

T. Martin, M. Ibs-von Seht, A. Ullmann,
B. Siemon, J. Pielawa, A. Steuer, W. Voß



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Befliegung DESMEX, Teil 1 175 Schleiz

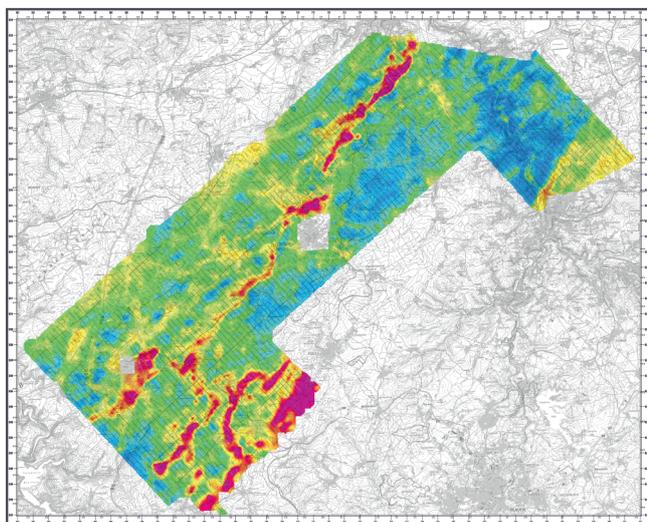
Mai 2015



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung





**Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe**



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Befliegung DESMEX, Teil 1 175 Schleiz Mai 2015

BMBF-Projekt:

**DESMEX: Deep Electromagnetic Soundings for
Mineral Exploration**

Förderkennzeichen: 033R130A

Kooperationspartner:

Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Universität zu Köln

Technische Universität Bergakademie Freiberg
Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
Leibniz-Institut für Photonische Technologien
Metronix GmbH
Supracon AG

BGR-Teilprojekte:

BMBF DESMEX (05-3049-05)
DESMEX-Spiegel (A-0201015.A)

Autoren: T. Martin
M. Ibs-von Seht
A. Ullmann
B. Siemon
J. Pielawa
A. Steuer
W. Voß

Datum: 14.07.2017

Inhaltsverzeichnis

Personal	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Kartenverzeichnis	V
Liste der Vertikalsektionen	VI
Abkürzungen	VII
1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	3
3. Das Messgebiet	4
4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR	7
4.1. Messhubschrauber	8
4.2. Messausrüstung.....	8
4.3. Elektromagnetik.....	9
4.4. Magnetik.....	10
4.5. Radiometrie	11
4.6. Navigations- und Positionierungssystem	12
4.7. Datenerfassung.....	14
4.8. Videosystem	15
4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber	15
5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten	16
5.1. Prozessabläufe	17
5.2. Positionsdaten	17
5.2.1. GPS-Koordinaten	17
5.2.2. Radarhöhen	18
5.2.3. Laserhöhen	19
5.2.4. Barometrische Höhen	20
5.2.5. Topografische Höhen	21
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik.....	21
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems	22
5.3.2. Verschiebungs- und Driftkorrektur	23
5.3.3. Datenauswahl und -korrektur.....	23
5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter	25
5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten	27
5.3.6. Statistische Niveaueinpassung.....	28
5.3.7. Dateninterpolation und -glättung	29
5.3.8. Datenfehler und Qualitätsparameter	30

5.3.9. 1D-Inversion der HEM-Daten.....	31
5.3.10. Präsentation der HEM-Ergebnisse.....	32
5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik.....	33
5.4.1. Magnetisches Totalfeld.....	33
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 HMG-Ergebnisse	35
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie	35
5.5.1. Energiekalibrierung	36
5.5.2. Verminderung des Rauschens	36
5.5.3. Effektive Höhe.....	37
5.5.4. Registrierzeitkorrektur.....	37
5.5.5. Hintergrundstrahlung.....	38
5.5.6. Radonkorrektur	39
5.5.7. Compton-Streuung.....	40
5.5.8. Zählraten in Standardflughöhe.....	41
5.5.9. Radioelementgehalte und Dosisleistung.....	41
5.5.10. Filterung und statistische Niveaueinpassung.....	43
5.5.11. Präsentation der HRD-Ergebnisse	44
6. Kartografische Arbeiten.....	45
6.1. Topografische Karten 1:50.000	45
6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software.....	45
6.3. Ergebniskarten.....	46
7. Archivierung.....	47
8. Literatur.....	48
Unterschriften.....	51
Anhang I: Befliegungsdaten Messgebiet 175 Schleiz	53
Anhang II: Beschreibung der Datenformate.....	59
Anhang III: DVD-Inhalt	81
Anhang IV: Karten.....	85
Anhang V: Vertikalsektionen.....	118
Anlage: DVD (Double Layer DVD+R)	

Personal:

Leitung und Management

Dr. Uwe **Meyer**, Fachbereichsleiter B2.1, Projektleitung BGR
Dr. Bernhard **Siemon**, Arbeitsbereichsleiter in B2.1, BGR
Dr. Annika **Steuer**, Geophysikerin, Projektmanagement B2.1, BGR
Dr. Tina **Martin**, Geophysikerin, Projektmanagement B2.1, BGR

Auswertung und Interpretation

Dr. Tina **Martin**, Geophysikerin, HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR
Dr. Annika **Steuer**, Geophysikerin, HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR
Angelika **Ullmann**, Geophysikerin, HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR
Dr. Bernhard **Siemon**, Physiker, Kontrolle der HEM-Datenauswertung, B2.1, BGR
Dr. Malte **Ibs-von Seht**, Geologe, HMG- und HRD-Datenauswertung, B2.1, BGR
Wolfgang **Voß**, Vermessungsingenieur, Positionsdatenauswertung, B2.1, BGR
Jens **Pielawa**, Kartograf, Kartenproduktion, B2.1, BGR

Messgruppe

Dr. Annika **Steuer**, Geophysikerin, Einsatzleitung, B2.1, BGR
Hauke **Petersen**, Geophysiker, Navigator, B2.1, BGR
Wolfgang **Voß**, Vermessungsingenieur, Navigator, B2.1, BGR
Hans-Ulrich **Balzer**, Elektroingenieur, Systembetreuer, B2.1, BGR
Carsten **Plath**, Fluggerätemechaniker, B2.1, BGR
Martin **Klenke**, Pilot, HeliJet Charter GmbH

Adresse: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Fachbereich B2.1
„Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie“
Stilleweg 2
D-30655 Hannover
Tel.: (0511) 643 3212 (Meyer)
3488 (Siemon)
Fax: (0511) 643 3662
E-Mail: heli@bgr.de, Uwe.Meyer@bgr.de, Bernhard.Siemon@bgr.de

Abbildungsverzeichnis:

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

Tabellenverzeichnis:

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

Kartenverzeichnis (1:50.000):

1. Topographie 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 1770 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 1770 Hz (zst2) in m unter GOK
14. Schwerpunktstiefe bei 380 Hz (zst1) in m unter GOK
15. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter GOK in Ωm
16. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter GOK in Ωm
17. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter GOK in Ωm
18. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter GOK in Ωm
19. Spezifischer Widerstand bei 50 m unter GOK in Ωm
20. Spezifischer Widerstand bei 75 m unter GOK in Ωm
21. Spezifischer Widerstand bei 100 m unter GOK in Ωm
22. Spezifischer Widerstand bei 125 m unter GOK in Ωm
23. Spezifischer Widerstand bei 150 m unter GOK in Ωm
24. Qualitätskontrollparameter für HEM
25. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
26. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT, bezüglich anthropogener Signale korrigiert
27. Gesamtstrahlung in cps
28. Gehalte von Kalium im Boden in %
29. Äquivalentgehalte von Uran im Boden in ppm
30. Äquivalentgehalte von Thorium im Boden in ppm
31. Dosisleistung am Boden in $\mu\text{R/h}$
32. Ternäre Darstellung von K, eU und eTh

Liste der Vertikalsektionen:

Messprofile:

- 1. VRS L1.1
- 2. VRS L2.1
- 3. VRS L3.1
- 4. VRS L4.1
- 5. VRS L5.1
- 6. VRS L6.1
- 7. VRS L7.1
- 8. VRS L8.1
- 9. VRS L9.1
- 10. VRS L10.1
- 11. VRS L11.1
- 12. VRS L12.1
- 13. VRS L12.2
- 14. VRS L13.1
- 15. VRS L14.1
- 16. VRS L14.2
- 17. VRS L15.1
- 18. VRS L15.2
- 19. VRS L16.1
- 20. VRS L17.1
- 21. VRS L18.1
- 22. VRS L19.1
- 23. VRS L20.1
- 24. VRS L21.1
- 25. VRS L22.1
- 26. VRS L23.1
- 27. VRS L24.1
- 28. VRS L25.1
- 29. VRS L26.1
- 30. VRS L27.1
- 31. VRS L28.1
- 32. VRS L29.1
- 33. VRS L30.1
- 34. VRS L31.1
- 35. VRS L32.1

- 36. VRS L33.1
- 37. VRS L34.1
- 38. VRS L35.1
- 39. VRS L36.1
- 40. VRS L37.1
- 41. VRS L38.1
- 42. VRS L39.1
- 43. VRS L40.1
- 44. VRS L41.1
- 45. VRS L41.2
- 46. VRS L42.1
- 47. VRS L43.1
- 48. VRS L44.1
- 49. VRS L45.1
- 50. VRS L46.1
- 51. VRS L47.1
- 52. VRS L48.1
- 53. VRS L49.1
- 54. VRS L50.1
- 55. VRS L51.1
- 56. VRS L52.1
- 57. VRS L53.1
- 58. VRS L54.1
- 59. VRS L55.1
- 60. VRS L56.1
- 61. VRS L57.1
- 62. VRS L58.1
- 63. VRS L59.1
- 64. VRS L60.1
- 65. VRS L60.2
- 66. VRS L61.1
- 67. VRS L61.2
- 68. VRS L62.1
- 69. VRS L62.2
- 70. VRS L63.1

- 71. VRS L63.2
- 72. VRS L64.1
- 73. VRS L64.2
- 74. VRS L65.1
- 75. VRS L65.2
- 76. VRS L66.1
- 77. VRS L66.2
- 78. VRS L67.1
- 79. VRS L67.2
- 80. VRS L68.1
- 81. VRS L69.1
- 82. VRS L70.1
- 83. VRS L71.1
- 84. VRS L72.1
- 85. VRS L73.1
- 86. VRS L74.1
- 87. VRS L75.1
- 88. VRS L76.1
- 89. VRS L77.1
- 90. VRS L77.2
- 91. VRS L78.1
- 92. VRS L79.1
- 93. VRS L80.1
- 94. VRS L81.1
- 95. VRS L82.1
- 96. VRS L83.1
- 97. VRS L84.1
- 98. VRS L85.1
- 99. VRS L86.1
- 100. VRS L87.1
- 101. VRS L88.1
- 102. VRS L89.1
- 103. VRS L89.2
- 104. VRS L90.1
- 105. VRS L90.2

- 106. VRS L91.1
- 107. VRS L92.1
- 108. VRS L93.1
- 109. VRS L94.1
- 110. VRS L95.1
- 111. VRS L96.1
- 112. VRS L97.1
- 113. VRS L98.1
- 114. VRS L99.1
- 115. VRS L100.1
- 116. VRS L101.2
- 117. VRS L101.3
- 118. VRS L102.1
- 119. VRS L103.1
- 120. VRS L104.1
- 121. VRS L105.1
- 122. VRS L106.1
- 123. VRS L107.1
- 124. VRS L108.1
- 125. VRS L109.1
- 126. VRS L110.1
- 127. VRS L111.1
- 128. VRS L112.1
- 129. VRS L113.1
- 130. VRS L114.1
- 131. VRS L115.1
- 132. VRS L116.1
- 133. VRS L117.1
- 134. VRS L118.1
- 135. VRS L119.1
- 136. VRS L120.1
- 137. VRS L121.1
- 138. VRS L122.1
- 139. VRS L123.1
- 140. VRS L124.1

Kontrollprofile:

- 141. VRS T1.9
- 142. VRS T2.8
- 143. VRS T2.9
- 144. VRS T3.9
- 145. VRS T4.8
- 146. VRS T4.9
- 147. VRS T5.8
- 148. VRS T4.8
- 149. VRS T6.9
- 150. VRS T7.8
- 151. VRS T7.9
- 152. VRS T8.9

Abkürzungen

° , ' ,	Grad, Minute
°C	Grad Celsius
%, ‰	Prozent, Promille
1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional
α , β , γ , a	Einstreuratzen
α_e , β_e , γ_e	höhenkorrigierte Einstreuratzen
α_n	komplexe Wellenzahl (n =0: Luft)
a	Zählrate der Hintergrundstrahlung des Hubschraubers inkl. des Messsystems
a_x	Korrekturfaktoren für Radonstrahlung (x = 1, 2, U, Th, K, TC)
A, A'	Amplituden
Ah	Amperestunden
Am	Amperemeter
As	Amperesekunden
A/D	analog/digital
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AG	Aktiengesellschaft
ALT	transformierte Sensorhöhe
AMP_KOR	Amplitudenkorrektur
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
b	kosmische Einstreuung
Bi	Bismut
B_n	Schichtadmittanz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
c_l	effektive Kabellänge
cm	Zentimeter
cps	counts per second
C	Gehalt eines Radioelementes im Boden
C_0	Radioelementgehalt am Boden
C_D	Radioelementgehalt, beeinflusst von der Vegetation
C_H	Zählrate im Höhenstrahlungskanal
Cs	Cäsium
CF	Compact Flash
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CHECK	Marker für gelöschte Datenbereiche

CSRS	Canadian Spatial Reference System
δ	Residual
δ_p	inverse, normierte Skintiefe (= h/p)
Δ	Differenz
Δh_l	reduzierte Laserhöhe
$\Delta h_{l_{kor}}$	korrigierte reduzierte Laserhöhe
$\Delta h_{l_{max}}$	Maximalwerte der reduzierten Laserhöhe
$\Delta h_{l_{noise}}$	Standardabweichung der reduzierten Laserhöhe
$\Delta \log d_a$	Niveaufehler d_a
$\Delta \log \rho_a$	Niveaufehler $\log \rho_a$
ΔI	Nullniveaufehler der In-phase-Komponente
ΔQ	Nullniveaufehler der Quadrature-Komponente
ΔT	Anomalien des erdmagnetischen Feldes
ΔV	magnetische Tagesvariationen
d_a	scheinbare Tiefe
d_n	Schichtmächtigkeiten
D	Vegetationshöhe
D_a	scheinbarer Abstand
DC	Gleichstrom
DEM	Digitales Höhenmodell
DESMEX	Deep Electromagnetic Soundings for Mineral Exploration (BMBF Forschungsprojekt)
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DH	Differenz aus DEM und topo
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DTK	Digitale Topographische Karte
DVD	Digital Versatile Disc
ε	Komponentenverhältnis (= Q/I)
$\varepsilon, \varepsilon_n$	dielektrische Permittivität ($n = 0$: Luft, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm)
e	Basis des natürlichen Logarithmus ($1/e \approx 0.37$)
eTh	Äquivalentgehalt von Thorium
eU	Äquivalentgehalt von Uran
E	Ionendosisleistung am Erdboden
EDAJ	ICAO-Flughafen-Code: Gera-Leumnitz
EM	Elektromagnetik
ETRS	European Terrestrial Reference System
f	Frequenz
flt	ArcGIS GRIDFLOAT-Format
ft	feet (Fuss)
F	IGRF

FAS	Fugro Airborne Surveys (heute: CGG)
FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik
FONA	Forschung für Nachhaltige Entwicklung
G	Temperaturkoeffizient (= 0,0065 K/m)
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GCG	German Combined QuasiGeoid
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	globales Navigationssatellitensystem
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
h	Höhe des EM-Systems in Meter über der Erdoberfläche (Flugsondenhöhe)
h ₀	Normhöhe des Spektrometers (h ₀ = 80 m)
h _e	effektive Höhe (in Metern)
h _r	Radarhöhe des Hubschraubers (in Metern)
H_GPS	GPS-Höhe des Hubschraubers
h_GPS	GPS-Höhe der Flugsonde
h_GPS_kor	korrigierte GPS-Höhe der Flugsonde
h_kpa	barometrischer Höhenkanal
h_l	Laserhöhe der Flugsonde
h_l_kor	korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_l_DEM_kor	DEM-korrigierte Laserhöhe der Flugsonde
h_r	Radarhöhe der Flugsonde (in Metern)
hPa	Hektopascal
Hz	Hertz
HCP	horizontal-koplanar
HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HMG	Hubschraubermagnetik
HRD	Hubschrauberradiometrie
i	Laufparameter (Daten)
i	imaginäre Einheit
I	In-phase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten
I _c	berechnete In-phase-Komponente
I _{lev}	korrigierte In-phase-Komponente
I _{noise}	Fehler der In-phase-Komponente
IfE	Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover
IAEA	International Atomic Energy Association
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IBS	interaktive Bereichsselection
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation
IGRF	International Geomagnetic Reference Field

IPHT	Leibniz Institut für Photonische Technologien
J_0	Bessel-Funktion (1. Art, 0. Ordnung)
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kpa	barometrischer Druck
kPa	Kilopascal
K	Grad Kelvin
K	Kalium
Kn	Knoten
λ	Wellenzahl
l	Liter
log	Logarithmus
L	Messprofilkennung (line)
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
μ	Absorptionskoeffizient
μ, μ_n	magnetische Permeabilität ($n = 0$: Luft, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am)
μ_v	Abschwächungskoeffizient der Vegetation
$\mu\text{R/h}$	Mikroröntgen pro Stunde
m	Meter
m NHN	Meter über Normalhöhennull
ms	Millisekunde
mxd	ArcGIS-Datenformat
MeV	Megaelektronenvolt
MHz	Megahertz
n	Laufparameter (Modellparameter)
nT	Nanotesla
n_R	Rohzählrate
N	Anzahl Frequenzen
N_c	Zählrate der Hintergrundstrahlung
N_L	Anzahl Schichten
N_m	Zählraten $N_{\text{Th}(\text{corr})}$, $N_{\text{U}(\text{corr})}$, $N_{\text{K}(\text{corr})}$ und $N_{\text{c,TC}}$ bei effektiver Höhe h_e
N_R	registrierzeitkorrigierte Rohzählrate
N_s	Zählraten N_m , bezogen auf die Standardhöhe h_0
N_x	bzgl. Hintergrundstrahlung und STP-Bedingungen korrigierte Zählraten ($x = \text{K}, \text{U}, \text{Th}$)
$N_{x(\text{corr})}$	bzgl. der Einstreuratens korrigierte Zählraten ($x = \text{K}, \text{U}, \text{Th}$)
NaI	Natriumiodid

N, NO, NW	Norden, Nordosten, Nordwesten
NASVD	noise adjusted singular value decomposition
NHN	Normalhöhennull (Höhe nach DHHN92)
NL	nicht-linear
ω	Kreisfrequenz
Ω_m	Ohmmeter (Ohm*m)
O	Osten
π	Kreiszahl (= 3,14159265...)
p	Skintiefe
ppm	parts per million
P	im Hubschrauber gemessener Luftdruck
P*	für Flughöhe berechneter Luftdruck (kPa),
P_0	mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe ($P_0 = 101,325$ kPa)
P_m	Tagesmittel des Luftdrucks, Station Gera-Leumnitz
PHA_KOR	Phasenkorrektur
PC	Personalcomputer
PDF	Portable Document Format
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
Q_c	berechnete Quadrature-Komponente
Q_{lev}	korrigierte Quadrature-Komponente
Q_{noise}	Fehler der Quadrature-Komponente
QCP, QCPM	Datenqualitätsparameter und -marker für HEM-Daten
ρ, ρ_n	spezifischer (Schicht-)Widerstand ($n = 0$: Luft, $\rho_0 > 10^8 \Omega m$)
ρ_a	scheinbarer spezifischer Widerstand
r	Abstands- oder Ortsparameter
R_1	komplexer Reflexionsfaktor
Rn	Radon
s	Sekunde
S	Sensitivität
SHP	Shaft Horse Power
SO, SW	Südosten, Südwesten
STD	Gesamtrauschen (Summe aller rel. STF)
STF	Standardfehler
STP	Standard-Temperatur-Druck
t	Zeit
t_L	aktive Registrierzeit des Spektrometers
tanh	Tangens Hyperbolicus
topo	topografische Höhe
T	Kontrollprofilkennung (tieline)
T	Totalintensität des erdmagnetischen Feldes

T	Temperatur
T ₀	Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala (273,15 K)
Th	Thorium
Tl	Thallium
TC	Gesamtstrahlung
TEN	Thüringer Energienetze GmbH
TP	Tiefpass
U	Uran
U_UP	Urankanal (noch oben schauend)
U _R	Anteil Radon im Urankanal
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
UTM	Universal Transverse Mercator Projection
V	Volt
V _m	Voltmeter
V _s	Voltsekunde
VCX	vertikal-koaxial
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
WGS	World Geodetic System
xyz	Geosoft-Format (ASCII-Daten)
X, Y, Z	kartesische Koordinaten, X = N, Y = O, Z = Tiefenachse
z	Tiefe
z*	Schwerpunktstiefe (zst)
Z	relatives magnetisches Sekundärfeld

1. Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt ein vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) gefördertes Projekt DESMEX (Deep Electromagnetic Soundings for Mineral Exploration) durch. In diesem Projekt wird ein neues *semi-airborne* Verfahren (elektromagnetische Sender am Boden, Empfängersonden vom Hubschrauber geschleppt) entwickelt, mit dem mineralische Rohstoffe bis in 1000 Metern Tiefe erkundet werden sollen. Verbundpartner der BGR sind die Westfälische Wilhelms-Universität Münster, die Universität zu Köln und die Technische Universität Bergakademie Freiberg, das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) in Hannover, das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT) in Jena sowie die Firmen Supracon AG, Jena, und Metronix GmbH, Braunschweig. Weiterhin begleitet die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie das Projekt.

Bei der in diesem Bericht beschriebenen Messkampagne handelt es sich um eine Vorerkundung mit dem Hubschraubermesssystem der BGR, die vom Arbeitsbereich Aerogeophysik im Mai 2015 zwischen den Städten Schleiz und Greiz (Thüringen) durchgeführt wurde. Die geophysikalischen Messflüge mit dem BGR-Hubschrauber starten vom Flughafen Gera-Leumnitz.

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

Während des Fluges wurden die HEM- und HMG-Daten zehnmal und die HRD-Daten einmal pro Sekunde aufgezeichnet, was auf einen mittleren Messpunktabstand von etwa 4 m bzw. 40 m führte. Die mittlere Höhe der Flugsonde lag bei etwa 48 m über Gelände. Die Flugsonde befand sich während der Messung im Mittel etwa 40 m unter dem Hubschrauber. Mit insgesamt 124 Mess- und 8 Kontrollprofilen wurde eine Fläche von etwa 445 km² vermessen. Mit den Messflügen wurden insgesamt 3188 km geflogen und 766.230 Messpunkte erfasst, was einer Gesamtregistrierzeit von etwa 21 Stunden entspricht. Davon konnte etwa die Hälfte bei der Auswertung verwendet werden.

Mit elektromagnetischen Messungen kann die elektrische Leitfähigkeit von Gesteinsschichten im Untergrund bestimmt werden. Bei dieser Vorerkundung wurde der Untergrund des ehemaligen Bergbaugebietes bis in eine Tiefe von etwa 150 Metern kartiert. Die magnetischen Messungen liefern zusätzlich Informationen über die magnetischen Eigenschaften der Gesteinsschichten. Mit den ausgewerteten Daten lassen sich unter anderem Aussagen ableiten, welche elektrisch leitenden bzw. magnetischen Strukturen sich im Untergrund befinden, die Hinweise auf potenzielle Lagerstätten geben können. Die radiometrischen Messungen geben nur Auskunft über die Deckschicht an der Erdoberfläche.

Die bei den Messflügen gewonnenen Daten sollen einerseits neben geologischen Überlegungen als Entscheidungsgrundlage für die Gebietsbestimmung des Hauptexperimentes dienen, andererseits in das Lagerstättenmodell am Ende des Projektes einfließen. Die Daten stehen nach Abschluss des Projektes über das Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP) des LIAG zur Verfügung.

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 Schwerpunktstiefen für sechs Messfrequenzen 380, 1.770, 5.410, 8.300, 41.000 und 129.500 Hz;
- Spezifische Widerstände in den Tiefen 5, 10, 15, 30, 50, 75, 100, 125 und 150 m unter GOK, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten;
- Qualitätskontrollparameter für HEM-Daten;
- Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes;
- Gesamtstrahlung, Gehalte von Kalium im Boden, Äquivalenzgehalte von Thorium und Uran im Boden und Dosisleistung am Boden sowie ternäre Darstellung von K, eU und eTh.

Ferner sind für alle Fluglinien Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit 6 bzw. 20 Schichten im horizontalen Maßstab 1:50.000 mit 10-facher Überhöhung 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) führte im Mai 2015 zwischen den Städten Schleiz und Greiz (Thüringen) geophysikalische Messflüge mit dem Standardmesssystem der BGR-Hubschrauber-geophysik durch. Bei der Messkampagne handelt es sich um eine Vorerkundung des vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) geförderten Projektes DESMEX (Deep Electromagnetic Soundings for Mineral Exploration).

DESMEX läuft unter der Förderrichtlinie „r⁴ - innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe“ mit dem Förderkennzeichen 033R130A und ist Teil des BMBF-Rahmenprogrammes „Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA)“. Verbundpartner der BGR sind die Westfälische Wilhelms-Universität Münster, die Universität zu Köln und die Technische Universität Bergakademie Freiberg, das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) in Hannover, das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT) in Jena sowie die Firmen Supracon AG, Jena, und Metronix GmbH, Braunschweig. Das Ziel des Verbundvorhabens ist der Aufbau eines elektromagnetischen (EM) Explorationssystems, mit dem flächenhaft sowie mit möglichst hoher Auflösung Eindringtiefen bis 1000 m erreicht werden können und das unter den Störfeldbedingungen in Deutschland für die Exploration mineralischer Rohstoffe einsetzbar ist. Dazu sollen die jeweiligen Vorteile von boden- und luftgestützten EM-Messungen unter dem Einsatz neuester Technologien in einem *semi-airborne* EM-Konzept verbunden und für die Lagerstättenexploration genutzt werden. Bei einem *semi-airborne* Verfahren befinden sich die Sender am Boden und die Empfänger werden von einem Luftfahrzeug geschleppt. Als Untersuchungsgebiet sind die Antimonit-führenden Gänge/Trümer bei Schleiz und Greiz im Bergaer Antiklinorium (Ostthüringer Schiefergebirge) vorgesehen (Dill, 1993). Durch das Zusammenspiel von EM-Exploration und objektbezogenen mineralogisch-geochemischen und petrophysikalischen Analysen soll ein besseres Verständnis der Tiefenerstreckung und lateralen Ausdehnung, der Genese und der Höffigkeit der Lagerstätte erlangt werden.

Die bei den Messflügen mit dem Standardmesssystem der Hubschrauber-geophysik der BGR gewonnenen Daten sollen einerseits neben geologischen Überlegungen als Entscheidungsgrundlage für die Gebietsbestimmung des Hauptexperimentes dienen, andererseits in das Lagerstättenmodell am Ende des Projektes einfließen. Für die Gebietsauswahl sind die Datenqualität (Stärke des anthropogenen elektromagnetischen Rauschens), die geophysikalische Signatur von noch zu bestimmenden geogenen Einheiten, aber auch logistische Überlegungen für die Bodenstationen entscheidend.

Vorläufige Ergebnisse sind bereits in der ersten Projektphase den Verbundpartnern in Form eines Zwischenberichtes (Steuer et al., 2015) übergeben worden.

Mit den Messflügen wurden insgesamt 3188 km geflogen und 766.230 Messpunkte erfasst, was einer Gesamtregistrierzeit von etwa 21 Stunden entspricht. Mit insgesamt 124 Mess- und 8 Kontrollprofilen wurde eine Fläche von etwa 445 km² vermessen. Mehrere Mess- und Kontrollprofile mussten aufgrund zu geringer Datenqualität (z. B. über Ortschaften) unterbrochen und geteilt werden, sodass sich die Zahl der abgegrenzten Mess- und Kontrollprofile auf 140 bzw. 12 erhöhte. Einige Profile sind während der Auswertung nach Süden hin verlängert worden, da sich zum Ende der Profile einige interessante Leitfähigkeitsstrukturen abzeichneten. Somit ergab sich eine Gesamtlänge von 1591 Profilkilometern mit 374.072 Datenpunkten. In **Abbildung 2** sind die Profile dargestellt.

Die Messprofile (Lines) sind durch L*.1 und die Kontrollprofile (Tielines) durch T*.9 gekennzeichnet. Profile, die unterteilt bzw. wiederholt wurden, sind durch L*.2 bzw. T*.8 gekennzeichnet. Einzelheiten zum Messgebiet und den Messflügen können aus **Tabelle 1** und **Tabelle A-1** entnommen werden. Alle Karten in diesem Technischen Bericht haben als Hintergrund georeferenzierte Rasterdaten der topografischen Karte 1: 50.000 (DTK50-V, BKG).

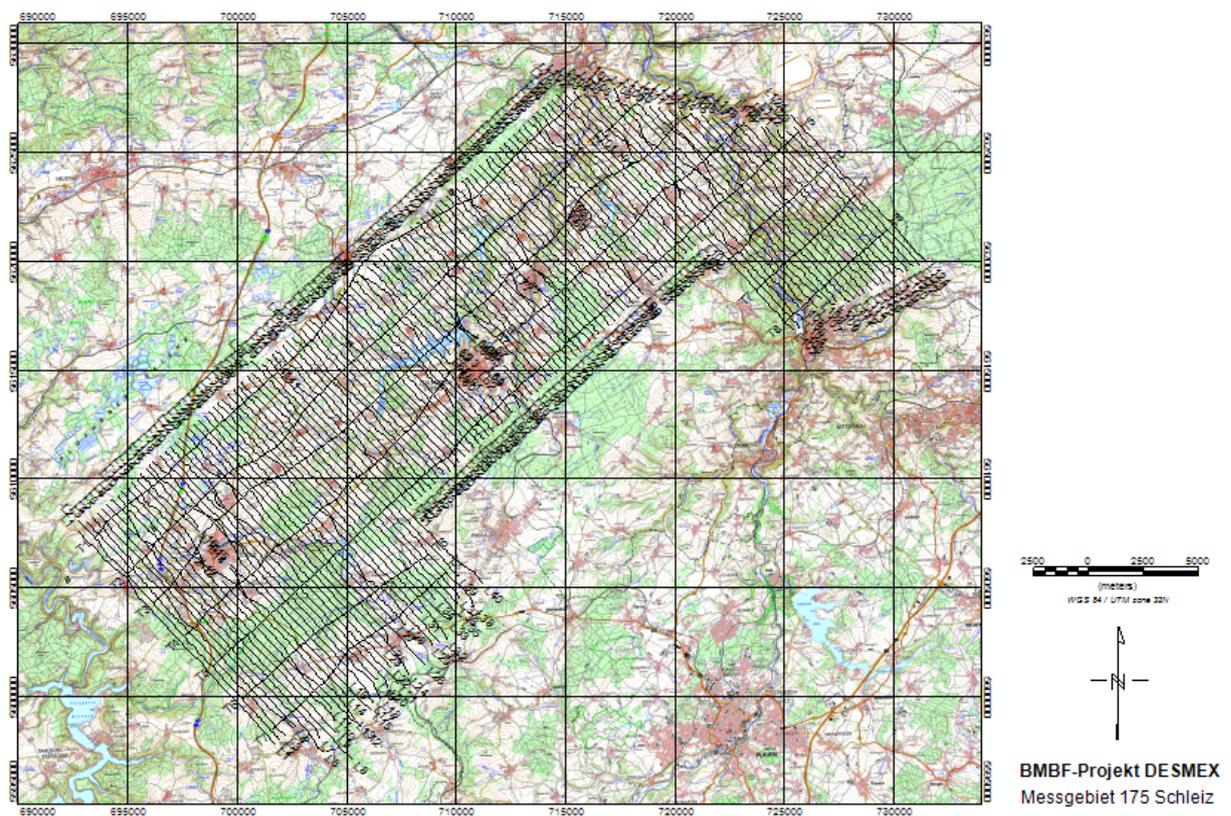


Abbildung 2: *Fluglinienkarte für das Messgebiet Schleiz (Datenbasis für die Produktion der thematischen Karten); Hintergrund: DTK50-V, BKG.*

Tabelle 1: Technische Daten der Befliegung Schleiz

Messgebiet BGR-Gebietsnummer	Schleiz 175
Befliegungszeitraum	05.–12.05.2015
Größe des Messgebietes	445 km ²
Gesamtprofilkilometer	1591 km
Zahl der Messflüge	10
Bezeichnung der Messflüge	17501–17510
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	48 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit über Grund	153 km/h
Mittlerer Messpunktabstand	4,25 m
Zahl der Messprofile	124 (140)
Länge der Messprofile	8,6–15,3 km
Richtung der Messprofile	317° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	300 m
Zahl der Kontrollprofile	8 (12)
Länge der Kontrollprofile	6,3–36,4 km
Richtung der Kontrollprofile	47° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	2000 m

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Schleiz 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 mit Flugsonde, die etwa 40 m tiefer hängt, beträgt entlang der Messprofile 70 m über der Erdoberfläche (**Abbildung 3**). Über Wald, bebauten Gebieten und Hochspannungsleitungen kann die niedrige Flughöhe aus Sicherheitsgründen nicht immer eingehalten werden. Daher liegt die mittlere Flughöhe der Flugsonde meist oberhalb von 30 m. Bei der Befliegung des Messgebietes Schleiz lag sie bei etwa 48 m über der Erdoberfläche. Während eines Messfluges, speziell vor dem ersten und nach dem letzten Profil, aber auch zwischen den Profilen, 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 auf dem Flughafengelände bei 12,1396° östlicher Länge und 50,8785° 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**).

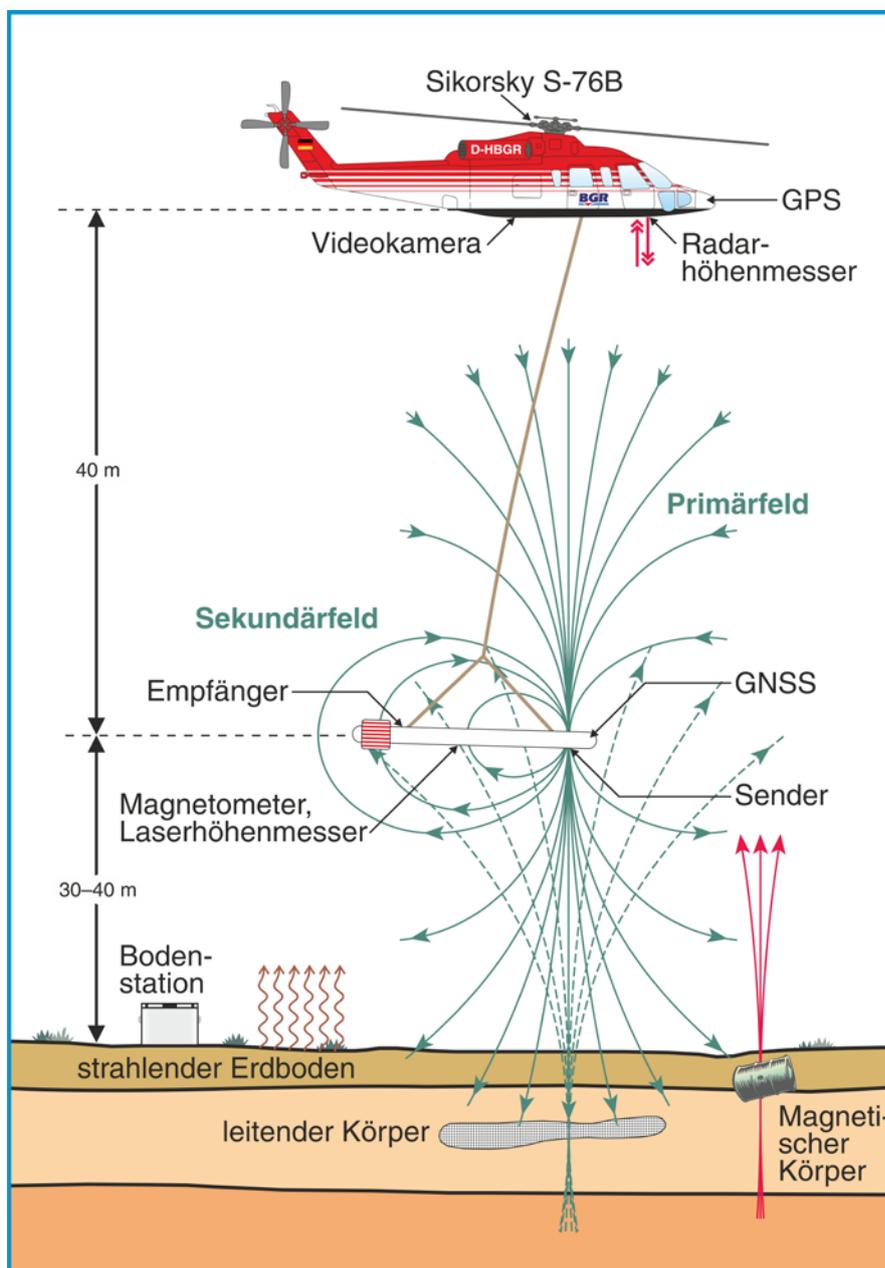


Abbildung 3: *Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR*

4.1. Messhubschrauber

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

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

Hubschrauber	
Typ	Sikorsky S-76B (Hersteller: Sikorsky, USA)
Baujahr	1986
Antrieb	2 Turbinen Pratt & Whitney PT6B-36A mit je 1.033 SHP (<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	2:45 Stunden
Kerosinverbrauch pro Stunde	300–350 l

4.2. Messausrüstung

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

Die geophysikalischen Messgeräte werden zentral durch das HeliDAS (**Kapitel 4.7**) gesteuert, das auch die Datenerfassung und -speicherung sowie die Navigation während des Messfluges unterstützt. Hierzu können sowohl der Operator als auch der Navigator auf den Displays ihrer Tablet-Computer diverse Informationen, wie z. B. den Flugweg oder die jeweiligen Messkanäle, grafisch darstellen lassen.

Tabelle 3: Geophysikalische Messsysteme

Geophysikalische Messsysteme		
Flugsonde	I. Elektromagnetisches 6-Frequenz-Messsystem (HEM)	
	Aufgabe	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes bis zu Tiefen von etwa 150 m
	Hersteller	Fugro Airborne Surveys (FAS), Kanada; in 2013 übernommen von CGG (Compagnie Générale de Géophysique)
	Gerätebezeichnung	Resolve BGR, BKS60 (intern: 60)
	II. Cäsiummagnetometer	
	Aufgabe	Messung des erdmagnetischen Totalfeldes
	Hersteller	Geometrics, USA
	Gerätebezeichnung	G-822A
Hubschrauber	III. Gammastrahlenspektrometer	
	Aufgabe	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
	Hersteller	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 (siehe **Abbildung 3**).

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

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

Tabelle 4: HEM-Systemparameter für BKS60

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
380	7,918	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.770	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 Empfängerspulen liegen, werden definierte Ausschläge im Messsignal erzeugt und in der Einheit ppm angegeben. Diese relative Einheit wird benutzt, da das Sekundärfeld, das sehr viel kleiner als das Primärfeld ist, auf das Primärfeld am Ort der Empfängerspule normiert wird. Die hierzu notwendigen Umrechnungsfaktoren von der gemessenen Spannung in V in ppm wurden vom Hersteller geliefert.

Die Größe der empfangenen Sekundärfelder sowie ihre zeitliche Verzögerung gegenüber den erzeugenden Primärfeldern werden registriert. Aus diesen beiden Größen, Amplitude und Phasenverschiebung oder Real- und Imaginärteil (In-phase I und Quadrature Q), kann die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes bzw. deren Kehrwert, der spezifische Widerstand, berechnet werden, wobei die Felder der verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Eindring- oder Aussagetiefen haben. Je niedriger die Frequenz ist, umso tiefer dringen die elektromagnetischen Felder in den Untergrund ein. Die Eindringtiefe hängt aber auch vom spezifischen Widerstand im Untergrund ab: Je höher er ist, desto größer ist auch das Eindringen der Felder. Mit der niedrigsten Frequenz von 380 Hz lassen sich unter günstigen Voraussetzungen Erkundungstiefen bis zu 150 m erreichen.

Das HEM-Messsystem ist nicht nur gegenüber dem elektrisch leitenden Untergrund empfindlich, sondern auch gegenüber anthropogenen Objekten, wie z. B. Bebauungen, metallischen Körpern und elektrischen Installationen, welche sich aufgrund der Frequenzabhängigkeit der HEM-Amplituden insbesondere bei den Daten der niedrigen Messfrequenzen bemerkbar machen können. Da der Hubschrauber auch als ein solches Objekt anzusehen ist, ist das HEM-System in einer Flugsonde eingebaut und wird in genügend großem Abstand (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 so genannten Larmor-Frequenz, welche sich in einem speziellen optisch gepumpten System einstellt. Diese Frequenz ist direkt proportional zur magnetischen Feldstärke und lässt sich mit hoher Genauigkeit bestimmen. Die Auflösung der magnetischen Registrierungen beträgt 0,01 nT.

Das gemessene Magnetfeld setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen. Das magnetische Normalfeld der Erde hat seine Ursache im Erdinneren und weist eine vom Äquator zu den Polen hin zunehmende Intensität auf. In Deutschland hat es eine Stärke von etwa 49.000 nT. Es wird vom Krustfeld 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 (**Kapitel 4.7**) werden die 1024-kanaligen Spektren auf 256 Kanäle abgebildet. Mit diesen Daten erfolgt die Standardprozessierung. Für spezielle Anwendungen kann auch auf die vollen 1024-kanaligen Spektren zugegriffen werden, welche auf einen USB-Stick gespeichert werden. **Tabelle 6** zeigt die Zuordnung der Strahlungsquellen zu den Kanälen in den aufgezeichneten Spektren. Die Aufzeichnung des Energiebereichs von Uran erfolgt getrennt für die nach unten gerichteten und den nach oben gerichteten Kristallen.

4.6. Navigations- und Positionierungssystem

Ein GPS-Empfänger, dessen Antenne außen am Hubschrauber montiert ist, liefert laufend Positionsangaben an das Navigationssystem. Die GPS-Daten werden zusammen mit den geophysikalischen Daten im HeliDAS (**Kapitel 4.5**) 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 ins HeliDAS importiert und auf dem Bildschirm des Tablet-Computers dargestellt, wobei das jeweils aktuelle Messprofil grafisch hervorgehoben wird.

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

Tabelle 7: Navigations- und Positionierungssysteme

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

Aufgabe des globalen Navigationssatellitensystems (GNSS, **Tabelle 7**) ist es, zu jeder geophysikalischen Messung die Koordinaten zu liefern. Dafür wird ein 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 absolute Höhe des Hubschraubers bestimmt, die jedoch ohne Verwendung einer Referenzstation am Boden oder einem anderen Korrekturverfahren einen Fehler von einigen Metern aufweisen kann. Die Flughöhe des Hubschraubers (**Tabelle 8**) über der Erdoberfläche bzw. über Hindernissen (z. B. Wäldern und Gebäuden) wird im Normalfall zur Auswertung der radiometrischen Daten benötigt. Sie wird über die Differenz der GPS-Höhe des Hubschraubers und einem digitalen Geländemodell, 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 absoluten Höhe des Hubschraubers
	Hersteller	FAS, Kanada
	Gerätebezeichnung	HeliDAS
Flugsonde	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 (**Helicopter Data Acquisition System**). Die Datenspeicherung erfolgt auf einer Compact Flash (CF) Karte. Das HeliDAS (**Tabelle 9**) ist mit zwei Tablet-Computern verbunden. Auf diesen werden während des Messfluges die eingehenden Mess- und Positionsdaten grafisch dargestellt. Die Darstellungen dienen dem Operator zur Kontrolle der Messdaten und dem Navigator zur Kontrolle des Flugweges.

Tabelle 9: Datenerfassung und -aufzeichnung

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

4.8. Videosystem

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

4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber

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

Tabelle 10: Sonstige Ausrüstung

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

5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten

Die Ziele der Datenverarbeitung können wie folgt zusammengefasst werden:

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

Die Auswertung der aerogeophysikalischen Daten zu den Methoden Elektromagnetik, Magnetik und Radiometrie wird – je nach Anforderung – in verschiedenen Auswertebenen (*Level*) durchgeführt.

Tabelle 11 zeigt diese Auswertungsebenen in der Übersicht für die Elektromagnetik.

Tabelle 11: HEM-Auswertung (Übersicht)

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

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

5.1. Prozessabläufe

Die aerogeophysikalischen Daten werden bereits während des Feldbetriebes auf Plausibilität sowie technische und formale Korrektheit überprüft. Hierzu werden die Messdaten direkt nach Beendigung eines Messfluges von der Speicherkarte auf PC oder Laptop übertragen, mit 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 (Steuer et al., 2015), der in der Regel auf diesem Bearbeitungsstand basiert, sind die Ergebnisse nach einigen weiterführenden Bearbeitungsschritten, z. B. die grundlegenden Niveaurekturen, beschrieben.

Die finale Datenbearbeitung beginnt mit der Bearbeitung der Positionsdaten:

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

Die folgenden Datenverarbeitungsschritte sind für alle Methoden gültig:

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

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

5.2. Positionsdaten

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

5.2.1. GPS-Koordinaten

Die während des Fluges registrierten Koordinaten, die die Positionen des Hubschraubers und der Flugsonde angeben, beziehen sich auf das WGS84-System. Diese geografischen Koordinaten werden mittels Oasis montaj für die Flugsondenposition in ein lokales, kartesisches Koordinatensystem transformiert, wobei auch fehlende Koordinatenwerte durch lineare Interpolation ergänzt werden. Alle Ergebnisse für das Messgebiet Schleiz sind auf ETRS89-Koordinaten (UTM-Zone 32N) bezogen.

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

vom Dienst gelieferten Ellipsoidhöhen der präzisen Koordinaten werden unter Verwendung des Geoidundulationsmodells GCG2011 auf in der Kartografie übliche Geoidhöhen umgerechnet und anschließend ebenfalls in das lokale Koordinatensystem UTM-Zone 32N transformiert. Das GCG2011 (*German Combined QuasiGeoid 2011*) wurde durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und das Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover (IfE) in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) entwickelt.

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

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

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

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 weiteren Verlauf der Auswertung wurde die GPS-Höhe der Flugsonde (h_{GPS}) unter Verwendung eines digitalen Geländehöhenmodells (DEM, hier: DGM25, BKG, siehe **Kapitel 5.2.5**) und der gemessenen Laserhöhen korrigiert (h_{GPS_kor} , siehe **Kapitel 5.2.3**). Hierzu wurden die topografischen Höhen aus den Messdaten abgeleitet (siehe **Kapitel 5.2.5**) und mit dem Geländemodell verglichen. Die geglättete Differenz aus beiden diente schließlich als Korrektur. Im Mittel lag die effektive Kabellänge im Messgebiet Schleiz bei $c_1 = 38,6 \text{ m}$ ($\pm 1,3 \text{ m}$) und somit etwas unterhalb des üblichen Wertes von $39,5 \text{ m}$.

5.2.2. Radarhöhen

Die Radarhöhenwerte, die vom Hubschrauber aus gemessen werden, sind nur bis 2010 der Datenerfassung zugeführt worden. Daher wurden bei der Befliegung Schleiz 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:

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

5.2.3. Laserhöhen

Die mit einem Laserhöhenmesser gemessenen Höhen der Flugsonde über Gelände (h_l) 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 reduzierte Laserhöhe (Δh_l), deren Mittelwert bei null liegt, berechnet, indem eine Basislinie der Laserhöhe bestimmt (Tiefpass-Abschneideperiode = 5 s, d. h. 50 Werte) und von dieser abgezogen wird. Danach erfolgt die Berechnung der Standardabweichungen ($\Delta h_{l_{noise}}$) und der Maximalwerte ($\Delta h_{l_{max}}$) der reduzierten Laserhöhe in vorgegebenen Intervallen mit Fensterbreiten von jeweils 7 bzw. 21 Messwerten, wobei einzelne Ausreißer der Standardabweichung durch Anwendung eines schmalen (2 Werte) nicht-linearen (NL) Filters eliminiert werden. Anschließend werden die reduzierten Laserhöhenwerte, 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. Die zur Orientierung (in Klammern) angegebenen Umrechnungen der Filterlängen von Sekunden bzw. Werten in Meter erfolgte unter Annahme eines mittleren Punktabstandes von 4 m. Sollten die wahren mittleren Punktabstände hiervon abweichen, ergeben sich andere Meterangaben.

Tabelle 12: Filterparameter für die Korrektur der Laserhöhe in Bereichen mit Vegetation

Filter	Filterparameter	Bezugsparameter
Tiefpass	Abschneideperiode: 5 s (≈ 200 m)	h_l
Standardabweichung	Filterlänge: 7 Werte (≈ 28 m)	Δh_l
Nicht-linear	Filterlänge: 2 Werte (≈ 8 m), Toleranz: 1.0	$\Delta h_{l_{noise}}$
Tiefpass	Abschneideperiode: 1 s (≈ 40 m)	$\Delta h_{l_{noise}}$
Nicht-linear	Filterlänge: 1 Wert (≈ 4 m), Toleranz: 2,0	Δh_l
Schwellwert	Schwellwert ($\Delta h_{l_{noise}}$): 0,2 m	Δh_l
Maximum	Filterlänge: 21 Werte (≈ 84 m)	Δh_l
Schwellwert	Schwellwert ($\Delta h_{l_{max}} - \Delta h_l$): 2 m	Δh_l
Tiefpass	Abschneideperiode: 1 s (≈ 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 6°) verursacht werden, sind leicht durch Anwendung der Kosinusfunktion zu korrigieren. Schwieriger ist es jedoch, die Fehler, die durch Pendelbewegungen verursacht sind, zu reduzieren. Das Nachschleppen der Flugsonde an einem etwa 45 m langen Seil in Verbindung mit Flugmanövern und Wind führt zu Pendelschwingungen senkrecht (bei Richtungsänderungen) und parallel (bei Geschwindigkeits- oder Höhenänderungen) zur Flugrichtung. Folglich werden die tatsächlichen (senkrechten) Abstände zum Erdboden überschätzt, da die Flugsonde nicht exakt horizontal hängt und somit der Laserstrahl nicht 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 Schleiz 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**):

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

Daraus ergab sich eine mittlere Laserhöhe von 48 m (± 20 m).

5.2.4. Barometrische Höhen

Die barometrische Höhe des Hubschraubers wird durch einen Druckmesser erfasst. Mit Hilfe der barometrischen Höhenformel können die Druckwerte kpa (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 wird dieser barometrische Höhenkanal mit einem Tiefpass-Filter über 5 s (50 Werte) geglättet und ggf. eine Trendkorrektur aufgrund von Luftdruckänderungen angebracht. Aufgrund eines Defektes im Druckmesser waren die Absolutwerte nicht zu gebrauchen. Die Änderungen konnten jedoch für die Berechnung der Höhe verwendet werden. Hierzu wurde eine Trendkorrektur, die auf der mittels mit einem Spline-Filter (Glätte 0,7, Spannung 0,5) geglätteten Differenz aus h_{kpa} und H_{GPS} basiert, angebracht.

5.2.5. Topografische Höhen

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

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

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

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

an die GPS-Höhe angebracht wurde:

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

5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik

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

- Berücksichtigung der Kalibrierung;
- Verschiebungs- und Driftkorrektur;
- Datenauswahl und -korrektur;
- Korrektur von anthropogenen Effekten;
- Transformation in Halbraumparameter;
- Statistische Niveauekorrektur;
- Interpolation und Glättung;
- Inversion in Widerstands-Tiefen-Modelle.

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

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

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

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

5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems

Das HEM-System wurde von dem Hersteller Fugro Airborne Surveys (FAS) mit Hilfe von externen Spulen auf schlecht leitendem Untergrund in Kanada (Mountsburg 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 (**Tabelle 13**) werden benutzt, um die I- und Q-Werte in ppm anzugeben.

Zu Beginn eines Messfluges werden in großer Flughöhe die durch die internen Kalibrierspulen hervorgerufenen Ausschläge überprüft und das Messsystem wird automatisch anhand von Sollwerten (HeliDAS SYS14, **Tabelle 13**) nachjustiert (Autokalibrierung). Da Temperaturänderungen Einfluss auf die Messelektronik haben können, werden die internen Kalibrierspulen mehrmals während eines Messfluges eingeschaltet, um Phasenlagen und Verstärkungen für alle Frequenzen zu kontrollieren.

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

Frequenz f [Hz]	Kalibrierwerte FAS 2005		HeliDAS-Werte SYS14* I, Q [ppm]	Mittlere Korrekturen	
	I [ppm]	Q [ppm]		AMP_KOR	PHA_KOR [°]
380	-215,5	-214,9	-215,9	0,96	0,0
1.770	-216,3	-216,2	-214,9	0,99	0,0
5.410	108,9	106,4	106,1	0,75	0,7
8.300	-224,6	-224,8	-224,9	1,02	0,1
41.000	-577,3	-580,7	-581,9	1,05	1,5
129.500	-585,4	-580,6	-566,9	1,15	-1,0

aus SYS14_FLT0000.i2

Bei der Kalibrierung am Boden sind Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht auszuschließen. Daher werden – sofern möglich – die Kalibrierfaktoren über Salzwasser in Messflughöhe überprüft. Bei der Befliegung des Messgebietes Schleiz bestand diese Möglichkeit leider nicht. Daher wurden die Korrekturen für die Kalibrierwerte verwendet, die über der Nordsee bei der Befliegung Zeeland (Siemon et al., 2014) bestimmt wurden (**Tabelle 13**). Bei den für das HEM-System BKS60 bestimmten Korrekturfaktoren traten die größten Abweichungen gegenüber den vom Hersteller gelieferten Werten bei den beiden höchsten Frequenzen und bei den Koaxialspulen auf.

5.3.2. Verschiebungs- und Driftkorrektur

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

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

Mit der oben beschriebenen Vorgehensweise lassen sich die langfristigen, quasi-linearen Driften in den Nullniveaus beseitigen. Kurzfristige Schwankungen des Nullniveaus, die besonders in der höchsten Messfrequenz und beim koaxialen Spulensystem zu beobachten sind, können damit nicht vollständig erfasst werden. Daher müssen zusätzliche Stützstellen – auch auf dem Profil – bestimmt werden, an denen die Sekundärfelder zwar klein (z. B. beim Überfliegen von Hindernissen wie Wäldern und Hochspannungsleitungen), aber nicht vernachlässigbar sind. An diesen Stellen werden die auf Basis der zu erwartenden Halbraumparametern berechneten Sekundärfelder als Bezugsniveau herangezogen (Siemon, 2009). Hiermit können nur Fehler der automatischen Nullniveauerfassung sowie einige deutliche Nullniveaufehler beseitigt werden. Insbesondere der Einfluss von lokalen und höhenbedingten Temperaturschwankungen kann zu Niveauunterschieden der Messgrößen zwischen den einzelnen Linien führen, was in den Karten als Streifenmuster zu erkennen wäre. Um diesen Effekt zu beseitigen, wird eine statistische Niveaueinpassung durchgeführt (siehe **Kapitel 5.3.6**), die auf aus den relativen Sekundärfeldwerten abgeleiteten Halbraumparametern beruht (siehe **Kapitel 5.3.4**).

5.3.3. Datenauswahl und -korrektur

Beim Importieren der HEM-Daten in HemView werden bereits Profilabgrenzungen aus einer Konfigurationsdatei berücksichtigt. Die meisten Datenverarbeitungsschritte beziehen sich zwar auf den gesamten Datensatz, aber Nachkorrekturen sind nur auf den Messprofilen notwendig. Während geringfügige Störungen durch geeignete Filterung unterdrückt werden können, müssen die durch externe

EM-Signale (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen, Sferics, Ortschaften, Bahnlinien) hervorgerufenen stärkeren Störungen markiert und vorerst eliminiert werden. Ebenso müssen Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen metallischen Installationen beruhen (siehe **Kapitel 5.3.5**), aus den Daten entfernt werden (**Tabelle 11**, Level 3). Diese Auswahl erfolgt zunächst automatisch und kann durch manuelle Nachkorrektur ersetzt bzw. erweitert werden.

Bei der automatischen Datenauswahl wird als Auswahlkriterium der relative Standardfehler verwendet, der aus dem Standardfehler (STF) innerhalb eines Intervalls um den jeweiligen Messwert berechnet und auf die gemittelten Daten (gleitendes Mittel von 75 Werten) normiert wird. Unterschreitet ein Amplitudenwert (I bzw. Q) den zugehörigen relativen Standardfehler, so wird dieser Wert eliminiert. Zur Unterdrückung von Ausreißern werden nicht-lineare Filter (NL) benutzt und zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die verbliebenen HEM-Daten anschließend mit einem Tiefpass-Filter (TP) geglättet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität sind unterschiedliche Filterparameter für die Daten der jeweiligen Frequenzen erforderlich (**Tabelle 14**).

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	0,30	20 / 3,0	30
1.770	25	0,30	20 / 2,0	30
5.410	20	0,30	10 / 2,0	30
8.300	15	0,25	10 / 2,0	20
41.000	15	0,25	5 / 2,0	20
129.500	15	0,25/0,50	10 / 2,0	30

Die manuelle Datenauswahl erfolgt in HemView durch Setzen von Markierungen, die leicht anzupassen sind und mit speziellen Optionen zur weiteren Behandlung der eliminierten Bereiche verknüpft sein können. Die eliminierten Daten sind von der weiteren Bearbeitung zunächst ausgeschlossen. Insbesondere werden auch keine Halbraumparameter (siehe **Kapitel 5.3.4**) abgeleitet. Des Weiteren kann die Berechnung der Halbraumparameter für große Sensorhöhen (z. B. >200 m) ausgesetzt werden, da selbst bei ansprechender Datenqualität diese Berechnung instabil wird und somit zu Verfälschungen führen könnte. Die eliminierten Datenbereiche können später auf Basis der in der Fläche interpolierten Halbraumparameter neu berechnet werden oder als Lücken bestehen bleiben (siehe **Kapitel 5.3.7**).

Ferner kann ein stark magnetisierter Untergrund die elektromagnetischen Messungen beeinflussen, da die magnetische Permeabilität (siehe **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 Schleiz

traten diese Effekte an einigen 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 $Z = (I, Q)$ für eine horizontal-koplanare (HCP) Spulenanordnung mit einem Spulenabstand r , einer Sensorhöhe h und einer Messfrequenz f lautet (z. B. Ward & Hohmann, 1988):

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

wobei $\alpha_0^2 = \lambda^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 + i\omega \mu_0 / \rho_0$ mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$, $\rho_0 > 10^8 \Omega\text{m}$ und $i = \text{imaginäre Einheit}$. J_0 ist eine Bessel-Funktion der ersten Art und nullten Ordnung und R_1 ist der komplexe Reflexionsfaktor, der die Materialparameter (spezifischer Widerstand ρ , magnetische Permeabilität μ und dielektrische Permittivität ε) des Untergrundes enthält. Dieses komplexe Integral wird numerisch mit der Schnellen Hankel-Transformation (z. B. Anderson, 1989, Johansen & Sørensen, 1979) berechnet. Zur Umgehung von Singularitätsproblemen ($\alpha_0 \approx 0$), die nur bei hohen Frequenzen auftreten können, wird das Integral mittels partieller Integration gelöst (Siemon, 2012). Eine ähnliche Formel besteht für die vertikal-koaxiale Spulenanordnung (VCX), die auf kleine Sekundärfelder führt ($\text{VCX} \approx -0,25 \cdot \text{HCP}$). 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 Komponentenverhältnisse ε

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

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

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

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

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

Die berechnete Höhe D_a (scheinbarer Abstand des HEM-Systems von der Halbraumoberkante) kann von der gemessenen Höhe 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 Schwerpunkstiefe

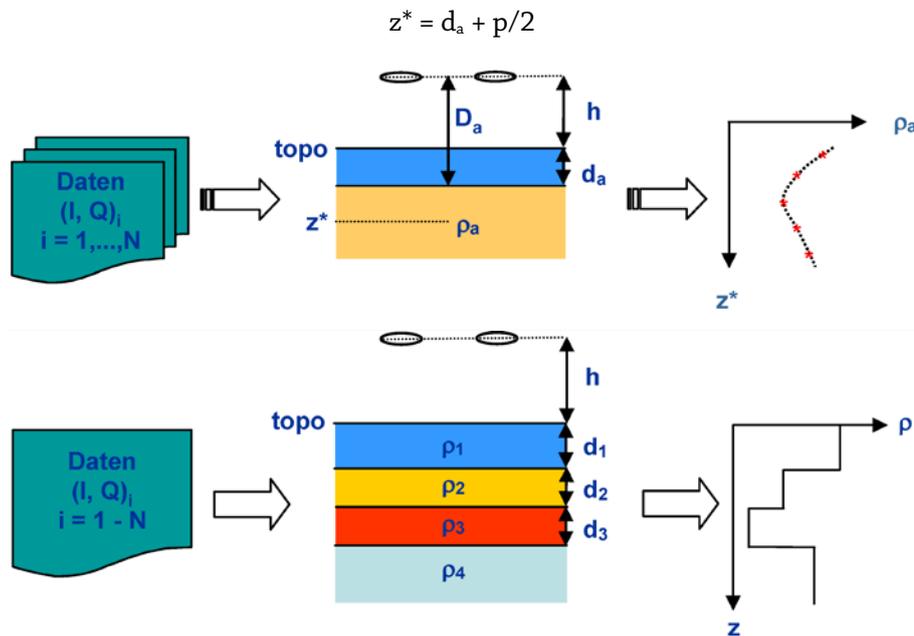


Abbildung 4: Prinzip der HEM-Inversion basierend auf homogenen (oben) und geschichteten (unten) Halbräumen

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

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

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

Die berechneten Halbraumparameter können vor der Weiterverarbeitung auf Plausibilität überprüft werden, um beispielsweise bei zu großen Flughöhen die Halbraumparameter zu löschen.

5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten

Die Sekundärfelder enthalten in dicht besiedelten Gebieten neben dem geogenen Anteil oft auch anthropogene Anteile, die von Bebauungen und elektrischen Installationen wie z. B. Elektrokabel, Metallzäunen und Eisenbahnschienen herrühren können (Siemon et al., 2011). 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.

Der anthropogene Einfluss wirkt sich durch eine Verringerung des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunktstiefe aus. In den Karten, die die unkorrigierten Halbraumparameter zeigen (wie z. B. im Zwischenbericht, Steuer et al., 2015), ist daher oft eine Korrelation von niedrigen Halbraumwiderständen bzw. geringeren Schwerpunktstiefen mit Ortschaften oder Straßen zu beobachten, die vor allem in den Karten der niedrigen Frequenzen auftreten.

Die Entfernung der anthropogen betroffenen Bereiche erfolgt zweistufig: Die Daten in Bereichen mit geringer Beeinflussung werden automatisch durch die verwendeten Filter geglättet. Bei stärkerer Beeinflussung greift eine automatische Erkennung, die die Daten löscht, wenn vorgegebene Schwellwerte für den Datenfehler (siehe **Tabelle 14**) überschritten werden. Darüber hinaus ist eine manuelle Elimination von Daten möglich. Mit Hilfe von topografischen Karten, Google Maps und Leitungsplänen der Thüringer Energienetze GmbH (TEN) können Hochspannungsleitungen, Straßen und Ortschaften identifiziert und – falls erforderlich – entsprechende Bereiche in den Daten gelöscht werden. Die durch das Löschen entstandenen Datenlücken werden im weiteren Verlauf der Auswertung durch die flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter geschlossen, sofern die Datenlücken nicht zu groß sind (siehe **Kapitel 5.3.7**).

Die Erkennung von anthropogen beeinflussten HEM-Daten ist ferner durch deren typische Form oder durch Korrelation mit den Magnetikdaten möglich. Die Identifizierung aller typischen Effekte war im Messgebiet Schleiz sehr schwierig. So war es zum Teil unmöglich, die Ursachen für einige Anomalien mit z. T. recht hohen Amplituden zu finden. Eine Ursache könnten Schonungszäune sein, 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. Jedoch traten auch viele Anomalien jenseits von

Waldbeständen auf, sodass viele Anomalien aufgrund ihrer Signalform als anthropogen verursacht eingestuft und aus den HEM-Daten entfernt worden sind. Die interpolierten Bereiche sind auf den Ergebniskarten (siehe **Kapitel 5.3.7** und **Kapitel 6.3**) markiert.

5.3.6. Statistische Niveauanpassung

Im Allgemeinen ist die herkömmliche Niveauanpassung (**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 Schleiz änderten sich zudem noch die Geländehöhen stark, sodass die Höhe der Flugsonde um bis zu mehrere Zehner Meter variierte. Daher war eine statistische Niveauanpassung erforderlich.

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

Die flächenhafte Niveauanpassung der logarithmierten Halbraumwiderstände ($\log \rho_a$) und der scheinbaren Tiefen (d_a) parallel zu den Messprofilen (L) erfolgt über das *Microlevelling*. Dieses Verfahren verwendet die Gitter der Messprofilaten, in denen Niveaufehler durch die Anwendung eines Butterworth-Hochpassfilters (Filterlänge etwa drei- bis vierfacher Linienabstand, hier 1000 m, Ordnung 8) und eines direktionalen Kosinusfilters (betont Strukturen senkrecht zu den Linien, hier Azimut -43° , Grad 1) identifiziert werden. Das Ergebnis der Filterung ist ein Fehlergitter, das durch Abtasten entlang der Messprofile die für die Korrektur benötigten Niveaufehlerwerte liefert. Die abgetasteten Fehlerwerte werden mit einem Spline-Filter (Glätte 0,85, Spannung 0,5) stark geglättet und dann von den ursprünglichen Halbraumparametern abgezogen (siehe **Tabelle 15**).

Die Halbraumparameter entlang der Kontrollprofile (T) – wie auch entlang der Messprofile, die beim *Microlevelling* nicht verwendet wurden – werden nivelliert, indem diese auf die nivellierten Halbraumparameter der Messprofile bezogen werden. Hierzu werden die nivellierten Halbraumparameter entlang der Kontrollprofile aus den zugehörigen Gittern abgetastet und mit den vorhandenen Halbraumparametern verglichen. Die stark geglätteten Differenzen aus beiden werden schließlich von den Halbraumparametern der Kontrollprofile abgezogen. Vor der Glättung mit einem Spline-Filter (Glätte 0,8, Spannung 0,5) werden Extremwerte durch Vorgabe von Schwellwerten ausgeschlossen.

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

Im letzten Schritt (*I-Q-Levelling*) werden die Niveaurekturen für jedes Mess- und Kontrollprofil aus den stark geglätteten Differenzen ($\Delta I = I - I_c$ und $\Delta Q = Q - Q_c$) der originären, d. h. kalibrierten, aber

ungefilterten HEM-Daten (I und Q) und den aus den nivellierten Halbraumparametern rückgerechneten HEM-Daten (I_c und Q_c) abgeleitet (Siemon, 2009). Hierzu werden – nach Anwendung eines nicht-linearen Filters (50 Werte, Toleranz 10) – die Differenzen ausgewählt, bei denen das Rauschen (I_{noise} und Q_{noise} , rel. STF, siehe **Tabelle 15**) der originären HEM-Daten klein genug ist, die Sensorhöhe kleiner als 80 m ist und keine markierten, anthropogen beeinflussten Bereiche vorliegen. Die verbliebenen Differenzen werden mit einem Spline-Filter (Glätte 0,85–0,90, Spannung 0,2) geglättet und von den originären HEM-Daten abgezogen. Dabei werden die zuvor gelöschten Bereiche mit den Modelldaten (wie in **Kapitel 5.3.7** beschrieben) wieder aufgefüllt. Die Modelldaten werden auch verwendet, wenn das Rauschen (I_{noise} und Q_{noise}), das aus den korrigierten Daten (I_{lev} und Q_{lev}) neu berechnet wird, zu hoch ist. Auch ist es möglich, Niveauekorrekturen, die nicht plausibel sind, zurückzunehmen, indem die Niveauekorrekturen (ΔI und ΔQ) nicht angebracht oder die Lücken mittels Spline-Interpolation aufgefüllt werden. Eventuelle Sprünge in den niveauekorrigierten Daten (I_{lev} und Q_{lev}) an den Rändern der interpolierten Bereiche werden abschließend durch Anwendung von schwachen nicht-linearen und Spline-Filtern geglättet (siehe **Tabelle 15** und **Kapitel 5.3.7**).

Tabelle 15: Filterparameter für die HEM-Niveauekorrektur

Filter	Filterparameters	Bezugsparameter
Butterworth (HP)	Länge: 1000 m; Ordnung: 8	$\log \rho_a, d_a$ (L)
Direkt. Kosinus	Azimut: -43°; Grad: 1	$\log \rho_a, d_a$ (L)
Spline	Glätte: 0,85; Spannung: 0,5	$\Delta \log \rho_a, \Delta d_a$ (L)
Schwellwert	Schwellwerte ($\Delta \log \rho_a / \Delta d_a$): 0,01 / 0,03	$\Delta \log \rho_a, \Delta d_a$ (T)
Spline	Glätte: 0,80; Spannung: 0,5	$\Delta \log \rho_a, \Delta d_a$ (T)
Nicht-linear	Filterlänge: 50 Werte (≈ 200 m), Toleranz: 10,0	$\Delta I, \Delta Q$
Schwellwert	Schwellwerte (I_{noise} / Q_{noise}): 0,04–0,1 / 0,04–0,1	$\Delta I, \Delta Q$
Spline	Glätte: 0,85–0,90; Spannung: 0,2	$\Delta I, \Delta Q$
Schwellwert	Schwellwerte (I_{noise} / Q_{noise}): 0,02–0,13 / 0,02–0,13	I_{lev}, Q_{lev}
Nicht-linear	Filterlänge: 8 Werte (≈ 32 m), Toleranz: 3,0	I_{lev}, Q_{lev}
Spline	Glätte: 0,55–0,65; Spannung: 0,5	I_{lev}, Q_{lev}

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 während der Niveauekorrektur (**Kapitel 5.3.6**) durch Interpolation der Halbraumparameter mit nachfolgender Neuberechnung der relativen Sekundärfelder geschlossen. Abschließend werden die korrigierten Daten analog zu **Kapitel 5.3.3** gefiltert, aber evtl. mit leicht modifizierten Filter-

parametern. Insbesondere werden die Daten nach Anwendung des nicht-linearen Filters (8 Werte, Toleranz 3) nicht mehr mit einem Tiefpass-Filter, sondern mit einem Spline-Filter (Glätte 0,55–0,65, Spannung 0,5) geglättet.

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

5.3.8. Datenfehler und Qualitätsparameter

Für die HEM-Daten kann kein Datenfehler, der auf einer statistischen Variation von Wiederholungsmessungen beruht, angegeben werden, da nur Einzelmessungen vorliegen. Um dennoch ein Maß für das Rauschen der Daten angeben zu können, wird der in **Kapitel 5.3.3** bzw. **Kapitel 5.3.6** verwendete relative Standardfehler (rel. STF) herangezogen. Nach Abschluss der Datenbearbeitung wird dieser über 30 benachbarte Werte, d. h. über eine Wegstrecke von etwa 120 m, aus den Differenzen der ungefilterten und gefilterten Niveauekorrekturen (siehe **Kapitel 5.3.6**) neu berechnet und auf die Modelamplituden (≥ 1) normiert, jeweils für I und Q einer Messfrequenz.

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

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

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

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

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

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

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

Ferner kann für diesen dynamischen Qualitätsparameter ein Marker (QCPM) angegeben werden, indem QCPM nur dort einen diskreten Wert (= 1) besitzt, wo die Datenqualität so gering ist, dass von einer Interpretation dieser Daten abgesehen werden sollte. Die Berechnung dieses Markers ist zweistufig: Zunächst werden alle Bereiche ausgewählt mit $QCP \leq 0,5$. Diese werden aber nur beibehalten,

wenn sie in einem Intervall von 100 Werten überwiegen. So wird verhindert, dass kleine Lücken (< 200 m), die gut zu interpolieren sind, bzw. Bereiche mit nur wenig brauchbaren Daten bestehen bleiben. Insgesamt ist die Qualität der HEM-Daten im Messgebiet Schleiz akzeptabel (Mittel von $QCP = 0,8 (\pm 0,2)$, aber bei etwa 7,8% der Daten ist die Qualität gering ($QCPM = 1$).

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

5.3.9. 1D-Inversion der HEM-Daten

Die prozessierten HEM-Daten zu allen Messfrequenzen werden in die Parameter eines geschichteten Halbraums, spezifischer Widerstand und Mächtigkeit jeder Modellschicht, invertiert. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig. Dieses Startmodell wird automatisch aus den $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet. Das Startmodell kann eine frequenzunabhängige Anzahl von Schichten besitzen. Hierzu wird die interpolierte Sondierungskurve in mit der Tiefe zunehmenden Schichtmächtigkeiten unterteilt und die zugehörigen spezifischen Widerstände in der jeweiligen Schichtmitte aus der Sondierungskurve abgegriffen (Siemon, 2006). Wahlweise kann eine schlecht leitende Deckschicht hinzugefügt werden, deren Mächtigkeit sich aus der scheinbaren Tiefe d_a der höchsten Messfrequenz und ggf. zusätzlich einer vorzugebenden Luftschichtmächtigkeit ergibt, mindestens aber 0,5 m beträgt. Im Inversionsprozess wird das Startmodell solange iterativ verbessert, indem für jedes neue Modell synthetische Daten (Modelldaten) berechnet (wie in **Kapitel 5.3.4** beschrieben), mit den Messdaten verglichen und daraus die Modellverbesserungen abgeleitet werden, 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 Schleiz wurden nivellierte Daten (**Kapitel 5.3.6**) und ein Startmodell mit 6 bzw. 20 Schichten mit zur Tiefe hin ansteigenden Mächtigkeiten inklusive einer variabel mächtigen Deckschicht verwendet. Bei der Inversion auf der Basis von vielen Schichten, bei der die Schichtmächtigkeiten (bis auf die Deckschichtmächtigkeit) festgehalten werden, erscheinen die Modelle in vertikale Richtung geglättet. Der Grad der Glättung ist einstellbar durch die Stärke der Regularisierung (2,6 bzw. 2,8 bei 6 bzw. 20 Schichten). Da die Daten der dritten Messfrequenz (5.410 Hz) mit einem vertikal-koaxialen Spulensystem erfasst werden, das empfindlich gegenüber steil stehenden Leitfähigkeitsstrukturen (aber auch gegenüber externen Quellen) ist, während alle anderen horizontal-koplanare Spulensysteme verwenden, die empfindlich für die lateralen Leitfähigkeitsstrukturen sind, wurden diese Daten für die Inversion nicht benutzt.

Im Messgebiet Schleiz 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 im Messgebiet Geyer, wo die spezifischen Widerstände meist noch höher waren (Siemon et al., 2015), zeigten, dass die berechneten Halbraumwiderstände bei der niedrigsten Messfrequenz (380 Hz) offenbar häufig zu klein waren. Daher wurden in den Startmodellen die spezifischen Widerstände der untersten Modellschicht (Substratum) verdoppelt. Dies ist auch für die Inversion der HEM-Daten im Messgebiet Schleiz übernommen worden.

5.3.10. Präsentation der HEM-Ergebnisse

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten (**Anhang IV**) und Vertikalschnitte (**Anhang V**) präsentiert. Karten (**Kapitel 6**) im Maßstab von 1:50.000 wurden für die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand ρ_a (in Ωm) und Schwerpunkstiefe z^* (in m unter GOK) für sechs Messfrequenzen und die spezifischen Widerstände ρ (in Ωm) in neun Tiefen (5–150 m unter GOK), abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten, produziert.

Die für die Produktion der Karten der Halbraumparameter verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte dargestellt. In allen Karten können Lücken in der Nähe von Städten und Industrieanlagen auftreten. Die Daten wurden in diesen anthropogen beeinflussten Bereichen gelöscht und – sofern sinnvoll – interpoliert. Die interpolierten Bereiche sind mit weißen Punkten markiert. Größere Lücken können nicht vernünftig durch flächenhafte Interpolation geschlossen werden und verbleiben somit in den Karten. Die verwendeten Parameter für die Kartenproduktion sind in **Kapitel 6.2** aufgeführt.

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

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 140 Messprofile und der 12 Kontrollprofile (siehe **Liste der Vertikalsektionen**) hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topografischen Höhe längs eines Profils nebeneinandergestellt werden. Die Mächtigkeit der untersten Schicht (Substratum) wurde auf 15 m festgelegt. Über den Modellen sind zusätzlich die Höhe der Flugsonde, der Qualitätskontrollparameter QCP, der Anpassungsfehler der Inversion und die Messdaten abgebildet, die in einer Legende erklärt werden. Die 1D-Inversionsmodelle weisen in den Bereichen, wo der Marker des QCP existiert ($QCPM = 1$), Lücken auf. Denn dort ist per Definition des QCP die Datenqualität so gering, dass von einer Interpretation dieser Daten abgesehen werden sollte. Im **Anhang V** sind die Vertikalschnitte mit 20 Schichten in einer speziellen Übersicht dargestellt, um einen schnellen und übersichtlichen Eindruck von den spezifischen Widerständen im Messgebiet zu bekommen. Dort werden die 1D-Inversionsmodelle mit 20 Schichten als Vertikalsektionen profilweise, fortlaufend in der Nummerierung mit 6 (L) bzw. 4 (T) Profilen pro Seite dargestellt, wobei lediglich die Höhe der Flugsonde über den Modellen und der Qualitätsparameter QCP unter den Modellen abgebildet ist. Auf der DVD sind alle Vertikalschnitte abgelegt.

5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik

Die Magnetikdaten werden nach Hardwarefilterung mit 10 Hz registriert. Dabei entsteht eine zeitliche Verzögerung von 2,3 s, die vor der Weiterverarbeitung korrigiert wird. Die Verarbeitung der HMG-Daten erfolgte mit den korrigierten Positionsdaten (siehe **Kapitel 5.2.1** und **5.2.3**). Die Längen der einzelnen Profile entsprechen den für die Auswertung der Hubschrauberelektromagnetik festgelegten optimalen Bereichen.

5.4.1. Magnetisches Totalfeld

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

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

- mit
- $F(r)$ = magnetisches Hauptfeld (IGRF),
 - $\Delta T(r)$ = anomaler, lokaler Anteil des erdmagnetischen Feldes im Messgebiet,
 - $\Delta V(t)$ = Tagesvariation des erdmagnetischen Feldes während der Messung,
 - $\delta(r,t)$ = sonstige Anteile (z. B. magnetisches Eigenfeld des Hubschraubers).

Gesucht werden die Anomalien des magnetischen Totalfeldes $\Delta T(r)$. Während das magnetische Hauptfeld $F(r)$, das anhand von Tabellenwerten berechnet werden kann, und die Tagesvariationen $\Delta V(t)$, die in der Regel mit der Bodenstation registriert werden, von der gemessenen Totalintensität subtrahiert werden können, sind die sonstigen Anteile $\delta(r,t)$ nicht isoliert zu erfassen.

5.4.2. Berechnung des IGRF

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

5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen

Referenzstationen zur Erfassung der magnetischen Tagesvariationen $\Delta V(t)$ befanden sich auf dem Flugplatz Gera-Leumnitz. $\Delta V(t)$ ergibt sich aus dem Messwert der Bodenstation abzüglich des IGRF-Feldes am Ort der Bodenstation und zum Zeitpunkt der Messung. Kurzzeitige Störeinflüsse in den Daten der Bodenstation wurden manuell entfernt und durch die Anwendung eines Tiefpass-Filters der Breite 60 s geglättet.

5.4.4. Statistische Niveaueinpassung

Nach Abzug des Hauptfeldes und der Tagesvariationen von den gemessenen magnetischen Werten erfolgt eine statistische Niveaueinpassung. Dazu werden die Differenzen zwischen den magnetischen Anomalien der Mess- und Kontrollprofile an den Kreuzungspunkten berechnet und flugweise gemittelt (*Tieline-Levelling*). Die Differenzen werden dabei aus Gittern (*Grids*) der von anthropogenen Ein-

flüssen befreiten (s. u.) Daten der Mess- und Kontrollprofile ermittelt. Die gemittelten Werte definieren die Niveauunterschiede zwischen den Flügen und stellen somit die Korrekturwerte für die statistische Niveauanpassung dar. Abweichungen im Niveau der Daten können immer dann auftreten, wenn sich während der Kampagne Änderungen in der Konfiguration der Sensoren von der Bodenstation oder der Flugsonde ergeben haben.

Verbleibende Niveauunterschiede können, abhängig von der Flugrichtung, von dem Eigenfeld des Hubschraubers (*heading error*) hervorgerufen werden. 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 1800 m, Ordnung 8) und eines direktionalen Kosinus-Filters (Azimut -43° , 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 0,9, Spannung 1,0) stark geglättet und dann von den bis dahin nur mittels der Tieline-Levellings 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 niveaueingeglichen Gitter entlang der Kontrollprofile abgetasteten Daten. Diese Fehlerwerte werden ebenfalls mit einem Spline-Filter (Glättung 0,8, Spannung 1,0) stark geglättet und dann von den Kontrollprofilaten abgezogen.

In (teilweise) besiedelten Gebieten dominieren in den Karten der magnetischen Anomalien oft die durch anthropogene Quellen hervorgerufenen Effekte. Im Messgebiet Schleiz treten überdies auch geogen bedingte starke lokale Anomalien auf. Diese starken Signale wirken sich störend auf das Levelling und die Identifizierung schwacher geogener Anomalien aus. Daher wird vor dem Tieline- und dem *Microlevelling* jeweils ein automatischer Prozess zur Eliminierung starker, kleinräumiger Anomalien im ΔT -Gitter angewendet. Zur Lokalisierung der zu löschenden Bereiche wird das analytische Signal von ΔT auf Gitterebene berechnet. Hierin zeigen sich kleinräumige Störungen besonders deutlich und können durch die Anwendung eines einfachen Schwellwertes identifiziert werden. Die Messpunkte, an denen der Schwellwert des analytischen Signals überschritten wird, sind in dem resultierenden Gitter nicht mehr enthalten. In diesen Filterprozess kann bei Bedarf manuell eingegriffen werden. Das so erzeugte Gitter ist weitgehend von starken lokalen Anomalien befreit und dient als Basis für das Tieline- und *Microlevelling*. Bereiche, die durch die Filterung entfernt wurden, werden während des *Microlevellings* wieder eingefügt, indem dort die aus den umliegenden Bereichen interpolierten Fehlerwerte verwendet werden. Das Ergebnis sind über *Microlevelling* niveaueingegliche ΔT -Daten.

Üblicherweise dient das hier beschriebene Verfahren in Gebieten mit schwachen geogenen Anomalien zum automatischen Entfernen der anthropogenen Effekte. Im Messgebiet Schleiz war dies nicht möglich, da hierdurch auch einige geogene Anomalien entfernt worden wären. Es wurde daher ein anderer Ansatz zur Bereinigung der Daten von anthropogenen Effekten gewählt. Dazu wurden durch eine automatische Prozedur diejenigen Abschnitte in den Daten markiert, die im Einflussbereich Ortschaften und Straßen sowie von Hochspannungsleitungen liegen und in der Deutschen Topografischen Karte 1:50000 enthalten sind. Zusätzlich wurden einige anthropogen gestörte Bereiche manuell markiert. Zur Herstellung eines bereinigten ΔT -Kanals werden die markierten Bereiche aus den ursprünglichen

ΔT -Daten entfernt und die entstehenden Lücken durch Interpolation während der Gittererstellung geschlossen. Die finalen, bereinigten Daten und Gitter können allerdings noch immer schwächere, anthropogene Effekte enthalten, da eine eindeutige Entscheidung zwischen geogen und anthropogen letztlich nicht immer möglich ist.

5.4.5. Präsentation der HMG-Ergebnisse

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

5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie

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

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

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

Die Datenverarbeitung umfasst folgende Schritte:

- Bestimmung der Höhe des Detektors über Grund und der effektiven Höhe;
- Bestimmung der Höhe des Bewuchses (Wald);
- Festlegung von Profilabgrenzungen zur Unterteilung der Flüge in Profile;
- Energiekalibrierung;
- Verminderung des Rauschens;
- Korrektur der Hintergrundstrahlung;
- Bestimmung und Korrektur des Einflusses atmosphärischen Radons;
- Korrektur der Compton-Streuung;

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

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

5.5.1. Energiekalibrierung

Da die automatische Verstärkungsstabilisierung von Gammaskpektrometern infolge von Temperaturveränderungen nicht immer optimal funktioniert, kann die Energie-Kanal-Zuordnung während eines Fluges leicht driften. Es wird daher nachträglich eine Energiekalibrierung der aufgezeichneten Spektren durchgeführt. Dazu wird für jeden Messpunkt ein mittleres Spektrum einer großen Zahl benachbarter Spektren berechnet. Im mittleren Spektrum werden jeweils die Kanalpositionen der Zentren der Kalium- und Thoriumspitzen bestimmt. Danach wird die Kanaluordnung 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 Aerogammaskpektrometrie allgemein gering. Dies führt dazu, dass die aufgenommenen Gammaskpektren, und damit auch die daraus ermittelten Radionuklidgehalte, starkes statistisches Rauschen aufweisen. In der Datenaufbereitung kommt daher ein von Hovgaard & Grasty (1997) entwickeltes Verfahren zur Reduktion des Rauschens zur Anwendung. Das NASVD-Verfahren (*Noise Adjusted Singular Value Decomposition*) basiert auf einer statistischen Analyse sämtlicher Spektren eines Messgebietes und einer Rekonstruktion der Spektren mit vermindertem Rauschen. „*Noise Adjusted*“ bedeutet, dass die Spektren zunächst einer kanalspezifischen, varianzabhängigen Skalierung unterzogen werden, damit eine gleichmäßige Wichtung über das gesamte betrachtete Spektrum vorherrscht. Die Grundlage für diese Skalierung bildet ein *a priori*-Modell des Rauschens, welches die Varianz für jeden Kanal liefert. Durch das Zusammenführen der skalierten Spektren entsteht eine Matrix, für die anschließend eine Singulärwertzerlegung (*singular value decomposition*) erfolgt. Die dabei ermittelten Hauptkomponenten werden entsprechend der Größe des Eigenwertes, d. h. entsprechend der Stärke ihres Einflusses auf die Kurvenform der skalierten Spektren, sortiert. Da das Nutzsignal zwischen den Kanälen für Uran, Thorium und Kalium korreliert, basieren die Hauptkomponenten geringer Ordnung in erster Linie auf den geogenen Daten und sind damit maßgeblich für die Kurvenform der Spektren verantwortlich. Die unkorrelierten Signale des statistischen Rauschens spiegeln sich dagegen gleichmäßig in allen Hauptkomponenten wider. Um das Rauschen zu minimieren, werden für die Rekonstruktion der Spektren nur die Hauptkomponenten verwendet, die die Nutzsignale enthalten. Die Rekonstruktion erfolgt demnach durch die Linearkombination der ersten sechs Hauptkomponenten. Als Ergebnis erhält man geglättete Spektren, aus denen die Zählraten der drei interessierenden Energiefenster (siehe Tabelle 6) neu bestimmt werden.

Während dieses Verarbeitungsschrittes erfolgt auch eine Begrenzung auf eine maximale Flughöhe: Alle Daten, die bei einer Flughöhe über Grund von mehr als 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).

Die Lufttemperatur wird zu Beginn und Ende des Fluges am Boden an einem im Hubschrauber eingebauten Außenthermometer abgelesen und notiert.

Der Luftdruck wird üblicherweise mit einem Sensor im HeliDAS gemessen und aufgezeichnet. Dieser Sensor war während der Befliegung defekt und lieferte keine verlässlichen Druckwerte. Es wurde daher auf die beim Deutschen Wetterdienst online erhältliche Aufzeichnung der dem Messgebiet am nächsten liegenden, etwa 30 km entfernten Station Gera-Leumnitz (zugleich Einsatzflugplatz) zurückgegriffen. Die jeweiligen Tagesmittel des Luftdrucks wurden umgerechnet auf Meereshöhe und mit der folgenden Formel der Druck in Flughöhe berechnet:

$$P^* = P_m \cdot e^{(-Z/8581)}$$

mit:

- P^* = für Flughöhe berechneter Luftdruck (kPa),
- P_m = Tagesmittel des Luftdrucks, Station Gera-Leumnitz, umgerechnet auf Meereshöhe (kPa),
- Z = Flughöhe (m über NHN).

Unter Verwendung von P^* für P wurden schließlich die effektiven Höhen berechnet.

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 Gammaspektrum 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 m 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
TC	51,40	1,0437
K	6,59	0,0619
U	1,20	0,0509
Th	0,02	0,0649
U-UP	0,32	0,0133

5.5.6. Radonkorrektur

Die Erdatmosphäre enthält stets einen gewissen Anteil an dem radioaktiven Edelgas Radon. Die Quellen des Radons liegen in den Gesteinen des Erdmantels und der Erdkruste. Von den obersten Bodenschichten diffundiert das Gas in die Atmosphäre. Der Gehalt an Radon in der Luft ist starken Schwankungen unterworfen und ist unter anderem beeinflusst durch Topografie, Luftdruckschwankungen und andere meteorologische Faktoren wie z.B. Niederschlag.

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

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

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

Tabelle 17: Konstanten für die Radonkorrektur

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

5.5.7. Compton-Streuung

Der Compton-Effekt beschreibt die Wechselwirkung von Gammaquanten mit Elektronen der äußeren Atomhülle beim Durchgang durch Materie. Ein Teil der Energie der Gammaquanten wird auf diese sogenannten Compton-Elektronen übertragen und die Gammaquanten selbst werden gestreut. Praktisch hat dies zur Folge, dass ein bestimmter Anteil z. B. von der ursprünglichen Thoriumstrahlung in den niedrigeren Energiebereichen des Uran- und Kaliumfensters enthalten ist. Ebenso streuen Urananteile in den Kaliumkanal. Der umgekehrte Effekt, d. h. die Einstreuung in höhere Energiekanäle, existiert auch, ist aber deutlich geringer. Die Koeffizienten der Einstreuraten (*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 17: Koeffizienten der Einstreuraten

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 Einstreuraten 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 Einstreuraten korrigierten Zählraten $N_{Th(corr)}$, $N_{U(corr)}$ und $N_{K(corr)}$ zu erhalten, muss der eingestreuete 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 $N_{e,TC}$ bei effektiver Höhe h_e ,
- N_s = korrigierte Zählrate bezogen auf die Standardhöhe h_0 .

Tabelle 18: Absorptionskoeffizienten für Standardbedingungen

Spektralfenster	Absorptionskoeffizienten μ (in 1/m)
K	0,00982
U	0,00656
Th	0,00737
TC	0,00753

5.5.9. Radioelementgehalte und Dosisleistung

Die IAEA (2003) empfiehlt die Umrechnung der Zählraten der drei Gammastrahler in die Äquivalentgehalte der beiden Radioelemente Uran (e_U , in ppm) und Thorium (e_{Th} , 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	30,72 cps / % K
Uran	4,55 cps / ppm eU
Thorium	2,23 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:

C₀ = 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.

Tabelle 19: Lineare Abschwächungskoeffizienten μ_v der Vegetation

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

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 bestimmbaren 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.

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

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

mit:

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

5.5.10. Filterung und statistische Niveaueinpassung

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

Die so kontrollierten Messdaten zeigten ein mäßiges statistisches Rauschen im Verhältnis zu den sichtbaren, geologisch bedingten Anomalien und im Urankanal zusätzlich geringfügige Niveauunterschiede zwischen den Messprofilen. Zur Verringerung des Rauschens und der Niveauunterschiede

werden zwei weitere Bearbeitungsschritte auf die Daten angewendet: Anwendung eines adaptiven Tiefpass-Filters nach Berechnung der Radionuklidgehalte und Niveauekorrektur durch Microlevelling nach der Vegetationskorrektur. Der adaptive Tiefpass-Filter nach Mathis (1987) verringert das statistische Rauschen in den Daten, wobei Anomalien in ihrer Form weniger abgerundet werden als bei herkömmlichen Tiefpassfiltern. Die Filterbreiten betragen 7 Werte bei K, eTh und TC (Gesamtstrahlung) und 11 Werte bei eU. Der den Filterprozess steuernde TC-Kanal wurde zuvor mit einem herkömmlichen Tiefpass der Filterbreite 21 geglättet.

Für das Microlevelling wird zunächst durch Anwendung zweier Filter (Butterworth-Hochpass-Filter (Grenzwellenlänge 1800 m, Ordnung 8) und direktionalen Kosinus-Filter (Azimut -43° , Grad 1,0) auf die Gitter der Ausgangsdaten (Messprofile) ein Gitter erzeugt, welches Niveauunterschiede zwischen benachbarten Messprofilen in stark geglätteter Form enthält (*error grid*). Dieses Gitter wird entlang der Messprofile abgetastet und der so erzeugte Korrekturkanal mit einem Spline-Filter (Glätte 0,9, Spannung 0,5) geglättet. Die geglätteten Korrekturdaten werden von den ursprünglichen Daten abgezogen und aus den resultierenden, niveauekorrigierten Daten der Messprofile wird ein Gitter erzeugt. Dieses Gitter wird entlang der Kontrollprofile abgetastet und daraus ebenfalls ein geglätteter Korrekturkanal erzeugt für die Niveauekorrektur der Kontrolllinien. Die Niveauekorrektur wurde im Messgebiet Schleiz nur für Uran durchgeführt.

5.5.11. Präsentation der HRD-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 Dosisleistung am Erdboden dargestellt (**Kapitel 6**). Weiterhin wurde eine Karte mit ternärer Darstellung der Radioelementgehalte angefertigt. Die Verteilung der Elemente K, eU und eTh ist hierin in den Farben rot, blau und grün kodiert dargestellt, wobei helle Farben bei hohen und dunkle bei niedrigen Gehalten auftreten. Die für die Produktion der Karten verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte in den Karten implementiert. Bei fehlenden Daten werden weiße Punkte verwendet.

6. Kartografische Arbeiten

6.1. Topografische Karten 1:50.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurde eine topografische Karte 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 40 km × 32 km. **Tabelle 22** enthält die Eckpunktkoordinaten des Blattes.

Tabelle 20: Eckpunktkoordinaten (ETRS89, UTM Zone 32N) des Blattschnittes Schleiz

Karteneckpunkt	ETRS89-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
NW	692000	5629000
NO	732000	5629000
SW	692000	5597000
SO	732000	5597000

Die Ergebniskarten 1:50.000 basieren auf Rasterdaten der DTK50-V. Für die Topografische Karte für das Messgebiet Schleiz kamen die Rasterdaten-kacheln z2_26_22, z2_26_23, z2_26_24, z2_27_22, z2_27_23 und z2_27_24 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 Schleiz 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. 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 21: *Gitterparameter*

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

6.3. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Schleiz wurden 30 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-kodierte Profildaten im Geosoft-xyz-Format (**Tabelle A-2** in **Anhang I**) und die Endergebnisse (Bericht, Karten und Vertikalsektionen) als PDF-Dokumente im Originalmaßstab auf einer DVD (**Tabelle 24** und **Anhang III**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Für die Darstellung in ArcGIS-Projekten wurden die auf den Karten dargestellten Parameter als Grids im ArcGIS-GRIDFLOAT-Format (*.flt) beigefügt.

Tabelle 22: *Inhalt der DVD*

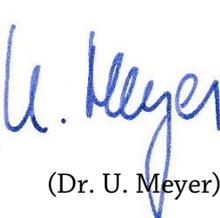
Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Bericht		Technischer Bericht (PDF) (Acrobat Reader unter http://get.adobe.com/de/reader/)
\Daten...	\HEM	ASCII-Datei der Rohdaten (HEM175_RAW.xyz) ASCII-Datei der bearbeiteten Daten (HEM175_DAT.xyz) ASCII-Datei der abgeleiteten Parameter (HEM175_APP.xyz) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM175_INV_L6.xyz und HEM175_INV_L20.xyz) ASCII-Datei der Qualitätskontrollparameter (HEM175_QCP.xyz)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Bodenstationsdaten etc. (HMG175.xyz)
	\HRD	ASCII-Datei der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Dosisleistung etc. (HRD175.xyz)
\Karten...	\ArcGIS	Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (*.flt)
	\DEM	PDF-Karte 1:50.000 des Digitalen Höhenmodells
	\Fluglinien	PDF-Karte 1:50.000 des Flugweges mit Topografie
	\HEM	PDF-Karten 1:50.000 der Halbraumwiderstände und Schwerpunktstiefen für die Frequenzen 380, 1.770, 5.410, 8.300, 41.000 und 129.500 Hz sowie der spezifischen Widerstände bei 5, 10, 15, 30, 50, 75, 100, 125 und 150 m unter GOK, abgeleitet aus Inversionsmodellen mit 20 Schichten
	\HMG	PDF-Karten 1:50.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes mit und ohne anthropogene Effekte
	\HRD	PDF-Karten 1:50.000 der Gesamtstrahlung, der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium (auch in ternärer Darstellung) sowie für die Dosisleistung am Boden
\VRS\L6 \VRS\L20	PDF-Vertikalschnitte des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsmodellen mit 6 bzw. 20 Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:50.000 und Vertikalmaßstab 1:5.000	

8. Literatur

- Anderson, W.L., 1989. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling. *Geophysics* 54, 263–266.
- DGM25. Digitales Geländemodell. Geoinformationen © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)
- Dill, H.G., 1993. Die Antimon-Vorkommen der mitteleuropäischen Alpen und Varisziden. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 144, 434–450, Hannover.
- 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.
- 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., Steuer, A., Siemon, B. & Pielawa, J., 2015. *Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Radiometrie-Befliegungen im Projekt: Bodenparameter aus Aerodaten, Teil 1: 150 Ascheberg, 151 Dikopshof, 152 Klein Altendorf, 153 Hilberath, 154 Geilweilerhof, September 2014*. BGR-Bericht, Hannover.
- Johansen, H.K. & Sørensen, K., 1979. The fast Hankel transform. *Geophysical Prospecting* 27, 876–901.
- Mathis, G.L. 1987. Smoothing spectral gamma logs: A simple but effective technique. *Geophysics* 52, 363–367.

-
- Meyer, U. & Siemon, B., 2014. Hubschrauber-Geophysik der BGR neu am Start. Geowissenschaftliche Mitteilungen (GMIT), 55, 6–14.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 2000. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 65, 1983–1992, doi:10.1190/1.1444882.
- Siemon, B., 2001. Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 46, 65–76, doi: 10.1016/S0926-9851(00)00040-9.
- Siemon, B., 2006. Electromagnetic methods – frequency domain: Airborne techniques. In: Kirsch, R. (ed.), *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 155–170.
- Siemon, B. 2009. Levelling of frequency-domain helicopter-borne electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 67 (3), 206–218, doi: 10.1016/j.jappgeo.2007.11.001.
- Siemon, B., 2012. Accurate 1D forward and inverse modeling of high-frequency helicopter-borne electromagnetic data. *Geophysics*, 77 (4), WB81–WB87, doi: 10.1190/GEO2011-0371.1.
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J., 2015. Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Geyer 2013/14. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0133291, Hannover.
- Siemon, B., Pielawa, J., Petersen, H., Voß, W., Balzer, H.-U. & Plath, C., 2014. Zwischenbericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Zeeland, Teil 1: 160 Terneuzen, 161 Waterdunen, 162 Zeeuws-Vlaanderen, 163 Zeeuws-Vlaanderen-East, Oktober 2014. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132295, 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.
- Steuer, A., Siemon, B., Pielawa, J., Petersen, H., Voß, W., Balzer, H.-U. & Plath, C., 2015. Zwischenbericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung DESMEX, Teil1 175 Schleiz Mai 2015, BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132268, Hannover.
- Ward, S.H. & Hohmann, G.W., 1988. Electromagnetic theory for geophysical applications. In Nabighian M.N. (Eds.) *Electromagnetic methods in applied geophysics Vol. 1, Theory*. Society of Exploration Geophysics, IG no 3, Tulsa, 130–310.
- Weidelt, P., 1991. Introduction into electromagnetic sounding. Lecture manuscript. Technical University of Braunschweig, Germany.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
BGR, HANNOVER



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

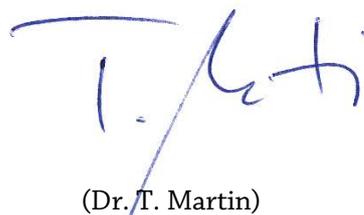
Leiter der Abteilung
„Grundwasser und Boden“

Leiter des Fachbereichs
„Geophysikalische Erkundung –
Technische Mineralogie“



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs
„Aerogeophysik und
Luftfahrttechnischer Betrieb“



(Dr. T. Martin)

Sachbearbeiterin
im Arbeitsbereich
„Bodengeophysik“

Anhang I

Messgebiet 175 – Schleiz

Basis:	Flugplatz Gera-Leumnitz (EDAJ)	Flugplatzhöhe: 1015 ft / 309 m
Bodenstation:	12,1396° östliche Länge,	50,8785° nördliche Breite
Messgebiet:		
Profilabstand:	Messprofile – 300 m	Kontrollprofile – 2000 m
Profilrichtung:	Messprofile – 317°	Kontrollprofile – 47°
Profile:	Messprofile – 124	Kontrollprofile – 8
Profilkilometer:	Messprofile – ca. 1375 km	Kontrollprofile – ca. 255 km
Größe des Messgebietes:	ca. 408 km ²	

Allgemeine Anmerkungen:

- 1) HeliDAS-Konsole: SYS14
- 2) GPS-Heli: Tailboom
- 3) Bird: BKS60
- 4) Barometer: nicht aktiv
- 5) Radarhöhenmesser: nur für Flugführung
- 6) Videokamera: nicht aktiv, Abschnittsweise GOPRO-Aufnahmen

Tabelle A-1: Flugprotokoll für das Messgebiet 175 Schleiz

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
17501	05.05.15	08:30 – 10:38 Registrierzeit: 08:34–10:37	L1.1 L4.1 L7.1 L10.1 L13.1 L16.1 L19.1 L22.1 L25.1 L28.1 L31.1 L34.1	Messprofilflug Flug 17500 wurde abgebrochen, da Bird auf Skirt gefallen ist und dort ein Befestigungshaken abgebrochen ist. Wetter: wolkig, windig (8-12 Kn), 20°C
17502	06.05.15	07:14 – 09:48 Registrierzeit: 07:17 – 09:47	L37.1 L40.1 L43.1 L46.1 L49.1 L52.1 L55.1 L58.1 L61.1 L64.1 L67.1 L70.1 L73.1 L76.1 L79.1 L82.1 L85.1 L88.1 L91.1 L94.1	Messprofilflug Record 6456.8 Sondenhöhe: 4,5 m !!! Wetter: sonnig, leichte Bewölkung, kein – wenig Wind (1-3 Kn), 15°C

17503	06.05.15	11:53 – 14:33 Registrierzeit: 11:53 – 14:33	L97.1 L100.1 L103.1 L106.1 L109.1 L112.1 L115.1 L118.1 L121.1 L124.1 L123.1 L120.1 L117.1 L114.1 L111.1 L108.1 L105.1 L102.1 L99.1	Messprofilflug Sferics in EM2 und EM6 Wetter: sonnig, 15°C
17504	07.05.15	07:27 – 10:04 Registrierzeit: 07:32– 10:04	T8.9 T7.9 T6.9 T7.8 T5.9 T4.9 T3.9 T2.9 T1.9	Kontrollprofilflug Wetter: sonnig ,wolzig, leichte Schauer, windig, 13°C
17505	07.05.15	12:00 – 14:42 Registrierzeit: 12:05– 13:44	L96.1 L93.1 L90.1 L87.1 L84.1 L81.1 L78.1 L75.1 L72.1 L69.1 L66.1 L63.1 L60.1	Messprofilflug Abbruch, wg. Schwingung EM1 → Funkmast nördl. Zadelsdorf und Neustart des Systems als Flug 17506 Wetter: bewölkt, 18°C

17506	07.05.15	12:00 – 14:42 Registrierzeit: 13:49– 14:42	L57.1 L54.1 L51.1 L48.1 L45.1 L42.1	Messprofilflug EM4: Vertauschung der I- und Q-Kanäle, evtl. als Folge von Funkmast oder Neustart des Systems? Wetter: bewölkt, 18°C
17507	08.05.15	07:30 – 10:13 Registrierzeit: 07:32– 10:14	L39.1 L36.1 L33.1 L30.1 L27.1 L24.1 L21.1 L18.1 L15.1 L12.1 L9.1 L6.1 L3.1 L2.1 L5.1	Messprofilflug Flug über Steinbruch für Foto Seifert Wetter: bewölkt, windig (5 Kn), 13°C
17508	11.05.15	11:02 – 13:43 Registrierzeit: 11:17– 13:43	L8.1 L11.1 L14.1 L17.1 L20.1 L23.1 L26.1 L29.1 L32.1 L35.1 L38.1 L41.1 L44.1 L47.1 L50.1 L53.1 L56.1 L59.1	Messprofilflug Wetter: sonnig, leichte Bewölkung, windig (10 Kn), 20°C

17509	11.05.15	15:16 – 16:54 Registrierzeit: 15:24 – 16:54	L62.1 L65.1 L68.1 L71.1 L74.1 L77.1 L80.1 L83.1 L86.1 L89.1 L92.1 L95.1	Messprofilflug Wetter. sonnig, leichte Bewölkung, windig (5 Kn), 21°C
17510	12.05.15	07:12 – 07:42 07:47 – 09:44 Registrierzeit: 07:18 – 09:43	L98.1 L101.1 L104.1 L107.1 L110.1 L113.1 L116.1 L119.1 L122.1 T2.8 T5.8	Mess- und Kontrollprofilflug Unterbrechung wegen Übelkeit Wetter: bedeckt, windig (5 Kn), 17°C

Tabelle A-2: Gebietsdateien

Methode	Name	# Flüge / Profile	# Werte	Größe [MB]	Bemerkungen
HEM	HEM175_RAW.xyz	10 (Flüge)	766.230	243,9	–
HEM	HEM175_DAT.xyz	140 (L) + 12 (T)	374.072	78,2	–
HEM	HEM175_APP.xyz	140 (L) + 12 (T)	374.072	91,3	–
HEM	HEM175_INV_L6.xyz HEM175_INV_L20.xyz	140 (L) + 12 (T)	374.072	73,8 160,7	–
HEM	HEM175_QCP.xyz	140 (L) + 12 (T)	374.072	72,7	–
HMG	HMG175.xyz	140 (L) + 12 (T)	374.072	67,6	–
HRD	HRD175.xyz	140 (L) + 12 (T)	37.544	8,3	–

Anhang II

Beschreibung der Datenformate

A) Elektromagnetik

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

Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/SCHLEIZ  
/AREACODE  
/175  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 32 ETRS89  
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/BIRD  
/60  
/NUMFREQ  
/ 6  
/FREQUENCY  
/ 380.00 1770.00 5410.00 8300.00 41000.00 129500.00  
/COILSEPERATION  
/ 7.92 7.92 9.04 7.96 8.03 7.91  
/COILGEOMETRY  
/ 1.00 1.00 4.00 1.00 1.00 1.00  
/TOWCABLE  
/ 39.50  
/DUMMY  
/ -999.99  
/DECIMATIONVALUE  
/ 1  
/PRIVTEXT  
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```


1) Rohdaten: HEM175_RAW.XYZ

Beispiel:

/Unprocessed data

/XYZ EXPORT [07/05/2017]

/DATABASE [.\175_HEM_RAW.gdb]

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

//Flight 17501

//Date 2015/05/05/

Random 0.1

720551	5634987	12.1316287	50.8245275	0	83407.0	0.46	450.36	773.40	809.72	-1.07	-2.21	-0.56	...	-0.59	6.00	0	...	0	0.0246	0.0024
720551	5634983	12.1316281	50.8244975	1	83407.1	0.61	432.07	773.56	809.85	-0.92	-2.72	-0.17	...	-0.89	6.30	4102	...	542	0.0321	0.0037
720551	5634980	12.1316276	50.8244675	2	83407.2	0.53	433.42	773.72	809.98	-0.92	-3.31	0.12	...	-1.03	6.44	8203	...	1083	0.0356	0.0029

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X_RAW	m	Rechtswert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
Y_RAW	m	Hochwert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
LON_BIRD_RAW	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT_BIRD_RAW	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALTR	ft	Messwert des Radarhöhenmessers, defekt
ALTL_FP	m	Messwert des Laserhöhenmessers
ZHG_BIRD_RAW	m	GPS-Höhe der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
ZHG_HELI_RAW	m	GPS-Höhe des Hubschraubers, Bezugssystem WGS84
ALTB	ft	barometrische Höhe des Hubschraubers, defekt
EM1I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
EM1Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
EM2I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
EM2Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
EM3I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=380 Hz
EM3Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=380 Hz
EM4I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=129500 Hz
EM4Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=129500 Hz
EM5I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
EM5Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
EM6I	ppm	Messwert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz
EM6Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz
EM1_FREQ	Hz	Frequenz für EM1-Kanäle (etwa f=41000 Hz)
EM2_FREQ	Hz	Frequenz für EM2-Kanäle (etwa f=8300 Hz)
EM3_FREQ	Hz	Frequenz für EM3-Kanäle (etwa f=380 Hz)
EM4_FREQ	Hz	Frequenz für EM4-Kanäle (etwa f=129500 Hz)
EM5_FREQ	Hz	Frequenz für EM5-Kanäle (etwa f=1770 Hz)
EM6_FREQ	Hz	Frequenz für EM6-Kanäle (etwa f=5410 Hz)
CPPL		Powerline-Detektor
CPSP		Sferics-Detektor

Anmerkungen:

Verschiebung der GPS-Kanäle: -0,7 s.

Verschiebung der EM-Kanäle: 0,8 s.

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

/COILGEOMETRY

/ 1.00 1.00 0.25 1.00 1.00 1.00

/PRIVTEXT

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

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

Zeilen, die mit "Random" beginnen, kennzeichnen die Flüge, die Dezimale gibt fortlaufende Nummerierung der Messflüge an.

2) Daten: HEM175_DAT.XYZ

Beispiel:

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

/Levelled data, man-made effects removed

/Transferred on 04.07.2017 14:33:30

```

/      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 17501
//Date 2015/05/05
Line 1.1
692712  5607648  11.722585  50.588888  11820  85349.0  411.12  62.95  62.95  474.07  474.16  3.54  13.14 ... 323.50  104.02
692715  5607645  11.722622  50.588861  11821  85349.1  411.13  62.78  62.78  473.91  474.35  3.54  13.16 ... 324.70  104.44
692717  5607642  11.722659  50.588833  11822  85349.2  411.14  62.60  62.60  473.74  473.43  3.55  13.20 ... 326.31  105.12

```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus DEM (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM), ehemaliger Radarahöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM)
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
REAL_1	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=380 Hz
QUAD_1	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=380 Hz
REAL_2	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1770 Hz
REAL_3	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz, auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
QUAD_3	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5410 Hz, auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
REAL_4	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
QUAD_4	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8300 Hz
REAL_5	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
QUAD_5	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41000 Hz
REAL_6	ppm	korrigierter Wert der In-phase-Komponente für die Frequenz f=129500 Hz
QUAD_6	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=129500 Hz

Anmerkungen:

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

3) Halbraumparameter: HEM175_APP.XYZ

Beispiel:

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

/Half-space parameters, man-made effects removed

/Transferred on 04.07.2017 14:33:30

/ 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 17501

//Date 2015/05/05

Line 1.1

692712 5607648 11.722585 50.588888 11820 85349.0 411.12 62.95 62.95 474.07 474.16 157.59 -1.57 160.48 ... 152.77 0.53 9.18

692715 5607645 11.722622 50.588861 11821 85349.1 411.13 62.78 62.78 473.91 474.35 157.58 -1.46 160.59 ... 152.36 0.62 9.26

692717 5607642 11.722659 50.588833 11822 85349.2 411.14 62.60 62.60 473.74 473.43 157.56 -1.40 160.64 ... 152.12 0.67 9.30

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus DEM (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM)
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHOA_1	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=380 Hz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=380 Hz
ZST_1	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=380 Hz
RHOA_2	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=1770 Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=1770 Hz
ZST_2	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=1770 Hz
RHOA_3	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=5410 Hz
KDA_3	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=5410 Hz
ZST_3	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=5410 Hz
RHOA_4	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=8300 Hz
KDA_4	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=8300 Hz
ZST_4	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=8300 Hz
RHOA_5	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=41000 Hz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=41000 Hz
ZST_5	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=41000 Hz
RHOA_6	Ω m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz f=129500 Hz
KDA_6	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz f=129500 Hz
ZST_6	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz f=129500 Hz

Anmerkungen: siehe 2)

4) Inversionsdaten HEM175_INV_L6.XYZ bzw. HEM175_INV_L20.XYZ

Beispiel:

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

/Inversion models, man-made effects removed

/Transferred on 04.07.2017 10:32:30

/ X Y LON LAT RECORD UTC_TIME TOPO H_RADAR H_LASER BIRD_NN H_BARO RHO_I_1 D_I_1 ... RHO_I_N QALL

//Flight 17501

//Date 2015/05/05

Line 1.1

692712	5607648	11.722585	50.588888	11820	85349.0	411.12	62.95	62.95	474.07	474.16	5089.60	0.90	...	279.14	8.59
692715	5607645	11.722622	50.588861	11821	85349.1	411.13	62.78	62.78	473.91	474.35	5206.09	1.84	...	243.11	7.81
692717	5607642	11.722659	50.588833	11822	85349.2	411.14	62.60	62.60	473.74	473.43	5101.54	1.21	...	281.87	8.61

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus DEM (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM)
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHO_I_1	Ωm	spezifischer Widerstand der ersten (oberen) Schicht der N-Schicht-Inversionsmodelle
D_I_1	m	Mächtigkeit der ersten (oberen) Schicht der N-Schicht-Inversionsmodelle
...
RHO_I_N	Ωm	spezifischer Widerstand der N-ten Schicht (Substratum) der N-Schicht-Inversionsmodelle
QALL	%	Anpassungsfehler der Inversion (L1-Norm)

Anmerkungen: siehe 2) und

im Header steht zusätzlich:

/IFREQUENCY

/ 1 1 0 1 1 1

/NUMLAYER bzw. /NUMLAYER

/ 6 20

/MUELAYER

/ 0

5) Qualitätskontrollparameter HEM175_QCP.XYZ

Beispiel:

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

/Quality control parameter, man-made effects removed

/Transferred on 04.07.2017 14:34:17

/ X Y LON LAT RECORD UTC_TIME TOPO H_RADAR H_LASER BIRD_NN H_BARO CHECK_1 ... CHECK_6 CHECK STD ALT QCP QCPM

//Flight 17501

//Date 2015/05/05

Line 1.1

```
692712 5607648 11.722585 50.588888 11820 85349.0 411.12 62.95 62.95 474.07 474.16 10.00 ... 60.00 0.20 0.15 0.09 0.57 -999.99
692715 5607645 11.722622 50.588861 11821 85349.1 411.13 62.78 62.78 473.91 474.35 10.00 ... 60.00 0.20 0.15 0.09 0.56 -999.99
692717 5607642 11.722659 50.588833 11822 85349.2 411.14 62.60 62.60 473.74 473.43 10.00 ... 60.00 0.20 0.15 0.08 0.56 -999.99
```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NHN abgeleitet aus DEM (BKS)
H_RADAR	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM), ehemaliger Radarhöhenkanal
H_LASER	m	berechnete Höhe der Flugsonde (= korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde - DEM)
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NHN der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NHN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
CHECK_1		Marker für EM1 (= 50, 51,...)
CHECK_2		Marker für EM2 (= 40, 41,...)
CHECK_3		Marker für EM3 (= 10, 11,...)
CHECK_4		Marker für EM4 (= 60, 61,...)
CHECK_5		Marker für EM5 (= 20, 21,...)
CHECK_6		Marker für EM6 (= 30, 31,...)
CHECK		Gesamtmarkerwert 0.04 pro CHECK_*, ohne CHECK_6
STD		Gesamtfehlerwert (in Promille maximal 0.4)
ALT		Höhenparameterwert ((H_LASER - 50)/150 >= 0)
QCP		dynamischer Qualitätsparameter (0.0 - 1.0)
QCPM		Qualitätsparametermarker (1.0)

Anmerkungen: siehe 2) und
im Header steht zusätzlich:

/IFREQUENCY

/ 1 1 0 1 1 1

B) Magnetik

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

Magnetikdaten HMG175.XYZ

```
/BGR HEADER:  
/  
/AREANAME  
/SCHLEIZ  
/AREACODE  
/175  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 32 ETRS89  
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/G-822A  
/IGRF  
/2010  
/LON_BASE  
/12.1396000  
LAT_BASE  
/50.8785000  
/ALT_BASE  
/309  
/TOWCABLE  
/39.50  
/LAG  
/23  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```


Beispiel:

/ XYZ EXPORT [03/07/2017]

/ DATABASE [HMG175_Split.gdb]

/ Processing by M.Ibs (BGR) using HmgView04

/

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

//Flight 17501

//Date 2015/05/05

Line 1.1

692712	5607648	11.722585	50.588888	11820	20150505	85349.0	474.1	0.0	49023.79	49023.79	48871.93	-50.49	-50.45	-50.45	-9999.00	-9999.00
692715	5607645	11.722622	50.588861	11821	20150505	85349.1	473.9	53.5	49023.81	49023.79	48871.80	-50.57	-50.53	-50.53	-9999.00	-9999.00
692717	5607642	11.722659	50.588833	11822	20150505	85349.2	473.7	62.1	49023.83	49023.79	48871.68	-50.62	-50.58	-50.58	-9999.00	-9999.00

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Rechtswert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe der Flugsonde, Bezugssystem WGS84
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde über Grund
T_BASE_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_BASE_F	nT	bereinigte Daten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
T_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Flugsonde
DELTA_T	nT	Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes nach Abzug des IGRF und der Tagesvariation sowie Korrektur des richtungsabhängigen Fehlers (heading error)
DELTA_T_LEV	nT	Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes (inkl. anthropogene Effekte)
DELTA_T_LEV_CE	nT	Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes ohne anthropogene Effekte
MASK		Datenmarker = "1" bei fehlerhaften und daher entfernten Daten (Sensor im blinden Winkelbereich), sonst Dummy
MASK_CE		wie MASK, aber zusätzlich auch bei anthropogen gestörten und daher entfernten Daten

Anmerkungen:

Verzögerung von T_RAW: 2,3 s.

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

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

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

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

C) Radiometrie

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

Radiometriedaten HRD175.xyz

```
/BGR HEADER:  
/  
/AREANAME  
/SCHLEIZ  
/AREACODE  
/175  
/C_MERIDIAN, ZONE, REFERENCE SYSTEM  
/ 9 32 ETRS89  
/ELLIPSOID FOR LON AND LAT  
/WGS84  
/DEVICE  
/RS-500 RSX-5  
/BACKGROUND (IAEA 2003, S.60) a(TC), b(TC), a(K), b(K), a(U), b(U), a(Th), b(Th), a(upU), b(upU)  
/51.4, 1.0437, 6.59, 0.0619, 1.2, 0.0509, 0.02, 0.0649, 0.32, 0.0133  
/STRIPPING (IAEA 2003, S.65) alpha, beta, gamma, a  
/0.27, 0.4, 0.772, 0.052  
/ATTENUATION (IAEA 2003, S.67) mue(TC), mue(K), mue(U), mue(Th)  
/0.00753, 0.00982, 0.00656, 0.00737  
/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)  
/30.72, 4.55, 2.23  
/TOWCABLE  
/39.50  
/DUMMY  
/-9999  
/PRIVTEXT  
(hier können Kommentarzeilen stehen)
```


Beispiel:

/XYZ EXPORT [04/07/2017]

/DATABASE [HRD175_Split.gdb]

/Processing by M.Ibs (BGR) using HrdView114

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

Fortsetzung der letzten Zeile:

TOT_RAW	POT_RAW	URA_RAW	THO_RAW	URAUP_RAW	TOT_KOR	POT_KOR	URA_KOR	THO_KOR	EXPO
---------	---------	---------	---------	-----------	---------	---------	---------	---------	------

//Flight 17501

//Date 2015/05/05

Line 1.1

692707	5607640	11.722510	50.588820	1182	20150505	85349	512.2	0.0	101.1	94.714	20.0	999	109
692734	5607610	11.722870	50.588539	1183	20150505	85350	510.5	63.6	99.3	94.733	20.0	999	88
692760	5607580	11.723224	50.588255	1184	20150505	85351	509.5	55.2	90.8	94.744	20.0	999	86

Fortsetzung der letzten drei Zeilen:

1054	98	23	32	6	830.1	2.06	1.59	10.93	7.28
1057	86	31	28	6	826.4	2.06	1.59	10.89	7.27
975	95	16	35	8	801.4	2.13	1.39	10.99	7.27

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 ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
Y	m	Hochwert, Bezugssystem ETRS89, Mittelmeridian 9°, UTM-Zone 32N
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_DATE	yyyymmdd	GPS-Datum
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT	m	GPS-Höhe des Hubschraubers, Bezugssystem WGS84
H_LASER_RAW	m	Messwert der Laserhöhe der Messsonde über der Erdoberfläche
HAG	m	Höhe des Hubschraubers über der Erdoberfläche
PRESSURE	kPa	Luftdruck
TEMP	°C	Lufttemperatur
LIVE_T	ms	Registrierzeitintervall
COSMIC_RAW	cps	Kosmische Strahlung > 3 MeV
TOT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Gesamtstrahlung
POT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Kaliumstrahlung
URA_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung
THO_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Thoriumstrahlung
URAUP_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung im upward-looking Kristall
TOT_KOR	cps	Gesamtstrahlung (korrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
POT_KOR	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden (korrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
URA_KOR	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden (korrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
THO_KOR	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden (korrigiert, geglättet und biomassekorrigiert)
EXPO	µR/h	Dosisleistung am Erdboden, ermittelt aus korrigierten Gehalten

Anmerkungen: siehe Magnetik

Anhang III

DVD-Inhalt

\	RHO@_010mbgl.flt
Adobe - Adobe Reader herunterladen.URL	RHO@_010mbgl.flt.gi
\Bericht\	RHO@_010mbgl.flt.xml
Technischer Bericht 175 Schleiz.pdf	RHO@_010mbgl.hdr
\Daten\	RHO@_015mbgl.flt
\HEM\	RHO@_015mbgl.flt.gi
Format_description_HEM175.txt	RHO@_015mbgl.flt.xml
HEM175_APP.XYZ	RHO@_015mbgl.hdr
HEM175_DAT.XYZ	RHO@_030mbgl.flt
HEM175_INV_L20.xyz	RHO@_030mbgl.flt.gi
HEM175_INV_L6.xyz	RHO@_030mbgl.flt.xml
HEM175_QCP.xyz	RHO@_030mbgl.hdr
HEM175_RAW.XYZ	RHO@_050mbgl.flt
\HMG\	RHO@_050mbgl.flt.gi
Format_description_HMG175.txt	RHO@_050mbgl.flt.xml
HMG175.xyz	RHO@_050mbgl.hdr
\HRD\	RHO@_075mbgl.flt
Format_description_HRD175.txt	RHO@_075mbgl.flt.gi
HRD175.xyz	RHO@_075mbgl.flt.xml
\Karten\	RHO@_100mbgl.flt
175-Schleiz-Übersicht.jpg	RHO@_100mbgl.flt.gi
\ArcGis\	RHO@_100mbgl.flt.xml
\DEM\	RHO@_100mbgl.hdr
DEM.flt	RHO@_125mbgl.flt
DEM.flt.gi	RHO@_125mbgl.flt.gi
DEM.flt.xml	RHO@_125mbgl.flt.xml
DEM.hdr	RHO@_125mbgl.hdr
\HEM\	RHO@_150mbgl.flt
QCP.flt	RHO@_150mbgl.flt.gi
QCP.flt.gi	RHO@_150mbgl.flt.xml
QCP.flt.xml	RHO@_150mbgl.hdr
QCP.hdr	RHOA1@380Hz.flt
RHO@_005mbgl.flt	RHOA1@380Hz.flt.gi
RHO@_005mbgl.flt.gi	RHOA1@380Hz.flt.xml
RHO@_005mbgl.flt.xml	RHOA1@380Hz.hdr
RHO@_005mbgl.hdr	RHOA2@1770Hz.flt
	RHOA2@1770Hz.flt.gi
	RHOA2@1770Hz.flt.xml
	RHOA2@1770Hz.hdr

RHOA3@5410Hz.flt	DeltaT_CE.flt
RHOA3@5410Hz.flt.gi	DeltaT_CE.flt.gi
RHOA3@5410Hz.flt.xml	DeltaT_CE.flt.xml
RHOA3@5410Hz.hdr	DeltaT_CE.hdr
RHOA4@8300Hz.flt	\HRD\ EXPO.flt
RHOA4@8300Hz.flt.gi	EXPO.flt.gi
RHOA4@8300Hz.flt.xml	EXPO.flt.xml
RHOA4@8300Hz.hdr	EXPO.hdr
RHOA5@41000Hz.flt	K.flt
RHOA5@41000Hz.flt.gi	K.flt.gi
RHOA5@41000Hz.flt.xml	K.flt.xml
RHOA5@41000Hz.hdr	K.hdr
RHOA6@129500Hz.flt	TC.flt
RHOA6@129500Hz.flt.gi	TC.flt.gi
RHOA6@129500Hz.flt.xml	TC.flt.xml
RHOA6@129500Hz.hdr	TC.hdr
ZST1@380Hz.flt	TC.flt
ZST1@380Hz.flt.gi	TC.flt.gi
ZST1@380Hz.flt.xml	TC.flt.xml
ZST1@380Hz.hdr	TC.hdr
ZST2@1770Hz.flt	Th.flt
ZST2@1770Hz.flt.gi	Th.flt.gi
ZST2@1770Hz.flt.xml	Th.flt.xml
ZST2@1770Hz.hdr	Th.hdr
ZST3@5410Hz.flt	U.flt
ZST3@5410Hz.flt.gi	U.flt.gi
ZST3@5410Hz.flt.xml	U.flt.xml
ZST3@5410Hz.hdr	U.hdr
ZST4@8300Hz.flt	\Karten\ \DEM\ 175 Schleiz Höhenmodell DEM.pdf
ZST4@8300Hz.flt.gi	\Fluglinien\ 175 Schleiz Fluglinien.pdf
ZST4@8300Hz.flt.xml	\HEM\ 175 Schleiz Halbraumwiderstand rhoa1.pdf
ZST4@8300Hz.hdr	175 Schleiz Halbraumwiderstand rhoa2.pdf
ZST5@41000Hz.flt	175 Schleiz Halbraumwiderstand rhoa3.pdf
ZST5@41000Hz.flt.gi	175 Schleiz Halbraumwiderstand rhoa4.pdf
ZST5@41000Hz.flt.xml	175 Schleiz Halbraumwiderstand rhoa5.pdf
ZST5@41000Hz.hdr	175 Schleiz Halbraumwiderstand rhoa6.pdf
ZST6@129500Hz.flt	175 Schleiz Qualitätskontrollparameter.pdf
ZST6@129500Hz.flt.gi	175 Schleiz Schwerpunktstiefe zst1.pdf
ZST6@129500Hz.flt.xml	175 Schleiz Schwerpunktstiefe zst2.pdf
ZST6@129500Hz.hdr	175 Schleiz Schwerpunktstiefe zst3.pdf
\HMG\ DeltaT.flt	175 Schleiz Schwerpunktstiefe zst4.pdf
DeltaT.flt.gi	175 Schleiz Schwerpunktstiefe zst5.pdf
DeltaT.flt.xml	
DeltaT.hdr	

175 Schleiz Schwerpunktstiefe zst6.pdf	\HMG\
175 Schleiz Widerstand 005m unter GOK.pdf	175 Schleiz Magnetik ←
175 Schleiz Widerstand 010m unter GOK.pdf	mit anthropogenen Effekten.pdf
175 Schleiz Widerstand 015m unter GOK.pdf	175 Schleiz Magnetik ←
175 Schleiz Widerstand 030m unter GOK.pdf	ohne anthropogene Effekte.pdf
175 Schleiz Widerstand 050m unter GOK.pdf	\HRD\
175 Schleiz Widerstand 075m unter GOK.pdf	175 Schleiz Dosisleistung.pdf
175 Schleiz Widerstand 100m unter GOK.pdf	175 Schleiz Gesamtstrahlung.pdf
175 Schleiz Widerstand 125m unter GOK.pdf	175 Schleiz Kalium.pdf
175 Schleiz Widerstand 150m unter GOK.pdf	175 Schleiz Ternary.pdf
	175 Schleiz Thorium.pdf
	175 Schleiz Uran.pdf

\VRS\	VRS1750152.pdf	VRS1750451.pdf	VRS1750681.pdf
\L20\	VRS1750161.pdf	VRS1750461.pdf	VRS1750691.pdf
VRS1750011.pdf	VRS1750171.pdf	VRS1750471.pdf	VRS1750701.pdf
VRS1750019.pdf	VRS1750181.pdf	VRS1750481.pdf	VRS1750711.pdf
VRS1750021.pdf	VRS1750191.pdf	VRS1750491.pdf	VRS1750721.pdf
VRS1750028.pdf	VRS1750201.pdf	VRS1750501.pdf	VRS1750731.pdf
VRS1750029.pdf	VRS1750211.pdf	VRS1750511.pdf	VRS1750741.pdf
VRS1750031.pdf	VRS1750221.pdf	VRS1750521.pdf	VRS1750751.pdf
VRS1750039.pdf	VRS1750231.pdf	VRS1750531.pdf	VRS1750761.pdf
VRS1750041.pdf	VRS1750241.pdf	VRS1750541.pdf	VRS1750771.pdf
VRS1750048.pdf	VRS1750251.pdf	VRS1750551.pdf	VRS1750772.pdf
VRS1750049.pdf	VRS1750261.pdf	VRS1750561.pdf	VRS1750781.pdf
VRS1750051.pdf	VRS1750271.pdf	VRS1750571.pdf	VRS1750791.pdf
VRS1750058.pdf	VRS1750281.pdf	VRS1750581.pdf	VRS1750801.pdf
VRS1750061.pdf	VRS1750291.pdf	VRS1750591.pdf	VRS1750811.pdf
VRS1750068.pdf	VRS1750301.pdf	VRS1750601.pdf	VRS1750821.pdf
VRS1750069.pdf	VRS1750311.pdf	VRS1750602.pdf	VRS1750831.pdf
VRS1750071.pdf	VRS1750321.pdf	VRS1750611.pdf	VRS1750841.pdf
VRS1750078.pdf	VRS1750331.pdf	VRS1750612.pdf	VRS1750851.pdf
VRS1750079.pdf	VRS1750341.pdf	VRS1750621.pdf	VRS1750861.pdf
VRS1750081.pdf	VRS1750351.pdf	VRS1750622.pdf	VRS1750871.pdf
VRS1750089.pdf	VRS1750361.pdf	VRS1750631.pdf	VRS1750881.pdf
VRS1750091.pdf	VRS1750371.pdf	VRS1750632.pdf	VRS1750891.pdf
VRS1750101.pdf	VRS1750381.pdf	VRS1750641.pdf	VRS1750892.pdf
VRS1750111.pdf	VRS1750391.pdf	VRS1750642.pdf	VRS1750901.pdf
VRS1750121.pdf	VRS1750401.pdf	VRS1750651.pdf	VRS1750902.pdf
VRS1750122.pdf	VRS1750411.pdf	VRS1750652.pdf	VRS1750911.pdf
VRS1750131.pdf	VRS1750412.pdf	VRS1750661.pdf	VRS1750921.pdf
VRS1750141.pdf	VRS1750421.pdf	VRS1750662.pdf	VRS1750931.pdf
VRS1750142.pdf	VRS1750431.pdf	VRS1750671.pdf	VRS1750941.pdf
VRS1750151.pdf	VRS1750441.pdf	VRS1750672.pdf	VRS1750951.pdf

VRS1750961.pdf	VRS1750069.pdf	VRS1750451.pdf	VRS1750821.pdf
VRS1750971.pdf	VRS1750071.pdf	VRS1750461.pdf	VRS1750831.pdf
VRS1750981.pdf	VRS1750078.pdf	VRS1750471.pdf	VRS1750841.pdf
VRS1750991.pdf	VRS1750079.pdf	VRS1750481.pdf	VRS1750851.pdf
VRS1751001.pdf	VRS1750081.pdf	VRS1750491.pdf	VRS1750861.pdf
VRS1751012.pdf	VRS1750089.pdf	VRS1750501.pdf	VRS1750871.pdf
VRS1751013.pdf	VRS1750091.pdf	VRS1750511.pdf	VRS1750881.pdf
VRS1751021.pdf	VRS1750101.pdf	VRS1750521.pdf	VRS1750891.pdf
VRS1751031.pdf	VRS1750111.pdf	VRS1750531.pdf	VRS1750892.pdf
VRS1751041.pdf	VRS1750121.pdf	VRS1750541.pdf	VRS1750901.pdf
VRS1751051.pdf	VRS1750122.pdf	VRS1750551.pdf	VRS1750902.pdf
VRS1751061.pdf	VRS1750131.pdf	VRS1750561.pdf	VRS1750911.pdf
VRS1751071.pdf	VRS1750141.pdf	VRS1750571.pdf	VRS1750921.pdf
VRS1751081.pdf	VRS1750142.pdf	VRS1750581.pdf	VRS1750931.pdf
VRS1751091.pdf	VRS1750151.pdf	VRS1750591.pdf	VRS1750941.pdf
VRS1751101.pdf	VRS1750152.pdf	VRS1750601.pdf	VRS1750951.pdf
VRS1751111.pdf	VRS1750161.pdf	VRS1750602.pdf	VRS1750961.pdf
VRS1751121.pdf	VRS1750171.pdf	VRS1750611.pdf	VRS1750971.pdf
VRS1751131.pdf	VRS1750181.pdf	VRS1750612.pdf	VRS1750981.pdf
VRS1751141.pdf	VRS1750191.pdf	VRS1750621.pdf	VRS1750991.pdf
VRS1751151.pdf	VRS1750201.pdf	VRS1750622.pdf	VRS1751001.pdf
VRS1751161.pdf	VRS1750211.pdf	VRS1750631.pdf	VRS1751012.pdf
VRS1751171.pdf	VRS1750221.pdf	VRS1750632.pdf	VRS1751013.pdf
VRS1751181.pdf	VRS1750231.pdf	VRS1750641.pdf	VRS1751021.pdf
VRS1751191.pdf	VRS1750241.pdf	VRS1750642.pdf	VRS1751031.pdf
VRS1751201.pdf	VRS1750251.pdf	VRS1750651.pdf	VRS1751041.pdf
VRS1751211.pdf	VRS1750261.pdf	VRS1750652.pdf	VRS1751051.pdf
VRS1751221.pdf	VRS1750271.pdf	VRS1750661.pdf	VRS1751061.pdf
VRS1751231.pdf	VRS1750281.pdf	VRS1750662.pdf	VRS1751071.pdf
VRS1751241.pdf	VRS1750291.pdf	VRS1750671.pdf	VRS1751081.pdf
	VRS1750301.pdf	VRS1750672.pdf	VRS1751091.pdf
\\L6\	VRS1750311.pdf	VRS1750681.pdf	VRS1751101.pdf
VRS1750011.pdf	VRS1750321.pdf	VRS1750691.pdf	VRS1751111.pdf
VRS1750019.pdf	VRS1750331.pdf	VRS1750701.pdf	VRS1751121.pdf
VRS1750021.pdf	VRS1750341.pdf	VRS1750711.pdf	VRS1751131.pdf
VRS1750028.pdf	VRS1750351.pdf	VRS1750721.pdf	VRS1751141.pdf
VRS1750029.pdf	VRS1750361.pdf	VRS1750731.pdf	VRS1751151.pdf
VRS1750031.pdf	VRS1750371.pdf	VRS1750741.pdf	VRS1751161.pdf
VRS1750039.pdf	VRS1750381.pdf	VRS1750751.pdf	VRS1751171.pdf
VRS1750041.pdf	VRS1750391.pdf	VRS1750761.pdf	VRS1751181.pdf
VRS1750048.pdf	VRS1750401.pdf	VRS1750771.pdf	VRS1751191.pdf
VRS1750049.pdf	VRS1750411.pdf	VRS1750772.pdf	VRS1751201.pdf
VRS1750051.pdf	VRS1750412.pdf	VRS1750781.pdf	VRS1751211.pdf
VRS1750058.pdf	VRS1750421.pdf	VRS1750791.pdf	VRS1751221.pdf
VRS1750061.pdf	VRS1750431.pdf	VRS1750801.pdf	VRS1751231.pdf
VRS1750068.pdf	VRS1750441.pdf	VRS1750811.pdf	VRS1751241.pdf

Anhang IV

Karten

(Originalkarten 1:50.000 verkleinert auf 1:200.000)

DESMEX
Bund Geodätisches Institut
EONA
AEROGEOPHYSIKALISCHE
MESSUNGEN IM GEBIET
SCHLEIZ
FLUGLINIEN

GPS-System: MIDAS, mit
DGPS MAX Empfänger

Die Luftvermessungen wurden mit dem System MIDAS, mit dem GPS-System MIDAS, mit dem DGPS MAX Empfänger durchgeführt. Die Messungen wurden am 12. August 2015 durchgeführt. Die Messungen wurden am 12. August 2015 durchgeführt. Die Messungen wurden am 12. August 2015 durchgeführt.

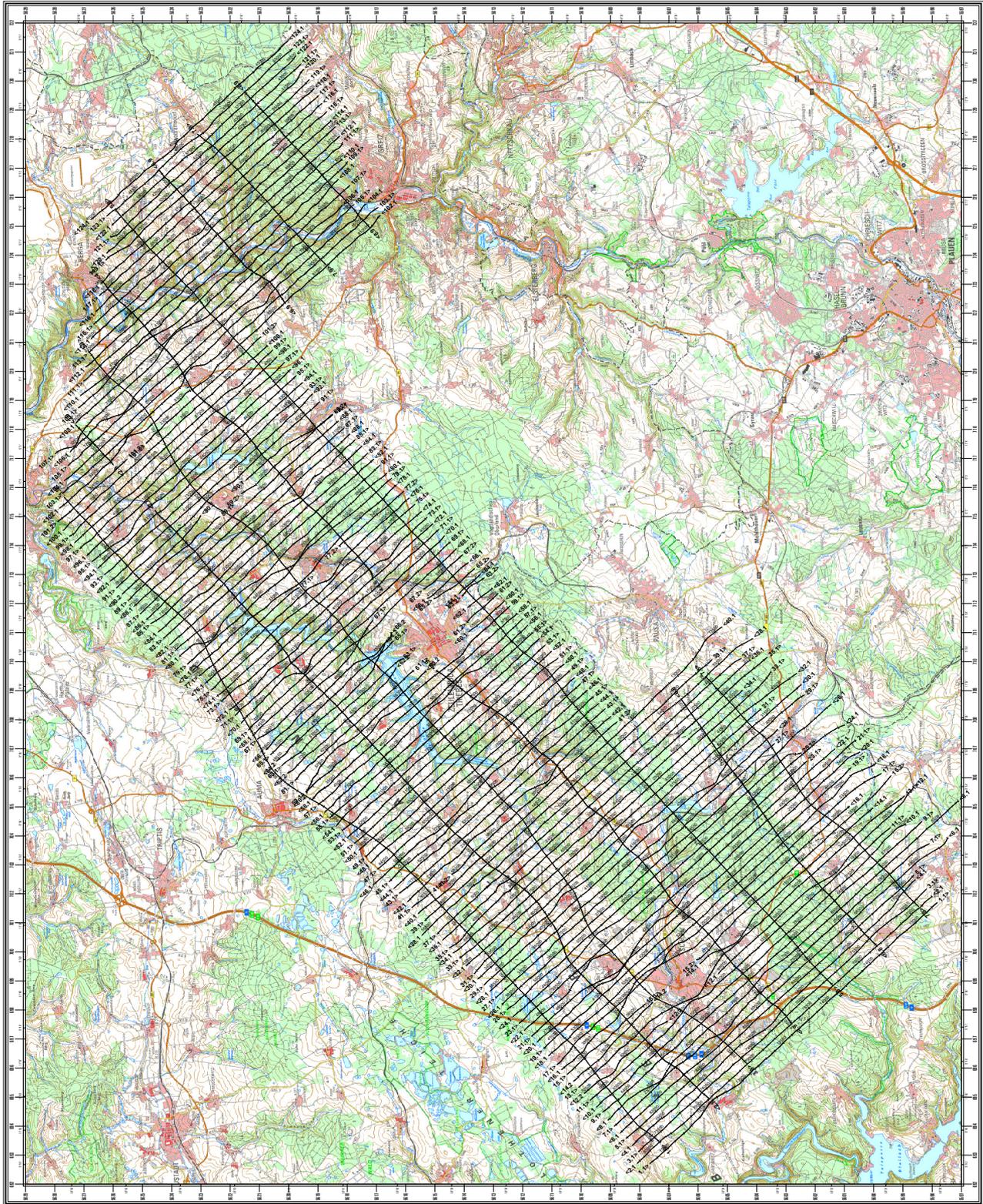


Maßstab 1:50000 (2 cm = 1 km)

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
30555 Hannover
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft
Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Bundesministerium für Arbeit und Soziales
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Bundesministerium für Gesundheit
Bundesministerium für Inneres
Bundesministerium für Justiz
Bundesministerium für Kultur und Medien
Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft
Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Bundesministerium für Arbeit und Soziales
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Bundesministerium für Gesundheit
Bundesministerium für Inneres
Bundesministerium für Justiz
Bundesministerium für Kultur und Medien
Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend

Schleiz
Topographie und Fluglinien

Gebiet: Schleiz
Parameter: Topographie und Fluglinien
Befliegung: am 12. August 2015
Bearbeitung: B. J. Geographische Erdkundung
Hannover 2015 - www.geozentrum-hannover.de



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

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