieren auf Rasterdaten der DTK50-V. Für die Topografische Karte für das Messgebiet Geyer kamen die Rasterdatenkacheln z2_26_26, z2_26_27, z2_27_26, z2_27_27, zur Verwendung. Herausgeber ist das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software

Für die Herstellung der geophysikalisch-thematischen Karten und der ihnen zugrunde liegenden Gitter wird das Softwarepaket Oasis montaj 7.3 von Geosoft verwendet. **Tabelle 23** zeigt die Gitterparameter, die im Messgebiet Geyer verwendet wurden. Für jeden Ergebnisparameter wurden 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. Ferner sind die durch elektrische Installationen beeinflussten Bereiche grau (transparent) überdeckt (nur für HEM-Karten). Die Zusammenstellung von Geophysik, Topografie und Legendeninformationen erfolgt mit dem Programm ArcGIS 10.2 von ESRI. Hierfür wurde u. a. das Geosoft Plug-in für ArcGIS verwendet, um die Geosoft-Daten importieren zu können. Die Erstellung von PDF-Dokumenten wird mit Adobe Acrobat vorgenommen.

Tabelle 23: Gitterparameter

Parameter	Wert
Methode zur Flächeninterpolation	minimale Krümmung
Gitterzellengröße [m]	25
Extrapolationsbereich [m]	50
Suchradius [m]	50
Zellen außerhalb der Datenpunkte	15
Spannung	0,5
Log-Option	linear, (außer: $\log \rho$, $\log z^*$)

6.3. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Geyer wurden 27 geophysikalische Ergebniskarten sowie ein digitales Höhenmodell jeweils mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:50.000 hergestellt (siehe Kartenverzeichnis und **Anhang IV**). Alle Karten sind mit einer ausführlichen Legende versehen, die Auskunft über das Messgebiet, die Kartengrundlagen, die Skalierung, den dargestellten Parameter und die beteiligten Institutionen und Personen gibt.

Ferner wurde im Maßstab 1:50.000 eine Fluglinienkarte produziert, die die Lage der Messprofile auf der Grundlage der topografischen Karten zeigen. Die Fluglinien sind mit Liniennummern versehen, die am Anfang eines Profils in Fluglinienrichtung geplottet sind. Die Positionen der Zeitmarken sind durch kurze bzw. lange Querstriche „|“ gekennzeichnet, d. h. entsprechend jede 10. oder 100. Zeitmarke. Jede 500. Zeitmarke ist mit der dazugehörigen Zeitmarkennummer (Record) in Fluglinienrichtung beschriftet. Die Fluglinienkarten gestatten eine schnelle Zuordnung der Daten von Profilen und Vertikalsektionen zur Position im Messgebiet.

7. Archivierung

Alle Daten und Plots wurden auf DVD gespeichert und im Fachbereich „B2.1 – Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie“ archiviert. Darüber hinaus sind die Ergebnisdaten als ASCII-codierte Profildaten im Geosoft-xyz-Format und die Endergebnisse (Bericht, Karten und Vertikalsektionen) als PDF-Dokumente im Originalmaßstab auf einer DVD (**Tabelle 24** und **Anhang III**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Die ArcGIS-Projekte beinhalten die Kartendarstellung als mxd-Daten für ArcGIS 10.2 inklusive der Legendenteile (Import als bmp) und der Rasterdaten DTK50-V (Datenformat GRID, Typ Integer, mit Color File, Auflösung 200 Pixel/cm [508 dpi]).

Tabelle 24: Inhalt der DVD

Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Bericht		Technischer Bericht (PDF) (Acrobat Reader unter http://get.adobe.com/de/reader/)
\Daten...	\HEM	ASCII-Datei der Rohdaten (HEM146_RAW.xyz) ASCII-Datei der bearbeiteten Daten (HEM146_DAT.xyz) ASCII-Datei der abgeleiteten Parameter (HEM146_APP.xyz) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM146_INV.xyz)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Bodenstationsdaten etc. (HMG146.xyz)
	\HRD	ASCII-Datei der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Ionendosisleistung etc. (HRD146.xyz)
\Karten...	\Fluglinien	PDF-Karte 1:50.000 des Flugweges mit Topografie
	\DEM	PDF-Karte 1:50.000 des Digitalen Höhenmodells
	\HEM	PDF-Karten 1:50.000 der Halbraumwiderstände und Schwerpunktstiefen für die Frequenzen 380, 1.773, 5.410, 8.300, 41.000 und 129.500 Hz sowie der spezifischen Widerstände bei 5, 15, 25, 40, 60, 100, 140 und 200 m unter GOK
	\HMG	PDF-Karten 1:50.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT mit und ohne anthropogene Effekte
	\HRD	PDF-Karten 1:50.000 der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Ionendosisleistung
	\ArcGIS	Kartenprojekte für ArcGIS 10.2 (*.mxd) inklusive Legenden (*.bmp) und Rasterdaten DTK50-V (GRID)
\VRS	PDF-Vertikalschnitte des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnisse mit 20 Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:50.000 und Vertikalmaßstab 1:5.000	

8. Literatur

- Anderson, W.L., 1989. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling. *Geophysics* 54, 263–266.
- BGR, 2013. Pilotstudie zur Erkundung eines möglichen Erzvorkommens im Randbereich des nördlichen Erzgebirges. Projektseite auf BGR-Homepage:
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geophysik/Aerogeophysik/Projekte/laufend/ErzExplora/ErzExplora.html?nn=1555598.
- DGM25. Digitales Geländemodell. Geoinformationen © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)
- DTK50-V. Georeferenzierte Rasterdaten der Topographischen Karte 1 : 50 000. Geoinformationen © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)
- GCG2011. German Combined Quasigeoid 2011 (Deutsches Kombiniertes Quasigeoid 2011) entwickelt vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und dem Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover (IfE) in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (www.bkg.bund.de).
- Hovgaard, J. & Grasty, R.L., 1997. Reducing statistical noise in airborne gamma ray data through spectral component analysis. In: Gubins, A.G. (ed.), *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration*, 753–764.
- Huang, H. & Fraser, D.C., 2000. Airborne resistivity and susceptibility mapping in magnetically polarizable areas. *Geophysics* 65, 502–511.
- HZDR, 2013. Erkundung von metallischen Rohstoffen im Erzgebirge. Projektseite auf HZDR-Homepage: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=39356&pNid=3103>.
- IAEA, 1991. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. International Atomic Energy Agency. Technical Reports Series 323, Vienna.
- IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1363AEA, Vienna.
- IAGA, 1992: International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group 8: Analysis of the main field and secular variation. *Geophysical Journal International*, 108, 945–946.
- IAGA, 2010: International Geomagnetic Reference Field: the 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, BGR, Hannover.

- Johansen, H.K. & Sørensen, K., 1979. The fast Hankel transform. *Geophysical Prospecting* 27, 876–901.
- Meyer, U. & Siemon, B., 2014. Hubschrauber-Geophysik der BGR neu am Start. *Geowissenschaftliche Mitteilungen (GMIT)*, 55, 6–14.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 2005. Aerogeophysik. In: Knödel, K., Krummel, H. & Lange, G. (Hrsg.), *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 771–810.
- 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., Steuer, A., Pielawa, J., Petersen, H., Voß, W., Balzer, H.-U. & Plath, C., 2014. Zwischenbericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Geyer 2013/14. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132268, Hannover.
- Siemon, B., Steuer, A., Ullmann, A., Vasterling, M. & Voß, W., 2011. Application of frequency-domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater exploration in urban areas. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 36/16, 1373–1385, doi: 10.1016/j.pce.2011.02.006.
- Ward, S.H. & Hohmann, G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications. In Nabighian M.N. (Eds.) *Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. 1, Theory*. Society of Exploration Geophysics, IG no 3, Tulsa, 130–310.
- Weidelt, P., 1991. Introduction into electromagnetic sounding. Lecture manuscript. Technical University of Braunschweig, Germany.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
BGR, HANNOVER

(Dr. M. Kosinowski)

Leiter der Abteilung
„Grundwasser und Boden“

(Dr. U. Meyer)

Leiter des Fachbereichs
„Geophysikalische Erkundung –
Technische Mineralogie“

(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs
„Aerogeophysik und
Luftfahrttechnischer Betrieb“

Anhang I

Messgebiet 146 – Geyer

Basis:	Flugplatz Chemnitz-Jahnsdorf (EDCJ) Flugplatzhöhe: 1198 ft/365 m	
Bodenstation (alt, 2013):	12,833754° östliche Länge,	50,747926° nördliche Breite
Bodenstation (alt, 2014):	12,833691° östliche Länge,	50,727160° nördliche Breite
Bodenstation (neu, 2014):	12,833618° östliche Länge,	50,727268° nördliche Breite

Messgebiet:

Profilabstand:	Messprofile – 100 m	Kontrollprofile – 500 m
Profilrichtung:	Messprofile – 139,5°	Kontrollprofile – 49°5
Profile:	Messprofile – 189	Kontrollprofile – 14
Profilkilometer (Plan):	Messprofile – 1384 km	Kontrollprofile – 250 km
Größe des Messgebietes:	ca. 135 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 Flugplatz Chemnitz-Jahnsdorf (EDCJ) überflogen wurde.
- 3) HeliDAS-Konsole: SYS34 (21.-25.10.2013)
 SYS14 (31.03.-11.04.2014)
- 4) Bird: BKS36a (21.-25.10.2013)
 BKS60 (31.03.-11.04.2014)
- 5) Magnetometer Kurze Ausfälle, besonders in Kurven
- 6) Spektrometer Einige Ausfälle
- 7) Radarhöhenmesser Nicht aktiv
- 8) Videokamera Nicht aktiv

Tabelle A-1. *Flugprotokoll*

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
14601	21.10.13	15:37 – 16:08	TL701.1 TL701.2 TL701.3 TL701.4	Testlinienflug HeliDAS-Konsole: SYS34 Bird: BKS36a EM1 defekt: kein Signal EM5 und EM6 defekt: extremer Noise EM_FREQ bei allen Kanälen OK EM1_REF_AMP viel zu klein Einige Spikes in MAG1U in Kurven Wetter: wolkig
14602	22.10.13	09:06 – 10:09	L118.1 L117.1 L116.1 L115.1 L112.1 L109.1 TL702.1 TL702.2	Messprofilflug Start vom Sportplatz in Geyer Profile in umgekehrter Richtung geflogen EM1 defekt: übersteuertes (100×) Signal EM5 und EM6 defekt: extremer Noise EM_FREQ bei allen Kanälen OK EM6_REF_AMP etwas zu klein Zahlreiche Spikes in MAG1U, meist in Kurven Spektrometersausfall: 00000–05680 (Kurve) 25810–27170 (L109 Anfang) Wetter: sonnig-wolkig, windig (20 Kn.), 17°C
14603 14604	23.10.13			Bodentests Reparaturarbeiten am Bird

14605	24.10.13	07:37 – 10:15	<p>L107.1 L104.1 L101.1 L98.1 L95.1 L92.1 L89.1 L86.1 L83.1 L80.1 L77.1 L74.1 L71.1 L68.1 L65.1 L62.1 L59.1 L56.1 L53.1 L50.1 L47.1 L44.1 TL705.1</p>	<p>Messprofilflug EM1 defekt: kein Signal EM1_REF_AMP viel zu klein EM5/6_FREQ auf EM3/4 angezeigt EM5/6_REF_AMP auf EM3/4_REF_AMP? EM3-Frequenzanzeige an Konsole: 386 EM4-Frequenzanzeige an Konsole: 252 Zahlreiche Spikes in MAG1U, meist in Kurven Spektrometer mehrmals ausgefallen 14450-15800 – L101 (Anfang) 35950-38670 – L83 (bis Mitte) 58830-61020 – L65 (Anfang) 81170-83150 – L47 (Anfang) Wetter: sonnig, 12°C</p>
14606	24.10.13			Abbruch wg. EM2 defekt – Neustart HeliDAS
14607	24.10.13	13:29 – 14:33	<p>L119.1 L122.1 L125.1 L128.1 L131.1 L134.1 TL707.1</p>	<p>Messprofilflug EM1 defekt: kein Signal EM1_FREQ falsch EM1_REF_AMP viel zu klein EM2_Phase nicht OK EM5/6_FREQ auf EM3/4 angezeigt EM5/6_REF_AMP auf EM3/4_REF_AMP? EM3-Frequenzanzeige an Konsole: ? EM4-Frequenzanzeige an Konsole: ? Magnetometer senkrecht gestellt Einige Spikes in MAG1U, meist in Kurven Skirt defekt ab 16241 – L128 (Mitte), vermutlich Baumspitze getroffen Wetter: bewölkt</p>
14608	25.10.13	08:34 – 08:53	<p>L83.2 L65.2</p>	<p>Messprofilflug (nur HRD) Ohne Flugsonde, mit Laserhöhenmesser am Hubschrauber</p>

14611	01.04.14	10:18 – 12:57	L189.1 L186.1 L183.1 L180.1 L177.1 L174.1 L171.1 L168.1 L165.1 L162.1 L159.1 L156.1 L153.1 L150.1 L147.1 L144.1 L141.1 L138.1 L135.1 L132.1 L129.1 L126.1 L64.1	<p>Messprofilflug</p> Systemwechsel: HeliDAS-Konsole: SYS14 Bird: BKS60 Ausfall: 82730-85625 (L64) – Linie wiederholt Wetter: sonnig, kein Wind, 12–20°C
14612	02.04.14	07:43 – 10:29	L1.1 L4.1 L7.1 L10.1 L13.1 L16.1 L19.1 L22.1 L25.1 L28.1 L31.1 L34.1 L37.1 L40.1 L43.1 L46.1 L49.1 L52.1 L55.1 L58.1 L61.1 L66.1 L67.1 L70.1 TL812.1	<p>Messprofilflug</p> Spektrometerausfall: 17490-19730 (L13) 39900-41120 (L31) 61240-62410 (L46) 82560-83910 (L66) Wetter: sonnig, 12–20°C

14613	02.04.14	13:03 – 15:49	L73.1 L76.1 L79.1 L82.1 L85.1 L88.1 L91.1 L94.1 L97.1 L100.1 L103.1 L106.1 L121.1 L124.1 L127.1 L130.1 L133.1 L136.1 L139.1 L142.1 L145.1 L148.1 L151.1 L154.1 TL813.1	Messprofilflug EM4-Ausfall: 13300-14070 (L79) Wetter: leicht bewölkt, kein Wind, 18°C
14614	03.04.14	07:46 – 10:06	T1.9 T2.9 T3.9 T4.9 T5.9 T6.9 T7.9 T8.9 T9.9 T10.9 T11.9 T12.9 T13.9 TL814.1	Kontrollprofilflug EM4-Ausfall: 15570-15750 (T2) Spektrometersausfall: 13670-16390 (T2) 36530-37160 (T5) 57290-58360 (T8) 78500-79900 (T11) Wetter: sonnig, kein Wind 14°C

14615	03.04.14	11:59 – 14:44	L123.1 L120.1 L117.2 L114.1 L111.1 L108.1 L105.1 L102.1 L99.1 L96.1 L93.1 L90.1 L87.1 L84.1 L81.1 L78.1 L75.1 L72.1 L69.1 L60.1 L57.1 L54.1 L51.1 L48.1 L45.1 L42.1 TL815.1	<p>Messprofilflug</p> EM4-Ausfall: 15580-15740 (Kurve) 43500-43530 (Kurve) 64860-64870 (L72) 70130-70160 (Kurve) Wetter: leicht bewölkt, kaum Wind, 18°C
14616	04.04.14	07:17 – 10:01	L3.1 L6.1 L9.1 L12.1 L15.1 L18.1 L21.1 L24.1 L27.1 L30.1 L33.1 L36.1 L39.1 T14.9 L158.1 L161.1 L164.1 L167.1 L170.1 L173.1 L176.1 L179.1 L182.1 TL816.1	<p>Messprofilflug</p> Harm. Schwingung bei EM1 bis 8620 (L3) Spektrometersausfall: 13980-16630 (L12) 36780-37560 (L30) 57700-59050 (Kurve) 79190-80230 (Kurve) Wetter: sonnig, wenig Wolken, kaum Wind, 14–16°C

14617	07.04.14	11:14 – 13:57	L2.1 L5.1 L8.1 L11.1 L14.1 L17.1 L20.1 L23.1 L26.1 L29.1 L32.1 L35.1 L38.1 L41.1 L110.1 L113.1 L137.1 L140.1 L143.1 L146.1 L149.1 L152.1 L155.1 L188.1 TL817.1	Messprofilflug EM4-Ausfall: 56440-56740 (L110) Spektrometerausfall: 17100-18570 (Kurve) 38710-39620 (Kurve) 59780-60820 (L113) 80950-81710 (L152) Wetter: sonnig, wenig Wolken, kaum Wind, 18–20°C
14618	08.04.14	08:12 – 10:58	L63.1 L44.2 L109.2 L112.2 L115.2 L118.2 L157.1 L160.1 L163.1 L166.1 L169.1 L172.1 L175.1 L178.1 L181.1 L184.1 L187.1 L185.1 L62.2 L59.2 L56.2 TL818.1	Messprofilflug EM4-Ausfall: 15840-16000 EM2-Kapriolen: 19100–195000 22270–22850 26930–27780 Wetter: sonnig, viele Wolken, sehr windig (16–25 kn.), böig, 18°C

14619	09.04.14	07:44 – 08:18	L116.2 L119.2 L112.2 L122.2 L125.2	Messprofilflug EM4-Ausfall: 8030 Sprung (L116.2) → Abbruch bei 20980 EM2-Kapriolen: 6860–7800 10080–10470 13650–14090 Wetter: stark bewölkt, sehr windig (15-20 kn.), böig, 5°C
14620	09.04.14	08:18 – 10:34	L128.2 L131.2 L134.2 L107.2 L104.2 L101.2 L68.2 L71.2 L74.2 L77.2 L80.2 L83.3 L50.2 L53.2 TL820.1	Messprofilflug EM4-Ausfall: 1821 Sprung (L107.2) → autocal 29080 Sprung (L101.2) → autocal 53000 Sprung (L80.3) 55850 Sprung (L83.2) → autocal Wetter: stark bewölkt, sehr windig (15–20 kn.), böig, 5°C
14621	09.04.14	12:45 – 13:16	L3.2 L66.2 L65.3	Messprofilflug Abbruch wg. Schlechtem Wetter bei 17960 Wetter: stark bewölkt, sehr windig (15-20 kn.), böig, 8°C

Die Linien L83.3 (Flug 14620) und L65.3 (Flug 14621) wurden umbenannt in L83.2 bzw. L65.2, da der Flug 14608 (nur HRD) nicht ausgewertet wurde.

Profile mit unvollständigen Datensätzen sind farbig gekennzeichnet.

Anhang II

Beschreibung der Datenformate

A) Elektromagnetik

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

Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/GEYER  
/AREACODE  
/146  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE FOR X AND Y  
/ 15 33 ETRS89  
/REFERENCE SYSTEM FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/BIRD  
/60 (BKS60)  
/NUMFREQ  
/ 6  
/FREQUENCY  
/ 380.00 1773.00 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  
/IFREQUENCY  
/ 1 1 1 1 1 1  
/TOWCABLE  
/ 39.00  
/DUMMY  
/ -999.99  
/DECIMATIONVALUE  
/ 1  
/PRIVTEXT  
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```


1) Rohdaten: HEM146_RAW.XYZ

Beispiel:

/Unprocessed data

/ XYZ EXPORT [11/11/2015]

/ DATABASE [.\146_raw_cut.gdb]

/Flights 14602-07: BKS36a, Flights 14611-21: BKS60

// X Y LON LAT RECORD UTC_TIME ALTR ALTL_FP ZHG_BIRD_RAW ZHG_HELI_RAW ALTB EM1I EM1Q ... EM6I EM6Q EM1_FREQ ... EM6_FREQ CPPL CPSP

//Flight 14602

//Date 2013/10/22

Random 0.2

```

352313 5611808 12.9113360 50.6394065 0 90630.0 0.76 97.64 769.60 809.81 -3.05 -830.66 -1365.72 ... 405.67 45.40 0 ... 0 0.0015 0.0015
352309 5611810 12.9112846 50.6394195 1 90630.1 0.61 94.62 769.75 809.94 -2.44 -830.68 -1365.84 ... 423.16-162.83 4139 ... 539 0.0010 0.0176
352305 5611812 12.9112332 50.6394324 2 90630.2 0.76 94.62 769.90 810.07 -3.20 -830.58 -1366.17 ... 419.87-327.67 8278 ... 1079 0.0009 0.0181

```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000 m
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALTR	ft	Messwert des Radarhöhenmessers, defekt
ALTL_FP	m	Messwert des Laserhöhenmessers
ZHG_BIRD_RAW	m	GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
ZHG_HELI_RAW	m	GPS-Höhe über NHN des Hubschraubers, Bezugssystem WGS84
ALTB	ft	barometrische Höhe des Hubschraubers, defekt
EM1I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41430/41000 Hz
EM1Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41430/41000 Hz
EM2I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8360/8300 Hz
EM2Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8360/8300 Hz
EM3I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=386/380 Hz
EM3Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=386/380 Hz
EM4I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=133200/129500 Hz
EM4Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=133200/129500 Hz
EM5I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1817/1773 Hz
EM5Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1817/1773 Hz
EM6I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5390/5410 Hz
EM6Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5390/5410 Hz
EM1_FREQ	Hz	Frequenz für EM1-Kanäle (etwa f=41430/41000 Hz)
EM2_FREQ	Hz	Frequenz für EM2-Kanäle (etwa f=8360/8300 Hz)
EM3_FREQ	Hz	Frequenz für EM3-Kanäle (etwa f=386/380 Hz)
EM4_FREQ	Hz	Frequenz für EM4-Kanäle (etwa f=133200/129500 Hz)
EM5_FREQ	Hz	Frequenz für EM5-Kanäle (etwa f=1817/1773 Hz)
EM6_FREQ	Hz	Frequenz für EM6-Kanäle (etwa f=5390/5410 Hz)
CPPL		Powerline-Detektor
CPSP		Sperics-Detektor

Anmerkungen:

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

/COILGEOMETRY

/ 1.00 1.00 -0.25 1.00 1.00 1.00

und zusätzlich die Parameter für BKS36a:

/BIRD

/61 (BKS36a)

/NUMFREQ

/ 6

/FREQUENCY

/ 386.00 1817.00 5390.00 8360.00 41420.00 133200.00

/COILSEPERATION

/ 7.94 7.93 9.06 7.93 7.91 7.92

/COILGEOMETRY

/ 1.00 1.00 0.25 1.00 1.00 1.00

/IFREQUENCY

/ 1 1 1 1 1 1

/PRIVTEXT

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

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

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

2) Daten: HEM146_DAT.XYZ

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using Oasis montaj and EM_view13

/Levelled data, man-made effects removed

/Transferred on 16-OCT-15 17:30:00

```

/      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 14612
//Date 2014/04/02
Line 1.1
 342296 5606096 12.772208 50.585453    6411    75333.1  712.20    36.56    36.56    748.76    748.24    1.60    7.71  ...  347.04  506.36
 342297 5606094 12.772234 50.585430    6412    75333.2  712.26    36.52    36.52    748.78    747.60    1.58    7.74  ...  347.43  507.39
 342299 5606092 12.772259 50.585411    6413    75333.3  712.31    36.48    36.48    748.79    747.69    1.56    7.76  ...  348.10  509.39

```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000 m
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N
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 DEM25 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM25), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM25)
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=1773 Hz
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1773 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 "/"
Zeilen, die mit "//"
Zeilen, die mit "Line"
Zeilen, die mit "Tie"

beginnen, sind Kommentarzeilen.

beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.

beginnen, kennzeichnen Messprofilinien.

beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.

3) Halbraumparameter: HEM146_APP.XYZ

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using Oasis montaj and EM_view13

/Levelled data, man-made effects removed

/Transferred on 16-OCT-15 17:30:00

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

//Flight 14612

//Date 2014/04/02

Line 1.1

342296	5606096	12.772208	50.585453	6411	75333.1	712.20	36.56	36.56	748.76	748.24	300.19	24.01	247.68	...	1534.97	-6.59	20.81
342297	5606094	12.772234	50.585430	6412	75333.2	712.26	36.52	36.52	748.78	747.60	303.60	23.44	248.37	...	1535.11	-6.58	20.82
342299	5606092	12.772259	50.585411	6413	75333.3	712.31	36.48	36.48	748.79	747.69	307.00	22.86	249.05	...	1536.71	-6.61	20.80

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000 m
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N
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 DEM25 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM25), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM25)
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=1773 Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=1773 Hz
ZST_2	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=1773 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 HEM146_INV.XYZ

Beispiel:

/Processing by B. Siemon (BGR) using Oasis montaj and EM_view13

/Levelled data, man-made effects removed

/Transferred on 03-NOV-15 16:00:00

```

/   X       Y       LON       LAT   RECORD   UTC_TIME   TOPO   H_RADAR   H_LASER   BIRD_NN   H_BARO   RHO_I_1   D_I_1   ...   RHO_I_20   QALL
//Flight 14612
//Date 2014/04/02

```

Line 1.1

```

342296 5606096 12.772208 50.585453 6411 75333.1 712.20 36.56 36.56 748.76 748.24 2614.52 0.31 ... 599.68 18.30
342297 5606094 12.772234 50.585430 6412 75333.2 712.26 36.52 36.52 748.78 747.60 2614.48 0.31 ... 606.46 18.16
342299 5606092 12.772259 50.585411 6413 75333.3 712.31 36.48 36.48 748.79 747.69 2614.56 0.31 ... 613.22 17.96

```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N
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 DEM25 (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM25), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM25)
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	Ω m	spezifischer Widerstand der ersten (oberen) Schicht des 20-Schicht-Inversionsmodells
D_I_1	m	Mächtigkeit der ersten (oberen) Schicht des 20-Schicht-Inversionsmodells
...
RHO_I_6	Ω m	spezifischer Widerstand der sechsten Schicht (Substratum) des 20-Schicht-Inversionsmodells
QALL	%	Anpassungsfehler der Inversion (L1-Norm)

Anmerkungen: siehe 2) und

im Header steht zusätzlich:

/NUMLAYER

/ 20

/MUELAYER

/ 0

und abweichend:

/IFREQUENCY

/ 1 1 0 1 1 1

B) Magnetik

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

Magnetikdaten HMG146.XYZ

```
/BGR HEADER:  
/  
/AREANAME  
/GEYER  
/AREACODE  
/146  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE FOR X AND Y  
/ 15 33 ETRS89  
/REFERENCE SYSTEM FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/G-822A  
/IGRF  
/2010  
/LON_BASE  
/12.8337  
/LAT_BASE  
/50.7272  
/ALT_BASE  
/365  
/TOWCABLE  
/39.0  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```


Beispiel:

```
/ XYZ EXPORT [11/10/2015]
/ DATABASE [.\146_mag_cut.gdb]
/ Processed by M. Ibs-von Seht
/      X      Y      LON      LAT RECORD UTC_DATE UTC_TIME ALT_BIRD H_RADAR_RAW H_LASER_RAW T_BASE_RAW T_BASE_F T_RAW DELTA_T DELTA_T_LEV
//Flight 14612
//Date 2004/04/02
Line 1.1
342296 5606096 12.772208 50.585452 6404 20040402 75332.4 749.9 0.7 0.0 48984.49 48984.53 48871.58 -58.40 -67.36
342297 5606094 12.772234 50.585431 6405 20040402 75332.5 750.0 0.5 18.9 48984.49 48984.53 48871.85 -58.09 -67.05
342299 5606092 12.772259 50.585410 6406 20040402 75332.6 750.1 0.5 19.7 48984.49 48984.53 48872.16 -57.79 -66.75
```

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 ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_RADAR_RAW	mV	Messwert der Radarhöhe des Hubschraubers über Grund
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde über Grund
T_BASE_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_BASE_F	nT	bereinigte Daten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Flugsonde
DELTA_T	nT	Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes nach Abzug des IGRF und der Tagesvariation sowie Korrektur des richtungsabhängigen Fehlers (heading error)
DELTA_T_LEV	nT	niveauekorrigierte Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes

Anmerkungen:

Zeilen, die mit "/" beginnen, sind Kommentarzeilen.
 Zeilen, die mit "//" beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.
 Zeilen, die mit "Line" beginnen, kennzeichnen Messprofillinien.
 Zeilen, die mit "Tie" beginnen, kennzeichnen Kontrollprofile.

C) Radiometrie

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

Radiometriedaten HRD146.xyz

```
/BGR HEADER:  
/AREANAME  
/GEYER  
/AREACODE  
/146  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE FOR X AND Y  
/ 15 33 ETRS89  
/REFERENCE SYSTEM FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/RS-500 RSX-5  
/BACKGROUND (IAEA 2003, S.60) a(TC), b(TC), a(K), b(K), a(U), b(U), a(Th), b(Th), a(upU), b(upU)  
/51.40, 1.0437, 6.59, 0.0619, 1.20, 0.0509, 0.02, 0.0649, 0.32, 0.0133  
/STRIPPING (IAEA 2003, S.65) alpha, beta, gamma, a  
/0.270, 0.400, 0.772, 0.052  
/ATTENUATION (IAEA 2003, S.67) mue(TC), mue(K), mue(U), mue(Th)  
/0.00983, 0.01255, 0.00667, 0.00982  
/BIO-ATTENUATION (Vegetation) muev(TC), muev(K), muev(U), muev(Th)  
/0.010, 0.011, 0.010, 0.010  
/SENSITIVITY (IAEA 2003, S.68) S(K), S(U), S(Th)  
/24.50, 3.60, 1.78  
/TOWCABLE  
/ 39.00  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```


Beispiel:

/XYZ EXPORT [11/11/2015]

/DATABASE [.\146_split_cut.gdb]

/Processed by M. Ibs-von Seht

/ X Y LON LAT ALT H_LASER_RAW HAG RECORD UTC_DATE UTC_TIME PRESSURE TEMP LIVE_T COSMIC_RAW

Fortsetzung der letzten Zeile:

TOT_RAW POT_RAW URA_RAW THO_RAW URAUP_RAW TOT_LEV POT_LEV URA_LEV THO_LEV EXPO

//Flight 14612

//Date 2014/04/02

Line 1.1

342306	5606104	12.772357	50.585522	786.6	32.7	74.3	6410	20140402	75333	92.807	15.5	999	83
342326	5606081	12.772647	50.585316	785.5	26.7	72.5	6420	20140402	75334	92.858	15.5	999	76
342346	5606057	12.772937	50.585114	782.4	25.6	69.0	6430	20140402	75335	92.902	15.5	999	99

Fortsetzung der letzten drei Zeilen:

1272	125	28	20	5	1058.7	3.77	4.39	12.33	12.07
1223	136	22	37	3	1018.4	4.13	2.83	14.04	12.10
1316	154	29	41	4	1013.7	4.36	2.61	15.64	12.75

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 ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N, Rechtsverschiebung ("false easting") 500000m
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ERTS89, Mittelmeridian 15°, Zone 33N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
ALT	m	GPS-Höhe über NN des Hubschraubers, Bezugssystem WGS84
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde über der Erdoberfläche
HAG	m	Höhe des Hubschraubers über der Erdoberfläche
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
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_LEV	cps	Gesamtstrahlung (niveauekorrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
POT_LEV	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden (niveauekorrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
URA_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden (niveauekorrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
THO_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden (niveauekorrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
EXPO	µR/h	Ionendosisleistung am Erdboden, ermittelt aus niveauekorrigierten und biomassekorrigierten Gehalten

Anmerkungen: siehe Magnetik

Anhang III

DVD-Inhalt

\	146 Geyer Widerstand 140m unter GOK.mxd
Adobe - Adobe Reader herunterladen.URL	146 Geyer Widerstand 200m unter GOK.mxd
\Bericht\	Geosoft Software Suite 8.3.1 65015 update+ 2014.12.23.exe
Technischer Bericht 146 Geyer.pdf	
\Daten\	\Legenden\ Legenden.zip
\HEM\ Format_description_HEM146.txt	\Oasis\ 146_Geyer_RHOATZ_TB.map
HEM146_APP.xyz	146_Geyer_RHOATZ_TB.map.xml
HEM146_DAT.xyz	146_Geyer_TB.map
HEM146_INV.xyz	146_Geyer_TB.map.xml
HEM146_RAW.xyz	146_Geyer_TB.mdf
\HMG\ Format_description_HMG146.txt	DA1_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
HMG146.XYZ	DA1_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
\HRD\ Format_description_HRD146.txt	DA1_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
HRD146.XYZ	DA1_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
\Karten\ 146 Geyer Erzgebirge ÜK.pdf	DA2_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
liesmich.txt	DA2_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
\ArcGis\ 146 Geyer Fluglinien.mxd	DA2_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
146 Geyer Gesamtstrahlung.mxd	DA2_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
146 Geyer Halbraumwiderstand rhoa1.mxd	DA3_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
146 Geyer Halbraumwiderstand rhoa2.mxd	DA3_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
146 Geyer Halbraumwiderstand rhoa3.mxd	DA3_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
146 Geyer Halbraumwiderstand rhoa4.mxd	DA3_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
146 Geyer Halbraumwiderstand rhoa5.mxd	DA4_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
146 Geyer Halbraumwiderstand rhoa6.mxd	DA4_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
146 Geyer Höhenmodell DEM.mxd	DA4_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
146 Geyer Kalium.mxd	DA4_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
146 Geyer Magnetik anthrop. Effekte.mxd	DA5_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
146 Geyer Magnetik.mxd	DA5_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
146 Geyer Schwerpunktstiefe zst1.mxd	DA5_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
146 Geyer Schwerpunktstiefe zst2.mxd	DA5_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
146 Geyer Schwerpunktstiefe zst3.mxd	DA6_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
146 Geyer Schwerpunktstiefe zst4.mxd	DA6_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
146 Geyer Schwerpunktstiefe zst5.mxd	DA6_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
146 Geyer Schwerpunktstiefe zst6.mxd	DA6_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
146 Geyer Strahlungsrate.mxd	DEM.grd
146 Geyer Thorium.mxd	DEM.grd.gi
146 Geyer Uran.mxd	DEM_GRD_s.grd
146 Geyer Widerstand 005m unter GOK.mxd	DEM_GRD_s.grd.gi
146 Geyer Widerstand 015m unter GOK.mxd	EXPO_cut.grd
146 Geyer Widerstand 025m unter GOK.mxd	EXPO_cut.grd.gi
146 Geyer Widerstand 040m unter GOK.mxd	EXPO_cut.grd.xml
146 Geyer Widerstand 060m unter GOK.mxd	EXPO_CUT_GRD_s.grd
146 Geyer Widerstand 100m unter GOK.mxd	EXPO_CUT_GRD_s.grd.gi
	EXPO_CUT_GRD_s.grd.xml
	Keil_da_s.tfw
	Keil_da_s.tif
	Keil_DEM_s.tfw
	Keil_DEM_s.tif

Keil_rhoa_s.tif	RHO_L20_100mbgl_cut_GRD_s.grd.xml
Keil_rhoa_s.tif	RHO_L20_140mbgl_cut.GRD
Keil_zst_s.tif	RHO_L20_140mbgl_cut.GRD.gi
Keil_zst_s.tif	RHO_L20_140mbgl_cut.GRD.xml
MAG_LEV_cut.grd	RHO_L20_140mbgl_cut_GRD_s.grd
MAG_LEV_cut.grd.gi	RHO_L20_140mbgl_cut_GRD_s.grd.gi
MAG_LEV_cut.grd.xml	RHO_L20_140mbgl_cut_GRD_s.grd.xml
MAG_LEV_cut_GRD_s.grd	RHO_L20_200mbgl_cut.GRD
MAG_LEV_cut_GRD_s.grd.gi	RHO_L20_200mbgl_cut.GRD.gi
MAG_LEV_cut_GRD_s.grd.xml	RHO_L20_200mbgl_cut.grd.xml
MAG_LEV_NoAnomalies_cut.grd	RHO_L20_200mbgl_cut_GRD_s.grd
MAG_LEV_NoAnomalies_cut.grd.gi	RHO_L20_200mbgl_cut_GRD_s.grd.gi
MAG_LEV_NoAnomalies_cut.grd.xml	RHO_L20_200mbgl_cut_GRD_s.grd.xml
MAG_LEV_NoAnomalies_cut_GRD_s.grd	RHO_L20_200mbgl_GRD_cut.GRD.xml
MAG_LEV_NoAnomalies_cut_GRD_s.grd.gi	RHOA1_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
MAG_LEV_NoAnomalies_cut_GRD_s.grd.xml	RHOA1_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
POT_cut.grd	RHOA1_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
POT_cut.grd.gi	RHOA1_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
POT_cut.grd.xml	RHOA2_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
POT_cut_GRD_s.grd	RHOA2_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
POT_CUT_GRD_s.grd.gi	RHOA2_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
POT_CUT_GRD_s.grd.xml	RHOA2_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_005mbgl_cut.GRD	RHOA3_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
RHO_L20_005mbgl_cut.GRD.gi	RHOA3_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
RHO_L20_005mbgl_cut.GRD.xml	RHOA3_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
RHO_L20_005mbgl_cut_GRD_s.grd	RHOA3_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_005mbgl_cut_GRD_s.grd.gi	RHOA4_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
RHO_L20_005mbgl_cut_GRD_s.grd.xml	RHOA4_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
RHO_L20_015mbgl_cut.GRD	RHOA4_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
RHO_L20_015mbgl_cut.GRD.gi	RHOA4_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_015mbgl_cut.GRD.xml	RHOA5_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
RHO_L20_015mbgl_cut_GRD_s.grd	RHOA5_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
RHO_L20_015mbgl_cut_GRD_s.grd.gi	RHOA5_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
RHO_L20_015mbgl_cut_GRD_s.grd.xml	RHOA5_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_025mbgl_cut.GRD	RHOA6_IBS_LEV_IQ_cut.GRD
RHO_L20_025mbgl_cut.GRD.gi	RHOA6_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi
RHO_L20_025mbgl_cut.GRD.xml	RHOA6_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd
RHO_L20_025mbgl_cut_GRD_s.grd	RHOA6_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_025mbgl_cut_GRD_s.grd.gi	RHOA6_IBS_LEV_IQ_GRD_s_cut.GRD
RHO_L20_025mbgl_cut_GRD_s.grd.xml	RHOA6_IBS_LEV_IQ_GRD_s_cut.GRD.gi
RHO_L20_040mbgl_cut.GRD	RHOA6_IBS_LEV_IQ_GRD_s_cut_GRD_s.grd
RHO_L20_040mbgl_cut.GRD.gi	RHOA6_IBS_LEV_IQ_GRD_s_cut_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_040mbgl_cut.GRD.xml	RHOA6_IBS_LEV_KOR_FILT_GRD_s_cut.GRD
RHO_L20_040mbgl_cut_GRD_s.grd	RHOA6_IBS_LEV_KOR_FILT_GRD_s_cut.GRD.gi
RHO_L20_040mbgl_cut_GRD_s.grd.gi	THO_cut.grd
RHO_L20_040mbgl_cut_GRD_s.grd.xml	THO_cut.grd.gi
RHO_L20_060mbgl_cut.GRD	THO_cut.grd.xml
RHO_L20_060mbgl_cut.GRD.gi	THO_CUT_GRD_s.grd
RHO_L20_060mbgl_cut.GRD.xml	THO_CUT_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_060mbgl_cut_GRD_s.grd	THO_CUT_GRD_s.grd.xml
RHO_L20_060mbgl_cut_GRD_s.grd.gi	TOPO_LASER_KOR_MAN.grd
RHO_L20_060mbgl_cut_GRD_s.grd.xml	TOPO_LASER_KOR_MAN.grd.gi
RHO_L20_100mbgl_cut.GRD	TOPO_LASER_KOR_MAN_GRD_s.grd
RHO_L20_100mbgl_cut.GRD.gi	TOPO_LASER_KOR_MAN_GRD_s.grd.gi
RHO_L20_100mbgl_cut.GRD.xml	TOT_cut.grd
RHO_L20_100mbgl_cut_GRD_s.grd	TOT_cut.grd.gi
RHO_L20_100mbgl_cut_GRD_s.grd.gi	TOT_cut.grd.xml

TOT_CUT_GRD_s.grd	146 Geyer Widerstand 060m unter GOK.pdf
TOT_CUT_GRD_s.grd.gi	146 Geyer Widerstand 100m unter GOK.pdf
TOT_CUT_GRD_s.grd.xml	146 Geyer Widerstand 140m unter GOK.pdf
URA_cut.grd	146 Geyer Widerstand 200m unter GOK.pdf
URA_cut.grd.gi	
URA_cut.grd.xml	\HMG\ 146 Geyer Magnetik anthropogene Effekte.pdf
URA_CUT_GRD_s.grd	146 Geyer Magnetik.pdf
URA_CUT_GRD_s.grd.gi	
URA_CUT_GRD_s.grd.xml	\HRD\ 146 Geyer Gesamtstrahlung.pdf
ZST1_IBS_LEV_IQ_cut.GRD	146 Geyer Kalium.pdf
ZST1_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi	146 Geyer Strahlungsrate.pdf
ZST1_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd	146 Geyer Thorium.pdf
ZST1_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi	146 Geyer Uran.pdf
ZST2_IBS_LEV_IQ_cut.GRD	
ZST2_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi	\VRS\ VRS1460011.pdf
ZST2_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd	VRS1460019.pdf
ZST2_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi	VRS1460021.pdf
ZST3_IBS_LEV_IQ_cut.GRD	VRS1460029.pdf
ZST3_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi	VRS1460032.pdf
ZST3_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd	VRS1460039.pdf
ZST3_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi	VRS1460041.pdf
ZST4_IBS_LEV_IQ_cut.GRD	VRS1460049.pdf
ZST4_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi	VRS1460051.pdf
ZST4_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd	VRS1460059.pdf
ZST4_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi	VRS1460061.pdf
ZST5_IBS_LEV_IQ_cut.GRD	VRS1460069.pdf
ZST5_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi	VRS1460071.pdf
ZST5_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd	VRS1460079.pdf
ZST5_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi	VRS1460081.pdf
ZST6_IBS_LEV_IQ_cut.GRD	VRS1460089.pdf
ZST6_IBS_LEV_IQ_cut.GRD.gi	VRS1460091.pdf
ZST6_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd	VRS1460099.pdf
ZST6_IBS_LEV_IQ_cut_GRD_s.grd.gi	VRS1460101.pdf
\Topografie\ Topografie.zip	VRS1460109.pdf
\Karten\ \DEM\ 146 Geyer Höhenmodell DEM.pdf	VRS1460111.pdf VRS1460119.pdf VRS1460121.pdf VRS1460129.pdf
\HEM\ 146 Geyer Halbrauwiderstand rhoa1.pdf	VRS1460131.pdf VRS1460139.pdf
146 Geyer Halbrauwiderstand rhoa2.pdf	VRS1460141.pdf
146 Geyer Halbrauwiderstand rhoa3.pdf	VRS1460149.pdf
146 Geyer Halbrauwiderstand rhoa4.pdf	VRS1460151.pdf
146 Geyer Halbrauwiderstand rhoa5.pdf	VRS1460161.pdf
146 Geyer Halbrauwiderstand rhoa6.pdf	VRS1460171.pdf
146 Geyer Schwerpunkstiefe zst1.pdf	VRS1460181.pdf
146 Geyer Schwerpunkstiefe zst2.pdf	VRS1460191.pdf
146 Geyer Schwerpunkstiefe zst3.pdf	VRS1460201.pdf
146 Geyer Schwerpunkstiefe zst4.pdf	VRS1460211.pdf
146 Geyer Schwerpunkstiefe zst5.pdf	VRS1460221.pdf
146 Geyer Schwerpunkstiefe zst6.pdf	VRS1460231.pdf
146 Geyer Widerstand 005m unter GOK.pdf	VRS1460241.pdf
146 Geyer Widerstand 015m unter GOK.pdf	VRS1460251.pdf
146 Geyer Widerstand 025m unter GOK.pdf	VRS1460261.pdf
146 Geyer Widerstand 040m unter GOK.pdf	VRS1460271.pdf

VRS1460281.pdf	VRS1460841.pdf	VRS1461401.pdf
VRS1460291.pdf	VRS1460851.pdf	VRS1461411.pdf
VRS1460301.pdf	VRS1460861.pdf	VRS1461421.pdf
VRS1460311.pdf	VRS1460871.pdf	VRS1461431.pdf
VRS1460321.pdf	VRS1460881.pdf	VRS1461441.pdf
VRS1460331.pdf	VRS1460891.pdf	VRS1461451.pdf
VRS1460341.pdf	VRS1460901.pdf	VRS1461461.pdf
VRS1460351.pdf	VRS1460911.pdf	VRS1461471.pdf
VRS1460361.pdf	VRS1460921.pdf	VRS1461481.pdf
VRS1460371.pdf	VRS1460931.pdf	VRS1461491.pdf
VRS1460381.pdf	VRS1460941.pdf	VRS1461501.pdf
VRS1460391.pdf	VRS1460951.pdf	VRS1461511.pdf
VRS1460401.pdf	VRS1460961.pdf	VRS1461521.pdf
VRS1460411.pdf	VRS1460971.pdf	VRS1461531.pdf
VRS1460421.pdf	VRS1460981.pdf	VRS1461541.pdf
VRS1460431.pdf	VRS1460991.pdf	VRS1461551.pdf
VRS1460442.pdf	VRS1461001.pdf	VRS1461561.pdf
VRS1460451.pdf	VRS1461012.pdf	VRS1461571.pdf
VRS1460461.pdf	VRS1461021.pdf	VRS1461581.pdf
VRS1460471.pdf	VRS1461031.pdf	VRS1461591.pdf
VRS1460481.pdf	VRS1461042.pdf	VRS1461601.pdf
VRS1460491.pdf	VRS1461051.pdf	VRS1461611.pdf
VRS1460502.pdf	VRS1461061.pdf	VRS1461621.pdf
VRS1460511.pdf	VRS1461072.pdf	VRS1461631.pdf
VRS1460521.pdf	VRS1461081.pdf	VRS1461641.pdf
VRS1460532.pdf	VRS1461092.pdf	VRS1461651.pdf
VRS1460541.pdf	VRS1461101.pdf	VRS1461661.pdf
VRS1460551.pdf	VRS1461111.pdf	VRS1461671.pdf
VRS1460562.pdf	VRS1461122.pdf	VRS1461681.pdf
VRS1460571.pdf	VRS1461131.pdf	VRS1461691.pdf
VRS1460581.pdf	VRS1461141.pdf	VRS1461701.pdf
VRS1460592.pdf	VRS1461152.pdf	VRS1461711.pdf
VRS1460601.pdf	VRS1461162.pdf	VRS1461721.pdf
VRS1460611.pdf	VRS1461172.pdf	VRS1461731.pdf
VRS1460622.pdf	VRS1461182.pdf	VRS1461741.pdf
VRS1460631.pdf	VRS1461192.pdf	VRS1461751.pdf
VRS1460641.pdf	VRS1461201.pdf	VRS1461761.pdf
VRS1460652.pdf	VRS1461211.pdf	VRS1461771.pdf
VRS1460661.pdf	VRS1461222.pdf	VRS1461781.pdf
VRS1460671.pdf	VRS1461231.pdf	VRS1461791.pdf
VRS1460682.pdf	VRS1461241.pdf	VRS1461801.pdf
VRS1460691.pdf	VRS1461252.pdf	VRS1461811.pdf
VRS1460701.pdf	VRS1461261.pdf	VRS1461821.pdf
VRS1460712.pdf	VRS1461271.pdf	VRS1461831.pdf
VRS1460721.pdf	VRS1461282.pdf	VRS1461841.pdf
VRS1460731.pdf	VRS1461291.pdf	VRS1461851.pdf
VRS1460742.pdf	VRS1461301.pdf	VRS1461861.pdf
VRS1460751.pdf	VRS1461312.pdf	VRS1461871.pdf
VRS1460761.pdf	VRS1461321.pdf	VRS1461881.pdf
VRS1460772.pdf	VRS1461331.pdf	VRS1461891.pdf
VRS1460781.pdf	VRS1461342.pdf	
VRS1460791.pdf	VRS1461351.pdf	
VRS1460802.pdf	VRS1461361.pdf	
VRS1460811.pdf	VRS1461371.pdf	
VRS1460821.pdf	VRS1461381.pdf	
VRS1460831.pdf	VRS1461391.pdf	

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

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