

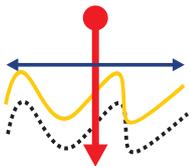
B. Siemon, T. Kerner, M. Ibs-von Seht,  
W. Voß, H.-J. Rehli, J. Pielawa



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

# Technischer Bericht zur Befliegung Staßfurt

## Juni–August 2007



Forschungsverbundvorhaben  
»Dynamik abgesoffener oder  
gefluteter Salzbergwerke und  
ihres Deckgebirgsstockwerks«

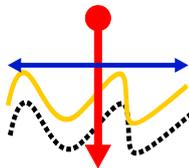




**Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe**

## **Technischer Bericht zur Befliegung Staßfurt**

**Juni–August 2007**



im Rahmen des Forschungsverbundvorhabens  
**Dynamik abgesoffener oder gefluteter  
Salzbergwerke und ihres  
Deckgebirgsstockwerks**

mit finanzieller Unterstützung durch das  
**Bundesministerium für Bildung und Forschung**



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

im Förderprogramm  
**Forschung für die Nachhaltigkeit**

Projekträger:  
**Karlsruher Institut für Technologie**



Autoren: B. Siemon  
T. Kerner  
M. Ibs-von Seht  
W. Voß  
H.-J. Rehli  
J. Pielawa

Datum: 01.03.2010

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Personal .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Kartenverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Liste der Vertikalsektionen .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungen .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Zusammenfassung.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Das Messgebiet .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR.....</b>	<b>8</b>
4.1. Messhubschrauber .....	9
4.2. Messausrüstung.....	9
4.3. Elektromagnetik .....	10
4.4. Magnetik .....	12
4.5. Radiometrie.....	13
4.6. Navigations- und Positionierungssystem.....	14
4.7. Datenerfassung und -aufzeichnung.....	16
4.8. Videosystem .....	16
4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber .....	17
<b>5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten .....</b>	<b>18</b>
5.1. Prozessabläufe .....	18
5.2. Positionsdaten .....	19
5.2.1. Koordinaten .....	19
5.2.2. Radarhöhen.....	19
5.2.3. Laserhöhen .....	19
5.2.4. Topografische Höhen .....	20
5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik .....	22
5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems .....	22
5.3.2. Nullniveaubestimmung.....	23
5.3.3. Datenkorrektur.....	24
5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter .....	24
5.3.5. Auswirkung von anthropogenen Einflüssen auf die HEM-Daten.....	26

5.3.6. Statistische Niveauanpassung .....	26
5.3.7. Dateninterpolation und -glättung .....	26
5.3.8. 1D-Inversion der HEM-Daten .....	27
5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse .....	27
5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik .....	29
5.4.1. Magnetisches Totalfeld .....	29
5.4.2. Berechnung des IGRF .....	29
5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen .....	29
5.4.4. Statistische Niveauanpassung .....	29
5.4.5. Präsentation der Magnetik-Ergebnisse .....	30
5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie .....	31
5.5.1. Verminderung des Rauschens .....	31
5.5.2. Registrierzeitkorrektur .....	32
5.5.3. Hintergrundstrahlung .....	32
5.5.4. Anpassung der Messhöhe an Standardtemperatur und -druck .....	33
5.5.5. Compton-Korrektur .....	33
5.5.6. Zählraten in Standardflughöhe .....	34
5.5.7. Berechnung von Radioelement-Konzentrationen und Strahlungsrate .....	35
5.5.8. Statistische Niveauanpassung .....	36
5.5.9. Präsentation der Radiometrie-Ergebnisse .....	36
<b>6. Kartografische Arbeiten .....</b>	<b>37</b>
6.1. Topographische Karte 1:50.000 .....	37
6.2. Kartenherstellung mit Geosoft- und GIS-Software .....	37
6.3. Ergebniskarten .....	38
<b>7. Archivierung .....</b>	<b>39</b>
<b>8. Literatur .....</b>	<b>40</b>
<b>Unterschriften .....</b>	<b>42</b>
<b>Anhang I: Befliegungsdaten Messgebiet Staßfurt .....</b>	<b>43</b>
<b>Anhang II: Beschreibung der Datenformate .....</b>	<b>52</b>
<b>Anhang III: Karten .....</b>	<b>60</b>
<b>Anhang IV: Vertikalsektionen .....</b>	<b>91</b>
<b>Anlage: DVD</b>	

## **Personal:**

### **Projektleitung**

Johannes **Gerardi**, Koordination des Gesamtprojektes, Projektleitung BGR TV 2, B3.2, BGR

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

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

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

Tatjana **Kerner**, HEM-Datenauswertung und Interpretation, B2.1, BGR

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

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

### **Messgruppe**

Hans-Joachim **Rehli**, Elektrotechnikingenieur, Messgruppenleiter, B2.1, BGR

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

Karl-Heinz **Meinhardt**, Operator, Systembetreuer, B2.1, BGR

Josef **Scheiwein**, Hubschrauberingenieur, B2.1, BGR

Michael **Schütt**, Pilot, Wiking Helikopter Service GmbH

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

---

### **Abbildungsverzeichnis:**

1. Lageskizze des Messgebietes Staßfurt
2. Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR

### **Tabellenverzeichnis:**

1. Technische Daten der Befliegung Staßfurt
2. Technische Spezifikationen des BGR-Messhubschraubers mit der Kennung D-HBGR
3. Geophysikalische Messsysteme
4. HEM-Systemparameter
5. Basisstation
6. Energiebereiche registrierter Strahlungsquellen
7. Navigations- und Positionierungssysteme
8. Höhenmesser
9. Datenerfassung und -aufzeichnung
10. Videosystem
11. Sonstige Ausrüstung
12. Kalibrierwerte für das HEM-System
13. Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung
14. Korrekturfaktoren Hintergrundstrahlung
15. Koeffizienten der Einstreuratzen
16. Absorptionskonstanten
17. Sensitivitäten
18. Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Staßfurt
19. Gitterparameter
20. Inhalt der DVD
- A-1:** Flugprotokoll

---

### **Kartenverzeichnis (1: 50 000):**

1. Topografie und Fluglinien
2. Digitales Höhenmodell in m NN
3. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 133.350 Hz ( $\rho_{06}$ ) in  $\Omega\text{m}$
4. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 41.485 Hz ( $\rho_{05}$ ) in  $\Omega\text{m}$
5. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 8.339 Hz ( $\rho_{04}$ ) in  $\Omega\text{m}$
6. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 5.489 Hz ( $\rho_{03}$ ) in  $\Omega\text{m}$
7. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 1.822 Hz ( $\rho_{02}$ ) in  $\Omega\text{m}$
8. Scheinbarer spezifischer Widerstand bei 386 Hz ( $\rho_{01}$ ) in  $\Omega\text{m}$
9. Schwerpunktstiefe bei 133.350 Hz (zst6) in m unter GOK
10. Schwerpunktstiefe bei 41.485 Hz (zst5) in m unter GOK
11. Schwerpunktstiefe bei 8.339 Hz (zst4) in m unter GOK
12. Schwerpunktstiefe bei 5.489 Hz (zst3) in m unter GOK
13. Schwerpunktstiefe bei 1.822 Hz (zst2) in m unter GOK
14. Schwerpunktstiefe bei 386 Hz (zst1) in m unter GOK
15. Spezifischer Widerstand bei 1 m unter GOK
16. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter GOK
17. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter GOK
18. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter GOK
19. Spezifischer Widerstand bei 20 m unter GOK
20. Spezifischer Widerstand bei 25 m unter GOK
21. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter GOK
22. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter GOK
23. Spezifischer Widerstand bei 50 m unter GOK
24. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter GOK
25. Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes in nT
26. Gehalte von Kalium im Boden in %
27. Äquivalentkonzentration von Thorium im Boden in ppm
28. Äquivalentkonzentration von Uran im Boden in ppm
29. Gesamtstrahlung in cps
30. Strahlungsrate am Boden in  $\mu\text{R/h}$

## Liste der Vertikalsektionen:

### Messprofile:

<b>1.</b>	VRS 1.1	<b>35.</b>	VRS 23.4	<b>69.</b>	VRS 46.1	<b>103.</b>	VRS 75.1
<b>2.</b>	VRS 2.1	<b>36.</b>	VRS 24.1	<b>70.</b>	VRS 46.2	<b>104.</b>	VRS 76.1
<b>3.</b>	VRS 3.1	<b>37.</b>	VRS 24.4	<b>71.</b>	VRS 47.1	<b>105.</b>	VRS 77.1
<b>4.</b>	VRS 4.1	<b>38.</b>	VRS 25.1	<b>72.</b>	VRS 48.1	<b>106.</b>	VRS 78.1
<b>5.</b>	VRS 4.4	<b>39.</b>	VRS 26.1	<b>73.</b>	VRS 49.1	<b>107.</b>	VRS 79.1
<b>6.</b>	VRS 5.1	<b>40.</b>	VRS 26.4	<b>74.</b>	VRS 49.2	<b>108.</b>	VRS 80.1
<b>7.</b>	VRS 6.1	<b>41.</b>	VRS 27.2	<b>75.</b>	VRS 49.4	<b>109.</b>	VRS 81.1
<b>8.</b>	VRS 7.1	<b>42.</b>	VRS 27.4	<b>76.</b>	VRS 50.1	<b>110.</b>	VRS 82.1
<b>9.</b>	VRS 8.1	<b>43.</b>	VRS 28.1	<b>77.</b>	VRS 50.2	<b>111.</b>	VRS 83.1
<b>10.</b>	VRS 9.1	<b>44.</b>	VRS 29.1	<b>78.</b>	VRS 51.1	<b>112.</b>	VRS 84.1
<b>11.</b>	VRS 10.1	<b>45.</b>	VRS 29.4	<b>79.</b>	VRS 52.1	<b>113.</b>	VRS 85.1
<b>12.</b>	VRS 11.1	<b>46.</b>	VRS 30.2	<b>80.</b>	VRS 53.1	<b>114.</b>	VRS 86.1
<b>13.</b>	VRS 12.1	<b>47.</b>	VRS 30.4	<b>81.</b>	VRS 53.4	<b>115.</b>	VRS 87.1
<b>14.</b>	VRS 12.4	<b>48.</b>	VRS 30.5	<b>82.</b>	VRS 54.1	<b>116.</b>	VRS 88.1
<b>15.</b>	VRS 13.1	<b>49.</b>	VRS 31.1	<b>83.</b>	VRS 55.1	<b>117.</b>	VRS 89.1
<b>16.</b>	VRS 14.1	<b>50.</b>	VRS 31.4	<b>84.</b>	VRS 56.1	<b>118.</b>	VRS 90.1
<b>17.</b>	VRS 14.4	<b>51.</b>	VRS 32.1	<b>85.</b>	VRS 57.1	<b>119.</b>	VRS 91.1
<b>18.</b>	VRS 15.1	<b>52.</b>	VRS 33.2	<b>86.</b>	VRS 58.1	<b>120.</b>	VRS 92.1
<b>19.</b>	VRS 15.4	<b>53.</b>	VRS 33.4	<b>87.</b>	VRS 59.1	<b>121.</b>	VRS 93.1
<b>20.</b>	VRS 16.1	<b>54.</b>	VRS 34.1	<b>88.</b>	VRS 60.1	<b>122.</b>	VRS 93.4
<b>21.</b>	VRS 16.4	<b>55.</b>	VRS 35.1	<b>89.</b>	VRS 61.1	<b>123.</b>	VRS 94.1
<b>22.</b>	VRS 16.5	<b>56.</b>	VRS 35.4	<b>90.</b>	VRS 62.1	<b>124.</b>	VRS 95.1
<b>23.</b>	VRS 17.1	<b>57.</b>	VRS 36.2	<b>91.</b>	VRS 63.1	<b>125.</b>	VRS 96.1
<b>24.</b>	VRS 17.4	<b>58.</b>	VRS 36.4	<b>92.</b>	VRS 64.1	<b>126.</b>	VRS 97.1
<b>25.</b>	VRS 18.1	<b>59.</b>	VRS 37.1	<b>93.</b>	VRS 65.1	<b>127.</b>	VRS 98.1
<b>26.</b>	VRS 19.1	<b>60.</b>	VRS 37.4	<b>94.</b>	VRS 66.1	<b>128.</b>	VRS 99.1
<b>27.</b>	VRS 19.4	<b>61.</b>	VRS 38.1	<b>95.</b>	VRS 67.1	<b>129.</b>	VRS 100.1
<b>28.</b>	VRS 20.1	<b>62.</b>	VRS 39.2	<b>96.</b>	VRS 68.1	<b>130.</b>	VRS 101.1
<b>29.</b>	VRS 20.4	<b>63.</b>	VRS 40.1	<b>97.</b>	VRS 69.1	<b>131.</b>	VRS 102.1
<b>30.</b>	VRS 21.1	<b>64.</b>	VRS 41.1	<b>98.</b>	VRS 70.1	<b>132.</b>	VRS 103.1
<b>31.</b>	VRS 21.4	<b>65.</b>	VRS 42.2	<b>99.</b>	VRS 71.1	<b>133.</b>	VRS 104.1
<b>32.</b>	VRS 22.1	<b>66.</b>	VRS 43.1	<b>100.</b>	VRS 72.1	<b>134.</b>	VRS 105.1
<b>33.</b>	VRS 22.4	<b>67.</b>	VRS 44.1	<b>101.</b>	VRS 73.1	<b>135.</b>	VRS 106.1
<b>34.</b>	VRS 23.1	<b>68.</b>	VRS 45.2	<b>102.</b>	VRS 74.1	<b>136.</b>	VRS 107.1

Kontrollprofile:

<b>137.</b> VRS 108.1	<b>168.</b> VRS 138.1	<b>198.</b> VRS 1.9	<b>228.</b> VRS 26.7
<b>138.</b> VRS 109.1	<b>169.</b> VRS 139.1	<b>199.</b> VRS 2.9	<b>229.</b> VRS 26.9
<b>139.</b> VRS 110.2	<b>170.</b> VRS 139.4	<b>200.</b> VRS 3.9	<b>230.</b> VRS 27.9
<b>140.</b> VRS 111.1	<b>171.</b> VRS 140.1	<b>201.</b> VRS 4.9	<b>231.</b> VRS 28.9
<b>141.</b> VRS 112.1	<b>172.</b> VRS 140.4	<b>202.</b> VRS 5.7	<b>232.</b> VRS 29.9
<b>142.</b> VRS 113.1	<b>173.</b> VRS 141.1	<b>203.</b> VRS 5.9	<b>233.</b> VRS 30.9
<b>143.</b> VRS 114.1	<b>174.</b> VRS 142.4	<b>204.</b> VRS 6.9	<b>234.</b> VRS 31.9
<b>144.</b> VRS 115.1	<b>175.</b> VRS 142.1	<b>205.</b> VRS 7.9	<b>235.</b> VRS 32.9
<b>145.</b> VRS 116.1	<b>176.</b> VRS 143.1	<b>206.</b> VRS 8.7	<b>236.</b> VRS 33.9
<b>146.</b> VRS 117.1	<b>177.</b> VRS 144.1	<b>207.</b> VRS 8.9	
<b>147.</b> VRS 118.1	<b>178.</b> VRS 144.4	<b>208.</b> VRS 9.9	
<b>148.</b> VRS 119.1	<b>179.</b> VRS 145.1	<b>209.</b> VRS 10.9	
<b>149.</b> VRS 120.1	<b>180.</b> VRS 145.4	<b>210.</b> VRS 11.9	
<b>150.</b> VRS 121.1	<b>181.</b> VRS 146.1	<b>211.</b> VRS 12.9	
<b>151.</b> VRS 122.1	<b>182.</b> VRS 146.4	<b>212.</b> VRS 13.9	
<b>152.</b> VRS 123.1	<b>183.</b> VRS 147.1	<b>213.</b> VRS 14.9	
<b>153.</b> VRS 124.1	<b>184.</b> VRS 148.1	<b>214.</b> VRS 15.9	
<b>154.</b> VRS 125.1	<b>185.</b> VRS 149.1	<b>215.</b> VRS 16.9	
<b>155.</b> VRS 126.1	<b>186.</b> VRS 150.1	<b>216.</b> VRS 17.7	
<b>156.</b> VRS 127.1	<b>187.</b> VRS 151.1	<b>217.</b> VRS 17.9	
<b>157.</b> VRS 128.1	<b>188.</b> VRS 152.1	<b>218.</b> VRS 18.9	
<b>158.</b> VRS 129.1	<b>189.</b> VRS 153.1	<b>219.</b> VRS 19.9	
<b>159.</b> VRS 130.1	<b>190.</b> VRS 154.1	<b>220.</b> VRS 20.9	
<b>160.</b> VRS 131.1	<b>191.</b> VRS 155.1	<b>221.</b> VRS 21.9	
<b>161.</b> VRS 132.1	<b>192.</b> VRS 156.1	<b>222.</b> VRS 22.8	
<b>162.</b> VRS 133.1	<b>193.</b> VRS 157.1	<b>223.</b> VRS 22.9	
<b>163.</b> VRS 134.1	<b>194.</b> VRS 158.1	<b>224.</b> VRS 23.9	
<b>164.</b> VRS 135.1	<b>195.</b> VRS 159.1	<b>225.</b> VRS 24.9	
<b>165.</b> VRS 136.1	<b>196.</b> VRS 160.1	<b>226.</b> VRS 25.7	
<b>166.</b> VRS 137.1	<b>197.</b> VRS 161.1	<b>227.</b> VRS 25.9	
<b>167.</b> VRS 137.4			

## Abkürzungen

°	Grad
°C	Grad Celsius
'	Minute
”	Sekunde
%	Prozent
1D	eindimensional
$\alpha, \beta, \gamma, a$	Einstreukoeffizienten
a	Hintergrundstrahlung vom Hubschrauber
A, A'	Amplituden
Ah	Amperestunden
Am	Amperemeter
b	Höhenstrahlung
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bi	Wismut
BMWi	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BTU	Brandenburgische Technische Universität Cottbus
C	Konzentrationen
C <sub>H</sub>	Zählrate für Höhenstrahlung
CF	Compact Flash
cm	Zentimeter
cps	counts per second
Cs	Cäsium
$\Delta_{\text{topo}}$	Niveauekorrektur für Topografie
$\Delta T$	Anomalien des magnetischen Feldes
$\Delta V$	(magnetische) Tagesvariationen
$\delta_T$	Residual (Magnetik)
$\delta$	inverse normierte Skintiefe (= h/p)
d <sub>a</sub>	scheinbare Tiefe
D <sub>a</sub>	scheinbarer Abstand
d <sub>DS</sub>	Deckschichtmächtigkeit
d <sub>DS_korr</sub>	korrigierte Deckschichtmächtigkeit
DEM	Digitales Höhenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
DHI-WASY	Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung
dpi	dots per inch (Pixel pro Zoll)

---

DVD	Digital Versatile Disc
E	Osten
e	Basis des natürlichen Logarithmus ( $1/e \approx 0.37$ )
$\epsilon$	Komponentenverhältnis (= Q/I)
EM	Elektromagnetik
eTh	Äquivalentkonzentration von Thorium am Boden
eU	Äquivalentkonzentration von Uran am Boden
f	Frequenz
FAS	Fugro Airborne Surveys
ft	feet (Fuss)
GBA	Geologische Bundesanstalt
GK	Gauß-Krüger (Koordinaten)
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
GPS-Z	vertikale GPS-Komponente
h	Höhe des EM-Systems über Grund (Birdhöhe)
h_GPS	GPS-Höhe des EM-Systems
h_GPS	korrigierte GPS-Höhe des EM-Systems
h_l	korrigierte Laserhöhe des EM-Systems
h_l <sub>DGM</sub>	DGM-korrigierte Laserhöhe des EM-Systems
h_l <sub>INV</sub>	Laserhöhe des EM-Systems aus 1D-HEM-Inversion
h_r	abgeleitete Radarhöhe des EM-Systems
h_r <sub>mess</sub>	gemessene Radarhöhe des Hubschraubers über Grund
h <sub>e</sub>	effektive Höhe des Hubschraubers
HEM	Hubschrauberelektromagnetik
HMG	Hubschraubermagnetik
HRD	Hubschrauberradiometrie
Hz	Hertz
I	Inphase-Komponente (Realteil) der HEM-Daten
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAGA	International Association of Geomagnetism and Aeronomy
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
IHU	Geologie und Umwelt GmbH
IIF	Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung
JoGU	Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
K	Grad Kelvin
K	Kalium
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie (Projektträger)

---

km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kPa	Kilopascal
K-UTEC AG	Salttechnologies, Sondershausen
l	Liter
LAGB	Landesamt für Geologie und Bergwesen von Sachsen-Anhalt
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
log	Logarithmus
lt	Lebenszeit
LVerGeo	Landesamt für Vermessung und Geoinformationen, Sachsen-Anhalt
m	Meter
m NN	Meter über Normalnull
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante
m üG	Meter über Gelände
MeV	Megaelektronenvolt
ms	Millisekunde
μ	Absorptionskonstante
μ <sub>0</sub>	magnetisch Permeabilität der Luft (= 1,257 · 10 <sup>-6</sup> Vs/Am)
μR/h	Mikroröntgen pro Stunde
N <sub>c</sub>	Hintergrundstrahlung
n, N	Zählrate
N, NE, NW	Norden, Nord-Ost, Nord-West
NL	nicht-linear
NN	Normalnull
nT	Nanotesla
Ωm	Ohmmeter (Ohm*m)
π	Kreiszahl (= 3,14159265...)
p	Skintiefe
P, P <sub>0</sub>	barometrischer Druck
PDF	Portable Document Format
ppm	parts per million
Q	Quadrature oder Out-of-phase-Komponente (Imaginärteil) der HEM-Daten
r	Abstandsparameter
ρ	spezifischer Widerstand
ρ <sub>a</sub>	scheinbarer spezifischer Widerstand (Halbraumwiderstand)
ρ <sub>DS</sub>	Deckschichtwiderstand
ρ <sub>DS_korr</sub>	korrigierter Deckschichtwiderstand
ρ <sub>w</sub>	scheinbarer spezifischer Widerstand von (Meer-)Wasser
S	Sensitivität

---

s	Sekunde
S, SE, SW	Süden, Süd-Ost, Süd-West
STD	Standardtemperatur und -druck
STF	Standardfehler
t	Zeit
T	Totalintensität des magnetischen Feldes
T, T <sub>0</sub>	Temperaturen
TC	Gesamtstrahlung
Th	Thorium
TK	Topographische Karte
Tl	Thallium
T <sub>TP</sub>	Abschneideperiode bei Tiefpass-Filter
topo	Topografie
TUC	Technische Universität Clausthal
U	Uran
UTC	Universal Time Coordinated (Weltzeit)
VRS	Vertikalschnitt des spezifischen Widerstandes
V	Volt
V <sub>s</sub>	Voltsekunde
V <sub>M</sub>	Mittelwert der Tagesvariationen
W	Westen
WGS	World Geodetic System
z*	Schwerpunktstiefe
ζ, λ	geografische Koordinaten (ζ = Breite, λ = Länge)

## 1. Zusammenfassung

Das Forschungsverbundvorhaben „Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks“ befasst sich mit den Prozessen, die im Bereich der ehemaligen Kaligruben am Staßfurter Salzsattel zu den bekannten Bergschäden und deren Auswirkung auf die Tagesoberfläche als Senkungen noch festgestellt werden können. Die Förderung des Forschungsvorhabens erfolgt durch das Förderprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit“ (FONA) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Die Bergbaufolgelandschaft abgesoffener und gefluteter Schachtanlagen des Salzbergbaus wird maßgeblich durch Deformationsprozesse und Lösungserscheinungen geprägt, was sich in Form von Bodensenkungen und Tagesbrüchen darstellt. Um das Kenntnisdefizit an geologischen, geomechanischen, geohydraulischen und geochemischen Basisinformationen zur Bewertung des Senkungsgeschehens zu verringern, haben sich neun Partner aus Wissenschaft und Industrie zu diesem Forschungsverbundvorhaben zusammengefunden. Das Landesamt für Geologie und Bergwesen von Sachsen-Anhalt (LAGB) ist als assoziiertes Mitglied am Forschungsverbund beteiligt. Der Projektträger ist das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), vormals: Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe für Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE). Das Vorhaben hat eine Laufzeit von Ende September 2006 bis Ende Dezember 2010.

Neben der Koordination des Gesamtprojektes führt die BGR ein eigenes Teilvorhaben durch, in dem die Hubschrauber-geophysik ein Arbeitspaket darstellt. Aerogeophysikalische Vermessungen ermöglichen flächendeckende, geologische und hydrogeologische Übersichtskartierungen in kurzer Zeit, die Aussagen zum tektonischen Bau (Schollengliederung, Homogenbereiche, Verlauf von Störungen), zum Material der oberen Bodenschichten und zur Verbreitung und möglicher Aufstiegsbereichen salzhaltiger Wässer ermöglichen. Steil stehende geologische Körper mit hohem Leitfähigkeitskontrast zur Umgebung (Flankenbereich der Salzkörper, Salzwasseraufstiegszonen) können erkannt werden. Die in den aerogeophysikalischen Daten erkennbaren Störungszonen können im Rahmen einer gemeinsamen Interpretation mit den Störungsindikationen aus der Fernerkundung und anderer Quellen abgeglichen werden und somit Ansatzpunkte für gezielte Untersuchungen liefern.

Das etwa 467 km<sup>2</sup> große Messgebiet Staßfurt überdeckt den Staßfurt-Egelner-Sattel und hat eine planmäßige Ausdehnung von 18,5 km in SW-NE- und 20–34 km in NW-SE-Richtung. Der Sollabstand der NW-SE-Messprofile beträgt 100 m, derjenige der SW-NE-Kontrollprofile 1000 m. Mit 29 Messflügen wurden die 161 Mess- und 33 Kontrollprofile mit einer geplanten Gesamtlänge von etwa 5100 km von dem Hubschrauberteam der BGR vom Flugplatz Magdeburg-Cochstedt aus an 18 Mess-tagen in der Zeit vom 6. Juni bis 28. August 2007 vermessen.

Das hierfür eingesetzte Hubschraubermesssystem der BGR umfasst die Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD). Das Messsystem besteht aus einem Hubschrauber als Systemträger, den simultan registrierenden geophysikalischen Messinstrumenten, die sich in einer nachgeschleppten 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 pro Sekunde aufgezeichnet, was bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von etwa 139 km/h auf einen Messpunktabstand von knapp 4 m führte. Die mittlere Höhe der Flugsonde lag bei etwa 50 m über Gelände.

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

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

Folgende Karten, die in Form von farbigen Isolinienplänen mit unterlegter Topografie vorliegen, sind im Maßstab 1:50.000 erstellt worden:

- Fluglinienplan der vermessenen Profile (Ist-Flugwege),
- Digitales Geländemodell,
- Scheinbare spezifische Widerstände (Halbraumwiderstände) und Schwerpunktstiefen für sechs Messfrequenzen 386, 1.822, 5.489, 8.339, 41.485 und 133.350 Hz,
- Spezifische Widerstände in den Tiefen 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 und 60 m unter GOK, abgeleitet aus den HEM-Inversionsmodellen,
- Anomalien des magnetischen Totalfeldes.
- Gehalte des Radioelements Kalium, Äquivalentkonzentrationen der Radioelemente Uran und Thorium sowie die Gesamtstrahlung und die Strahlungsrate am Boden.

Ferner sind für alle Fluglinien Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes, abgeleitet aus den HEM-Inversionsmodellen, erstellt worden.

## 2. Einleitung

Bodensenkungen und Tagesbrüche wie im Bereich der ehemaligen Kaligruben am Staßfurter Salzsattel können als Folge von abgesoffenen und gefluteten Schachtanlagen des Salzbergbaus auftreten, da diese oft im Zusammenhang mit Deformationsprozessen und Lösungserscheinungen stehen. Im Rahmen eines vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsvorhabens zu „Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Beispiel der Stadt Staßfurt“ wurde ein erhebliches Kenntnisdefizit an geologischen, geomechanischen, geohydraulischen und geochemischen Basisinformationen zur Bewertung des Senkungsgeschehens festgestellt (Knödel et al., 2002). Daher wurde ein weiteres BMBF-Forschungsverbundvorhaben initiiert, das sich mit der „Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks“ befasst. Die Förderung des aktuellen Forschungsvorhabens erfolgt durch das Förderprogramm „Forschung für die Nachhaltigkeit“ (FONA) des BMBF. Deshalb zielt das Ergebnis der Forschungsarbeiten im Raum Staßfurt auf die beispielhafte Entwicklung eines nachhaltigen Gestaltungs- und Flächennutzungskonzeptes für einen urbanen Lebens- und Wirtschaftsraum ab, der durch Bergbau und eine mehr als 150-jährige Industriegeschichte geprägt ist (Gerardi, 2009).

Zur Durchführung des Forschungsvorhabens mit dem Ziel der Behebung der Kenntnisdefizite haben sich die folgende Partner aus Wissenschaft und Industrie zusammengefunden:

- BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- BTU Brandenburgische Technische Universität Cottbus
- DHI-WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung, Berlin
- IHU Geologie und Umwelt GmbH, Stendal
- IIF Institut für Interdisziplinäre Isotopenforschung, Leipzig
- JoGU Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
- K-UTEC AG Salttechnologies, Sondershausen
- LIAG Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover
- TUC Technische Universität Clausthal

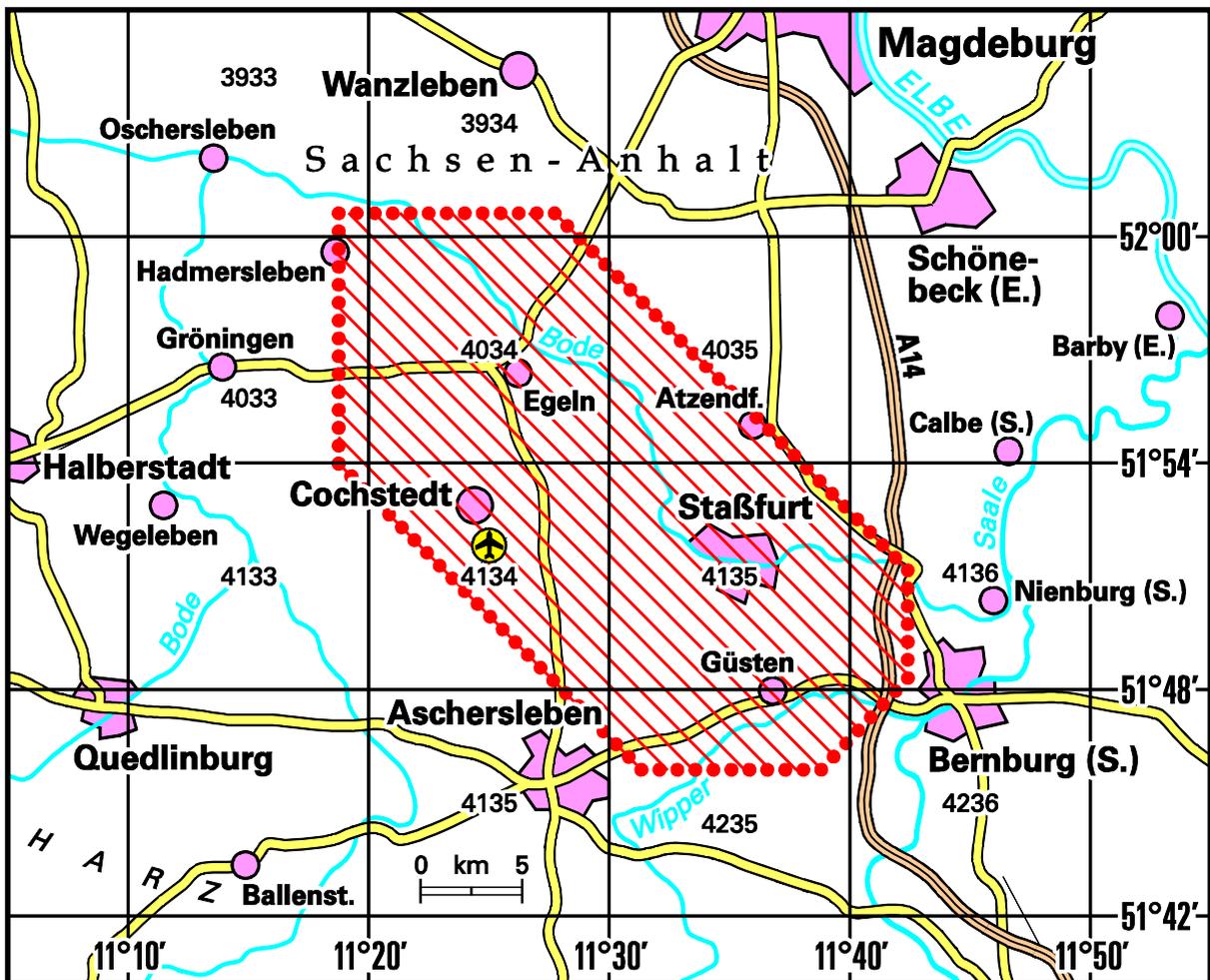
Das Landesamt für Geologie und Bergwesen von Sachsen-Anhalt (LAGB) ist als assoziiertes Mitglied am Forschungsverbund beteiligt und übernimmt die Finanzierung von einem Teil der durchgeführten Tiefbohrungen. Als Projektträger fungiert das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das aus dem ehemaligen Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe für Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) hervorgegangen ist. Die BGR koordiniert das Gesamtprojektes und führt ein eigenes Teilvorhaben (TV 2) durch, in dem die Hubschrauber-geophysik ein Arbeitspaket (AP 2) darstellt. Das Vorhaben hat eine Laufzeit von Ende September 2006 bis Ende Dezember 2010.

Aerogeophysikalische Vermessungen sind vielfältig nutzbar. Sie ermöglichen in kurzer Zeit flächendeckende, geologische und hydrogeologische Übersichtserkundungen, die Aussagen u. a. zum tektonischen Bau wie Schollengliederung, Abgrenzung von Homogenbereichen oder Verlauf von Störungen (Jordan & Siemon, 2002), zum Material der obersten Bodenschichten (Wilford et al., 1997) und zur Verbreitung und möglicher Aufstiegsbereichen salzhaltiger Wässer (Siemon et al., 2001) ermöglichen. Steil stehende geologische Körper mit hohem Leitfähigkeitskontrast zur Umgebung, wie beispielweise Flankenbereiche der Salzkörper oder Salzwasseraufstiegszonen, können erkannt werden (Sengpiel & Siemon, 1998). Die in den aerogeophysikalischen Daten erkennbaren Störungszonen können im Rahmen einer gemeinsamen Interpretation mit den Störungsindikationen aus der Fernerkundung und anderer Quellen abgeglichen werden und somit Ansatzpunkte für gezielte Untersuchungen liefern (Siemon & Röttger, 2005).

Der vorliegende „Technische Bericht“ protokolliert die Durchführung der aerogeophysikalischen Untersuchung im Messgebiet Staßfurt und beschreibt die verwendete Messausrüstung sowie die Bearbeitung der Daten und die Darstellung der Ergebnisse in Form von Karten und Schnitten. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt im Abschlussbericht zum Forschungsverbundvorhaben. Teilergebnisse sind bereits auf Workshops (Kerner & Siemon, 2009) und Tagungen (Kerner et al., 2009; Krause et al., 2009) vorgestellt sowie den Projektpartnern zur Nutzung, beispielsweise bei der Erstellung von geologischen und hydraulischen Modellen, zur Verfügung gestellt worden.

### 3. Das Messgebiet

Das Messgebiet Staßfurt überdeckt den Staßfurt-Egelner-Sattel und hat eine planmäßige Ausdehnung von 18,5 km in SW-NE- und 20–34 km in NW-SE-Richtung. Der Sollabstand der NW-SE-Messprofile beträgt 100 m, derjenige der SW-NE-Kontrollprofile 1000 m (**Abb. 1**). Das Messgebiet erstreckt sich von etwa 11°19' bis 11°42' westlicher Länge und 51°46' bis 52°00' nördlicher Breite und wird (im Uhrzeigersinn) umrandet durch die Städte und Gemeinden Ascherleben, Kroppenstedt, Hadmersleben, Altenweddingen, Atzendorf, Förderstedt und Bernburg.



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

Die Befliegung des Messgebietes Staßfurt mit drei geophysikalischen Verfahren Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD) wurde von dem Hubschrauberteam der BGR an 18 Messtagen in der Zeit vom 6. Juni bis 28. August 2007 vom Flugplatz Magdeburg-Cochstedt aus mit 29 Messflügen und einer Gesamtflugstrecke von 8.923 km durchgeführt. Mit 161 Mess- und 33 Kontrollprofilen mit einer Gesamtlänge von 5109 Profilkilometer wurde eine Fläche von etwa 467 km<sup>2</sup> planmäßig vermessen. Die Messprofile sind durch L\*.1 und die Kontrollprofile durch T\*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L\*.2 bzw. T\*.8 gekennzeichnet. Aufgrund

zahlreicher Gegebenheiten im Messgebiet, die eine Überfliegung in großer Höhe erforderlich machten, mussten etliche Profile zur Auswertung der HEM-Daten nachträglich unterteilt werden. Diese Fortsetzungsprofile sind durch L\*.4 bzw. T\*.7 gekennzeichnet. Die tatsächliche Zahl der Mess- und Kontrollprofile beläuft sich somit für die HEM auf 197 bzw. 39 mit einer Gesamtlänge von 5137 km. Bei den Magnetik- und Radiometriedaten war diese Unterteilung nicht notwendig. Es wurde jedoch nur jeweils ein Profil von den doppelt beflogenen Profilen berücksichtigt. Ferner konnten bei zwei Flügen (12497 und 12498) mit 13 Profilen die Messdaten der Radiometrie aufgrund technischer Probleme nicht ausgewertet werden. Die Gesamtprofillänge lag daher nur bei 4711 km. Am Ende der Messflüge wurde jeweils ein etwa 5 km langer Abschnitt parallel zur Landebahn des Flugplatzes Magdeburg-Cochstedt („Eichstrecke“) für Kalibrierzwecke überflogen („100“). Diese Profile sowie die Profile für die „Magnetische Rose“ und die Testprofile über der Bode bzw. parallel zu Hochspannungsleitung und Eisenbahntrassen sind in den Datenbanken für die einzelnen Profile nicht enthalten. Einzelheiten zum Messgebiet und den Messflügen können der **Tab. 1** sowie der **Tab. A-1** im **Anhang I** entnommen werden.

Aus fliegerischer Sicht stellte die aerogeophysikalische Vermessung des Gebietes Staßfurt hohe Ansprüche an den eingesetzten Piloten (M. Schütt) der Fa. Wiking Helikopter Service GmbH, Mariensiel, da das teilweise hügelige Gelände durch zahlreiche Hochspannungsleitungen und Hauptverkehrsstraßen durchzogen, teilweise dicht besiedelt und auf den Hügeln bewaldet ist. Störungen der Messungen z. B. durch Stromleitungen, Straßen oder über Ortschaften waren zwar vorhanden, dennoch konnten die Messungen meist wie geplant durchgeführt werden. Bei einer mittleren Flugeschwindigkeit über Grund von 139 km/h lagen die Messpunktabstände bei knapp 4 m (HEM, HMG) bzw. 40 m (HRD).

Die Sollflughöhe des Hubschraubers beträgt entlang der Messprofile 70 m über Grund. 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 Staßfurt lag sie bei etwa 50 m über Grund. Während eines Messfluges, speziell vor dem ersten und nach dem letzten Profil, aber auch zwischen den Profilen, steigt der Hubschrauber mit dem Messsystem auf eine deutlich größere Höhe (>360 m), um fern von störenden Einflüssen die notwendigen Kalibrierungen des HEM-Systems durchführen zu können.

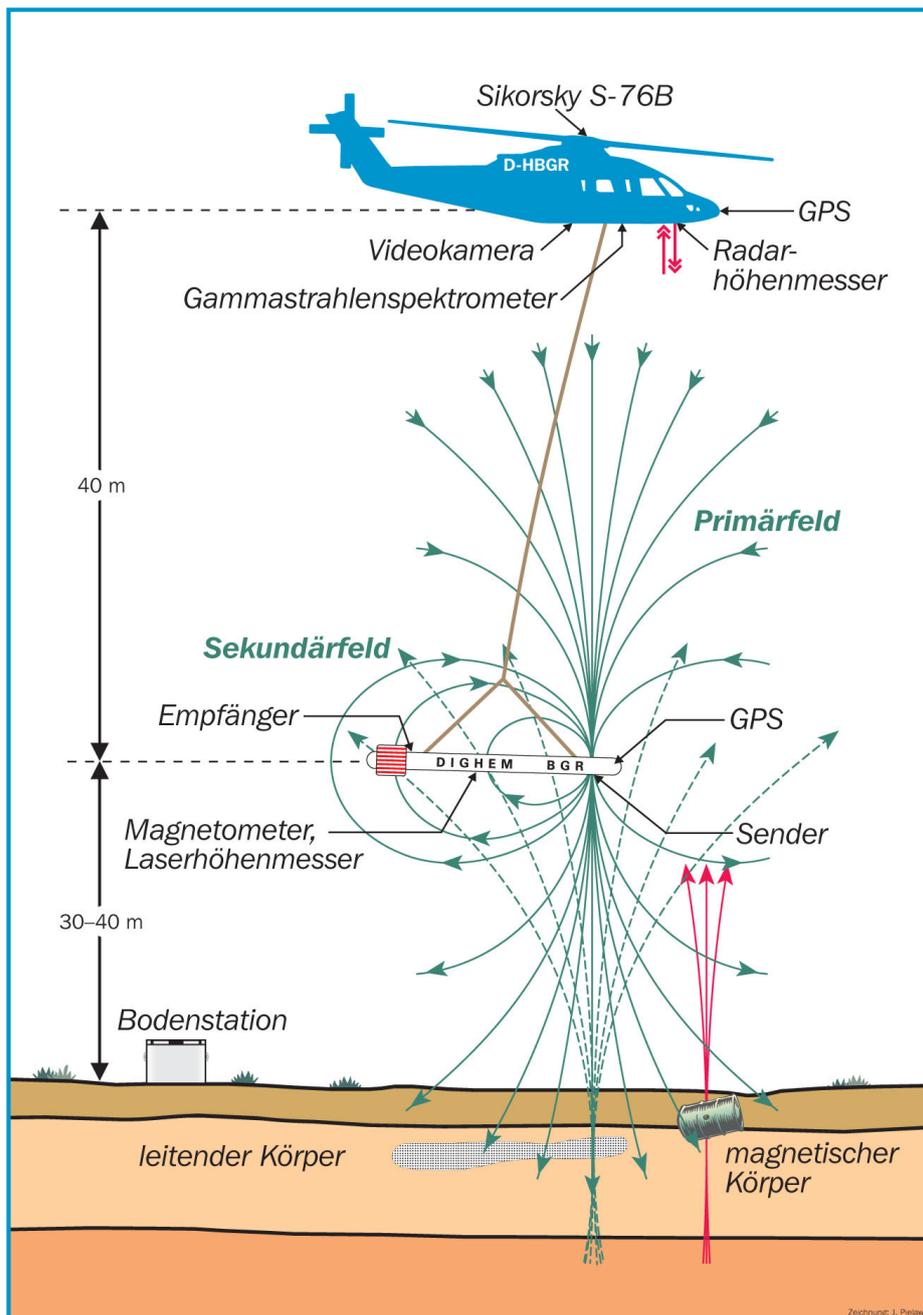
Die Bodenstation zur Aufzeichnung der magnetischen Tagesvariationen wurde auf dem Flughafengelände bei 11°25'54,3" westlicher Länge und 51°51'31,4" nördlicher Breite aufgestellt.

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

Messgebiet BGR-Gebietsnummer	Staßfurt 124
Befliegungszeitraum	06.06.–13.06.2007 25.06.–03.07.2007 22.08.–28.08.2007
Größe des Messgebietes	467 km <sup>2</sup>
Gesamt-Profilkilometer (Messprofile HEM/HMG/HRD) (Zusatzprofile)	5137/5109/4711 km 149 km
Zahl der Messflüge	29
Bezeichnung der Messflüge (original) (umbenannt)	14088–14132 12488–12432 (21 Nummern nicht existent)
Mittlere Flughöhe der Messsonde über Grund	50 m
Mittlere Messfluggeschwindigkeit	139 km/h
Zahl der Messprofile (HEM/HMG/HRD)	197/161/148
Länge der Messprofile	20–34 km
Richtung der Messprofile	132,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Messprofile	100 m
Zahl der Kontrollprofile (HEM/HMG/HRD)	39/33/33
Länge der Kontrollprofile	16,5 km
Richtung der Kontrollprofile	42,5° bzw. Gegenrichtung
Abstand der Kontrollprofile	1000 m
Zahl der Sonderprofile „Eichstrecke“	27
Zahl der Sonderprofile „Magnetische Rose	8
Zahl der Testprofile	7

#### 4. Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR

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



**Abb. 2:** Prinzipskizze des Hubschraubermesssystems der BGR

#### 4.1. Messhubschrauber

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

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

Hubschrauber	
Typ	Sikorsky S-76B (Hersteller: Sikorsky, USA)
Baujahr	1986
Antrieb	2 Turbinen Pratt & Whitney PT6B-36A mit je 1.033 SHP (shaft horse power)
Maximales Abfluggewicht	11.700 pounds (5.363 kg)
Maximales Gewicht der Außenlast	3.300 pounds (1.500 kg)
Maximale Messflugzeit	2:45 Stunden
Kerosinverbrauch pro Stunde	350–400 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 EM-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 nachgeschleppt wird (**Abb. 3**). Die Länge des Kabels ist so bemessen, dass die Messungen der hochempfindlichen magnetischen und elektromagnetischen Sensoren (**Tab. 3**) durch den Hubschrauber möglichst wenig gestört werden. Die äußere Hülle der etwa 10 m langen, zigarrenförmigen Flugsonde, die einen Durchmesser von 0,5 m hat, ist aus Kevlar gefertigt, um eine möglichst hohe Biegesteifigkeit zu erhalten. Dieses Material zeichnet sich durch eine extrem hohe mechanische Festigkeit bei gleichzeitig geringer elektrischer Leitfähigkeit aus.

Die geophysikalischen Messgeräte werden zentral durch das HeliDas-System 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 Tablett-Computer diverse Informationen, wie z. B. den Flugweg oder die jeweiligen Messkanäle, grafisch darstellen lassen.

**Tab. 3:** Geophysikalische Messsysteme

Geophysikalische Messsysteme		
Flugsonde	<b>I. Elektromagnetisches 6-Frequenz-Messsystem (HEM)</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes bis zu Tiefen von etwa 150 m
	<b>Hersteller</b>	Fugro Airborne Surveys (FAS), Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Resolve BGR, BKS36a (intern: Bird 61)
	<b>II. Cäsium-Magnetometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung des erdmagnetischen Totalfeldes
Hubschrauber	<b>Hersteller</b>	Geometrics, USA
	<b>Gerätebezeichnung</b>	G-822A
	<b>III. Gammastrahlenspektrometer</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung im Energiebereich von 0 bis 3 MeV
	<b>Hersteller</b>	Exploranium, Kanada
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Spektrometer: GR-820; Kristalldetektor: GPX-1024/256

### 4.3. Elektromagnetik

Bei dem elektromagnetischen (EM) Messverfahren werden von den Sendespulen zeitlich variierende magnetische Felder, die Primärfelder, mit diskreten Sendefrequenzen abgestrahlt. Die magnetischen Felder dringen in den Erduntergrund ein und induzieren dort, abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes, elektrische Wirbelströme. Die magnetischen Felder dieser Wirbelströme, die Sekundärfelder, induzieren ihrerseits sehr schwache Spannungen in den zugeordneten Empfängerspulen des EM-Systems (vgl. **Abb. 2**).

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

**Tab. 4:** HEM-Systemparameter

Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Orientierung	Bezeichnung FAS	Bezeichnung BGR
386	7,938	horizontal-koplanar	EM_3	1. Frequenz
1.822	7,931	horizontal-koplanar	EM_5	2. Frequenz
5.489	9,055	vertikal-koaxial	EM_6	3. Frequenz
8.339	7,925	horizontal-koplanar	EM_2	4. Frequenz
41.485	7,912	horizontal-koplanar	EM_1	5. Frequenz
133.350	7,918	horizontal-koplanar	EM_4	6. Frequenz

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

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

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

Das HEM-Messsystem ist nicht nur gegenüber dem elektrisch leitenden Untergrund empfindlich, sondern auch gegenüber anthropogenen Objekten, wie z. B. Bebauungen, metallischen Körpern und elektrischen Installationen, welche sich aufgrund der Frequenzabhängigkeit der HEM-Amplituden insbesondere bei den niedrigen Frequenzen bemerkbar machen können. Da der Hubschrauber auch als ein solches Objekt anzusehen ist, ist das HEM-System in einer Flugsonde eingebaut und wird in genügend großem Abstand (ca. 40 m) unterhalb des Hubschraubers nachgeschleppt.

#### 4.4. Magnetik

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

Das gemessene Magnetfeld setzt sich aus verschiedenen Beiträgen zusammen. Das magnetische Normalfeld der Erde hat seine Ursache im Erdinneren und weist eine vom Äquator zu den Polen hin zunehmende Intensität auf. In Deutschland hat es eine Stärke von etwa 48.000 nT. Es wird überlagert vom Krustefeld, dessen Quellen in Gesteinen mit Anteilen an ferromagnetischen Mineralien liegen. 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. Schließlich unterliegt das geogene Magnetfeld auf Grund von Schwankungen im Zustand der Ionosphäre einem Tagesgang. In Deutschland liegt dieser im Bereich von etwa 10 bis 20 nT.

Während geogene Anomalien im Allgemeinen eine große räumliche Ausdehnung aufweisen, sind anthropogene Störungen des Magnetfeldes meist örtlich begrenzt und lassen sich daher sicher identifizieren. Zur Erfassung des magnetischen Tagesganges wird eine ebenfalls mit einem Cäsium-Magnetometer bestückte Basisstation betrieben (**Tab. 5**). Sie zeichnet an einem magnetisch ruhigen 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 Basisstation die GPS-Zeit mitregistriert.

**Tab. 5:** Basisstation

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

## 4.5. Radiometrie

Die von natürlichen und künstlichen Radionukliden ausgehende Gammastrahlung wird mit Hilfe eines Kristalldetektors gemessen (**Tab. 3**). Der Detektor besteht aus insgesamt fünf Natrium-Jodid-Kristallen, die in einer Aluminiumbox zusammengefasst im Hubschrauber montiert sind. Jeder der 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 Registrierung 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 elektrischen Impulse proportional zur Energie der einfallenden Gammastrahlung ist.

Das Gammastrahlenspektrometer besitzt einen Spektralbereich von 0 bis 3 MeV, der in 255 Kanäle aufgeteilt ist. Jeder Impuls des Detektors wird dem entsprechenden Spektralkanal zugeordnet und gezählt. Zusätzlich wird die Intensität der Höhenstrahlung (3 bis 6 MeV) in einem separaten Kanal registriert. 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. **Tab. 6** zeigt die Zuordnung der Strahlungsquellen zu den einzelnen Energiefenstern. Der fünfte, nach oben gerichtete Kristall dient zur Messung der Gammastrahlung, die von atmosphärischem Radongas ausgeht und kann zur Korrektur dieses Einflusses auf die Zählraten von Uran und Thorium verwendet werden.

In der Registrierapparatur werden die Spektren über jeweils eine Sekunde aufsummiert und gespeichert. Zusätzlich werden die Zählraten in den interessierenden Energiebereichen (vgl. **Tab. 6**) bestimmt und gespeichert. Das Spektrometer wird laufend für jeden der Kristalle einzeln mit Hilfe der natürlichen Thoriumstrahlung intern stabilisiert: Verschiebungen des Thoriumpeaks (2,62 MeV) gegenüber dem Sollwert werden erkannt und die Verstärkung der Photovervielfacherröhre des entsprechenden Kristalls automatisch korrigiert.

**Tab. 6:** Energiebereiche registrierter Strahlungsquellen

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

#### 4.6. Navigations- und Positionierungssystem

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

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

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

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

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

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

Die genaue Höhe der Flugsonde (**Tab. 8**) über Grund 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. Ein weiterer Vorteil des Laserhöhenmessers ist neben seiner Genauigkeit der fokussierte Durchmesser des Laserstrahls, der es ermöglicht, über lichten Wäldern häufig die Entfernung bis zum Boden zu erfassen und nicht nur, wie beim Radarhöhenmesser, den Abstand bis zu den Baumkronen.

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

**Tab. 8:** Höhenmesser

Höhenmesser		
Hubschrauber	<b>Radarhöhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über Grund
	<b>Hersteller</b>	Sperry, USA
	<b>Gerätebezeichnung</b>	AA-200
	<b>Barometrischer Höhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Bestimmung der Höhe des Hubschraubers über NN
	<b>Hersteller</b>	Rosemount, USA
Flugsonde	<b>Gerätebezeichnung</b>	1241A5B
	<b>Laserhöhenmesser</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Präzise Bestimmung der Höhe der Flugsonde über Grund
	<b>Hersteller</b>	Riegl, Österreich
	<b>Gerätebezeichnung</b>	LD90-3800VHS

#### 4.7. Datenerfassung und -aufzeichnung

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

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

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

#### 4.8. Videosystem

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

**Tab. 10:** *Videosystem*

Videosystem		
<b>Hubschrauber</b>	<b>Datenerfassungs- und Datenaufzeichnungssystem</b>	
	<b>Aufgabe</b>	Aufzeichnung des Flugweges sowie Kontrolle der Messsonde bei Start und Landung und während des Messfluges über einen Monitor
	<b>Hersteller</b>	Farbkamera: Sony, Japan Videorekorder: AXI, Schweden
	<b>Gerätebezeichnung</b>	Farbkamera: DC372P Videoservert: AXIS 241S

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

#### 4.9. Sonstige Ausrüstung im Hubschrauber

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

**Tab. 11:** Sonstige Ausrüstung

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

## 5. Verarbeitung und Darstellung der Messdaten

Die Ziele der Datenverarbeitung können wie folgt zusammengefasst werden:

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

### 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 CF-Card auf die Laptops übertragen, mittels Oasis montaj von Geosoft visualisiert und erste Datenverarbeitungsschritte automatisch durchgeführt.

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

Die finale Datenbearbeitung beginnt mit der Bearbeitung der Positionsdaten:

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

Die folgenden Datenverarbeitungsschritte sind für alle Methoden gültig:

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

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

## 5.2. Positionsdaten

### 5.2.1. Koordinaten

Die im Fluge registrierten Koordinaten, die die Positionen des Hubschraubers und der Flugsonde angeben, beziehen sich auf das WGS 84-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 Staßfurt sind auf Gauß-Krüger-Koordinaten (Germany Zone 4, DHDN, Bessel 1841 Ellipsoid) bezogen.

### 5.2.2. Radarhöhen

Die Radarhöhenwerte, die vom Hubschrauber aus gemessen werden, liegen zunächst in der Einheit „feet“ vor und müssen in Meter über Gelände (m üG) umgerechnet werden. Zum Vergleich mit der Laserhöhe wird die Radarhöhe der Flugsonde benötigt. Hierzu wird die effektive Kabellänge, d. h. der mittlere Abstand zwischen Hubschrauber und Flugsonde, abgezogen. Um zu gewährleisten, dass Radar- und Laserhöhen im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmen, wird normalerweise die effektive Kabellänge experimentell bestimmt und zur Umrechnung der gemessenen Radarhöhe ( $h_{r_{\text{mess}}}$ ) in die Radarhöhe der Flugsonde ( $h_r$ ) herangezogen:

$$h_r \text{ [m]} = h_{r_{\text{mess}}} \text{ [feet]} \cdot 0,3048 \text{ [m/feet]} \cdot 1,04 - 44 \text{ [m]},$$

wobei fehlende Radarhöhen durch Laserhöhen ersetzt werden.

### 5.2.3. Laserhöhen

Die mit einem Laserhöhenmesser gemessenen Höhen der Flugsonde über Gelände können – wie auch die Radarhöhe – Fehler (Ausreißer, Lücken) enthalten, die linear interpoliert werden. Ferner können zu große Werte (z. B. Neigung der Flugsonde oder in Kurven) oder zu kleine Werte (Bewuchs, Bebauung) auftreten. Die durch die Neigung (durchschnittlich etwa 6°) verursachten zu großen Laserhöhen werden durch Anwendung der Kosinus-Funktion korrigiert. Laserhöhenfehler in Kurven können aufgrund der zu großen Abweichung von der zugehörigen Radarhöhe erkannt und eliminiert werden. Die zu kleinen Werte werden standardmäßig durch eine Kombination von Filtern korrigiert.

Hierzu wird zunächst eine reduzierte Laserhöhe, 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 und der Maximalwerte der reduzierten Laserhöhe in vorgegebenen Intervallen mit Fensterbreiten von jeweils 7 bzw. 21 Messwerten, wobei einzelne Ausreißer der Standardabweichung durch Anwendung eines schmalen (3 Werte) nicht-linearen Filters eliminiert werden. Anschließend werden die Laserhöhenwerte durch die Maximalwerte ersetzt, falls die Abweichung beider Werte nicht zu groß (2 m) ist und die Standardabweichung über einem vorzugebenden Schwellwert (0,4) liegt. Zur Vermeidung von Sprüngen der gegenüber den reduzierten Laserhöhen stets größeren Maximalwerte werden die Maximalwerte auf das Niveau der angrenzenden reduzierten Laserhöhen bezogen. Abschließend erfolgt

eine leichte Glättung (Tiefpass-Abschneideperiode = 3 s, d. h. 30 Werte) der korrigierten reduzierten Laserhöhe und die Addition der Basislinie.

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.

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.

#### **5.2.4. Topografische Höhen**

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

$$\text{topo [m NN]} = h_{\text{GPS}} [\text{m NN}] - h_{\text{l}} [\text{m}].$$

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

Wie bei den geophysikalischen Daten ist auch bei den topografischen Daten eine Anpassung der Profildaten untereinander notwendig. Die Ursache hierfür ist die Ungenauigkeit der GPS-Höhendaten. Zunächst wurden die topografischen Höhen auf Basis der Messwerte über dem Testprofil flugweise korrigiert. Danach erfolgte anstatt des normalerweise verwendeten Microlevelling-Verfahrens eine Korrektur auf Basis von digitalen Höhenmodellen des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (ATKIS-DGM, 2009) und Laserscannermessungen (TopScan, 2009).

Das Topscan-Höhenmodell weist gegenüber dem ATKIS-DGM eine höhere Auflösung aus und enthält auch die anthropogen verursachten Geländeänderungen (Halden, Tagebaue, etc.), überdeckt aber nur einen Teil des Messgebietes der Aerogeophysik. Daher wurde das ATKIS-DGM in dem Bereich, in dem das TopScan-Höhenmodell vorliegt, durch dieses ersetzt. Hierzu wurden zunächst die ASCII-Daten der jeweiligen Höhenmodelle in gleichmäßige Gitter (Zellengröße: 25 m) transformiert und anschließend auf die Messpunkte der Aerogeophysik projiziert. Diese kombinierten topografischen Höhen (DGM [m NN]) dienen nun als Basis für die Niveauekorrektur ( $\Delta_{\text{topo}}$  [m]) der aus der Hubschraubervermessung gewonnen topografischen Höhen (topo [m NN])

$$\Delta_{\text{topo}} [\text{m}] = \text{DGM} [\text{m NN}] - \text{topo} [\text{m NN}],$$

die im Mittel etwa 2 m betrug. Die verbliebenen Bereiche, in denen anthropogen verursachten Geländeänderungen existieren, wurden im ATKIS-DGM außerhalb des von TopScan vermessenen Be-

reiches durch die niveauekorrigierten topografischen Höhen aus der Hubschraubervermessung ersetzt.

Aufgrund der Filterung bei der Laserhöhenkorrektur und des Linienabstandes von 100 bzw. 1000 m konnten nicht alle topografischen Details erfasst werden. Die auf die Messpunkte auf den Flugprofilen projizierten Geländehöhen geben daher bei der Kartenproduktion die wahren Geländehöhen nur in geglätteter Form wieder.

Aus den korrigierten Werten für die Gelände- und Laserhöhen wird auch die Sensorhöhe in m NN neu berechnet und mit den gemessenen GPS-Höhen verglichen. Der langwellige Anteil der Differenz dieser Werte ( $\text{spline}(\Delta_{\text{topo}} [\text{m}]))$  – ermittelt mit einer Spline-Funktion – ist als Fehler der GPS-Höhe anzusehen und wird zur Korrektur verwendet:

$$h_{\text{GPS}_{\text{korr}}} [\text{m NN}] = h_{\text{GPS}} [\text{m NN}] - \text{spline}(\Delta_{\text{topo}} [\text{m}]).$$

Der kurzwellige Anteil ist dagegen auf die Schwankungen des Messsystems zurückzuführen

Die Korrektur der topografischen Höhe auf Basis der digitalen Höhenmodelle wurde nur in den Datensatz, der die HEM-Inversionsmodelle (vgl. **Abschnitt 5.3.8**) enthält, übertragen, da die Inversionsmodelle zur weiteren Verwendung, wie z.B. die Integration in geologische 3D-Modelle, eine genaue Höhenreferenz benötigen. Daher weichen die Höhenwerte in dem Inversionsdatensatz von denen in den anderen Datensätzen ab.

Bei der Inversion der HEM-Daten ist der Abstand der Flugsonde von der Modelloberkante als Ausgabeparameter behandelt, d. h. neu berechnet worden. Da die Korrektur der topografischen Höhen erst nach Abschluss der HEM-Inversion erfolgte, mussten diese nachträglich korrigiert werden. Hierzu wurde zunächst der Höhenfehler, der den GPS-Messungen zuzuordnen ist, bestimmt und korrigiert, indem die mittlere Differenz der digitalen Höhenmodelle und der topografischen Höhen als langwelliger Korrekturterm an die GPS-Höhen des HEM-Messsystems ( $h_{\text{GPS}} [\text{m NN}]$ ) – wie oben beschrieben – angebracht wurde. Unter der Annahme, dass die erste Schichtgrenze in den Inversionsmodellen von ungenauen Laserhöhenbestimmungen ( $h_{\text{IINV}} [\text{m}]$ ) nicht wesentlich beeinflusst ist, wurde die Höhe dieser Schichtgrenze und die digitalen Höhenmodelle genutzt, um die Deckschichtparameter der Inversionsmodelle zu korrigieren, wobei die Summe aus Laserhöhe und Deckschichtmächtigkeit sowie der Leitwert der Deckschicht (= Mächtigkeit / spezifischer Widerstand) nicht verändert wurde:

$$h_{\text{LDGM}} [\text{m}] = h_{\text{GPS}_{\text{korr}}} [\text{m NN}] - \text{DGM} [\text{m NN}]$$

$$d_{\text{DS}_{\text{korr}}} [\text{m}] = d_{\text{DS}} [\text{m}] + h_{\text{IINV}} [\text{m}] - h_{\text{LDGM}} [\text{m}]$$

$$\rho_{\text{DS}_{\text{korr}}} [\Omega\text{m}] = \rho_{\text{DS}} [\Omega\text{m}] * d_{\text{DS}_{\text{korr}}} [\text{m}] / d_{\text{DS}} [\text{m}].$$

### 5.3. Datenverarbeitung in der Elektromagnetik

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 (**Abschnitt 5.3.1**). Diese Werte unterliegen jedoch einer im Wesentlichen temperaturbedingten Drift, die korrigiert werden muss, bevor eine Weiterverarbeitung der HEM-Daten stattfinden kann (**Abschnitt 5.3.2**). Zur Synchronisation mit den GPS-Daten ist eine Verschiebung der EM-Kanäle um -0,8 s notwendig.

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 (**Abschnitte 5.3.3** und **5.3.5**).

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 (**Abschnitt 5.3.4**). Ferner ermöglichen diese so genannten Halbraumparameter einen schnellen Überblick über die lateralen Leitfähigkeitsverteilungen und die zu erwartenden Erkundungstiefen und vorhandene Niveauprobleme aufdecken (**Abschnitt 5.3.6**) und zur Schließung von Datenlücken genutzt werden (**Abschnitt 5.3.7**). Für eine genauere Bestimmung der vertikalen Leitfähigkeitsverteilungen sind Inversionen notwendig, die auf Mehrschichtmodellen basieren (**Abschnitt 5.3.8**).

#### 5.3.1. Kalibrierung des HEM-Systems

Das HEM-System wurde von dem Hersteller Fugro Airborne Surveys mit Hilfe von externen Spulen auf schlecht leitendem Untergrund in Kanada (Mountsbury Conservation Area südwestlich von Toronto) kalibriert. Nach der Optimierung der Phaseneinstellungen mit Hilfe eines Ferrit-Stabes lassen sich mit diesen externen Kalibrierspulen Eichsignale bekannter Größe in den Empfängern erzeugen. Diese Kalibrierwerte werden benutzt, um die Eichausschläge, die durch die internen Kalibrierspulen erzeugt werden, in ppm anzugeben. Da Wechselwirkungen mit dem Untergrund nicht auszuschließen sind, wurden die Kalibrierfaktoren mit einem Flug über die Nordsee vor Helgoland im Juni 2007 überprüft (**Tab. 12**). Dort gibt es eine etwa 50 m tiefe Rinne, die eine ausreichend große Wassertiefe garantiert. Unter der Annahme homogener Leitfähigkeit des Meerwassers wurden die Halbraumwiderstände des Meerwassers und die Abstände der Wasseroberfläche zum Messsystem aus den HEM-Daten zu jeder Messfrequenz bestimmt und mit den Sollwerten, dem spezifischen Widerstand von Meerwasser  $\rho_w = 0,21 \text{ } \Omega\text{m}$  (bei einer Wassertemperatur von etwa 15°C) und der Laserhöhe, verglichen.

**Tab. 12:** Kalibrierwerte für das HEM-System

Frequenz in Hz	Kalibrierwerte Fugro		Kalibrierwerte BGR	
	I [ppm]	Q [ppm]	I [ppm]	Q [ppm]
386	-205,3	-205,3	-215,9	-209,3
1.822	-175,4	-174,7	-174,8	-174,5
5.489	76,6	76,8	88,1	94,8
8.339	-144,4	-144,2	-193,0	-186,5
41.485	-667,3	-665,2	-660,1	-667,1
133.350	-1404,2	-1406,4	-1181,7	-1360,7

Zu Beginn eines Messfluges werden in großer Flughöhe die Eichausschläge der internen Kalibrier-  
spulen überprüft und automatisch nachjustiert. Temperaturänderungen während des Fluges haben  
Einfluss auf die Messelektronik. Daher werden die internen Kalibrierspulen mehrmals während ei-  
nes Messfluges eingeschaltet, um Phasenlagen und Verstärkungen der Eichausschläge für alle Fre-  
quenzen zu kontrollieren. Diese in großer Flughöhe mehrmals aufgezeichneten Eichsignale werden  
automatisch bei der Datenverarbeitung in den Messdaten erkannt. Aus dem Vergleich der Amplitu-  
den und Phasen der Messdaten mit den bekannten Werten der Eichsignale erhält man für jede Mess-  
frequenz kleine Korrekturen, die – über den gesamten Flug stark geglättet – an die Rohdaten ange-  
bracht werden.

### 5.3.2. Nullniveaubestimmung

Die Sekundärfelddaten können noch Primärfeldanteile enthalten, die nicht vollständig durch die  
verwendeten Kompensationsspulen erfasst worden sind. Ferner kann sich dieser Anteil durch tem-  
peraturbedingte Drift während des Fluges ändern. Daher ist es notwendig, dieses so genannte Null-  
niveau mehrmals während eines Fluges zu erfassen. Dies geschieht in der Regel in Flughöhen >360  
m, da in diesen Höhen das Sekundärfeld weitgehend abgeklungen ist. In den Bereichen mit großer  
Flughöhe und möglichst ruhigem Messsignalverlauf werden sogenannte Stützstellen gesetzt, an de-  
nen Messwerte erfasst werden, die das Nullniveau repräsentieren. Die Interpolationsgeraden zwi-  
schen jeweils benachbarten Stützstellen liefern die Bezugsniveaus, von denen aus die Messamplitu-  
den der Sekundärfelder zu bestimmen sind. Die Nullniveaubestimmung wird für jeden Messkanal  
(I und Q für sechs Frequenzen) durchgeführt.

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

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

### 5.3.3. Datenkorrektur

Störungen, die durch externe EM-Signale hervorgerufen werden (z. B. Funkverkehr, Hochspannungsleitungen, Sferics, Ortschaften, Straßen, Bahnlinien), werden durch geeignete Filterung bzw. Elimination unterdrückt. Unterschreitet ein Amplitudenwert den relativen Standardfehler (rel. STF = STF/Mittel) der Messamplituden (I und Q) in einem Intervall um diesen Messwert (**Tab. 13**), so wird dieser Wert eliminiert und später auf Basis der in der Fläche interpolierten Halbraumparameter neu berechnet (vgl. **Abschnitt 5.3.7**). Zur Unterdrückung von Ausreißern werden nicht-lineare (NL) Filter benutzt und zur Vermeidung von hochfrequentem Rauschen werden die HEM-Daten anschließend mit symmetrischen Tiefpass-Filtern mit Abschneideperioden  $T_{TP}$  geglättet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität sind unterschiedliche Filterparameter für die Daten der jeweiligen Frequenzen erforderlich (**Tab. 13**).

**Tab. 13:** Filterparameter für die HEM-Datenverarbeitung

Frequenz [Hz]	Mittel / STF [Werte]	Schwellwert für rel. STF	NL-Filter Werte/Toleranz	Tiefpass-Filter $T_{TP}$ [Werte]
386	75 / 25	0,01	20 / 3,0	40
1.822	60 / 25	0,01	20 / 2,0	30
5.489	50 / 20	0,01	10 / 2,0	40
8.339	40 / 20	0,01	15 / 2,0	30
41.485	30 / 15	0,01	5 / 2,0	30
133.350	25 / 15	0,01	10 / 2,0	50

Störeinflüsse, die auf dem Induktionseffekt aufgrund von Bebauung und anderen elektrischen Installationen beruhen, können bei Bedarf vor dem Microlevelling manuell aus den Daten entfernt werden (vgl. **Abschnitt 5.3.5**).

### 5.3.4. Transformation der Sekundärfeldwerte in Halbraumparameter

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

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

transformiert (Siemon, 2001).

Hierzu wurden reduzierten Amplituden  $A'$  und Komponentenverhältnissen  $\varepsilon$

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

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

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

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

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

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

$$d_a = D_a - h$$

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

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

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

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

Abweichend von diesem bei Siemon (2001) beschriebenen Verfahren wurde hier eine genauere Ausbreitung der elektromagnetischen Felder berücksichtigt und für jede Messfrequenz eigene Polynomkoeffizienten für die Funktionen  $A'(\delta)$  und  $\delta(\varepsilon)$  bestimmt. Es ergaben sich im Allgemeinen nur geringfügige Änderungen, vor allem bei den beiden höchsten Frequenzen. Über sehr gut leitenden Untergrund (Salzwasser) sind die Abweichungen insbesondere für die  $Q$ -Komponente der sekundären Magnetfelder jedoch erheblich, sodass die Neuberechnung der Polynomkoeffizienten notwendig war.

Die aus den nicht-nivellierten HEM-Daten abgeleiteten Halbraumparameter wurden auf Plausibilität überprüft, bevor sie für die statistische Niveaupassung (vgl. **Abschnitt 5.3.6**) verwendet worden sind. Dabei sind alle Datenpunkte entfernt worden, an denen die Sensorhöhe größer als 150 m war oder die scheinbaren spezifischen Widerstände bzw. die scheinbaren Tiefen zu extrem waren ( $0,15 \Omega\text{m} \geq \rho_a \leq 5000 \Omega\text{m}$  bzw.  $-50 \text{ m} \geq d_a \leq 100 \text{ m}$ ).

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

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

Der anthropogene Einfluss wirkt sich durch eine Verringerung des Halbraumwiderstandes und der Schwerpunktstiefe aus. In den Karten ist daher oft eine Korrelation von niedrigen Halbraumwiderständen bzw. geringeren Schwerpunktstiefen mit Ortschaften oder Straßen zu beobachten, die vor allem in den Karten der niedrigen Frequenzen auftreten.

Die Erkennung von anthropogen beeinflussten HEM-Daten ist durch deren typische Form oder durch Korrelation mit den Magnetikdaten möglich. Die Identifizierung kann durch einen Vergleich mit topografischen Karten, Luftbildern, einer Videofilmauswertung oder einer Ortsbegehung erfolgen. Eine umfassende manuelle Nachkorrektur der HEM-Daten, die sehr zeitaufwändig ist, erfolgte hier nicht. Es wurden lediglich einzelne extreme Störungen entfernt sowie die in **Abschnitt 5.3.3** beschriebene automatische Korrektur durchgeführt, die allerdings aufgrund des niedrigen Schwellwertes von 1% (**Tab. 13**) viele anthropogene Einflüsse in den HEM-Daten erfassen konnte.

### 5.3.6. Statistische Niveaueinpassung

Im Messgebiet Staßfurt war die herkömmliche Niveaueinpassung (nach **Abschnitt 5.3.2**) nicht ausreichend, da aufgrund der Überfliegung von Ortschaften, Hochspannungsleitungen, Autobahnen, Windparks und Wäldern barometrische Höhenänderungen und folglich auch spürbare Temperaturschwankungen auf das Messsystem und somit auf das Nullniveau einwirkten. Die Nivellierung der logarithmierten Halbraumwiderstände und der Differenzen der scheinbaren Tiefen wurde parallel zu den Fluglinien (Microlevelling) mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft vorgenommen. Aus den stark geglätteten Differenzen der aus diesen nivellierten Halbraumparametern berechneten HEM-Daten

(I und Q) und den originären HEM-Daten wurden anschließend die variablen Korrekturwerte für jedes Mess- und Kontrollprofilprofil abgeleitet (Siemon, 2009).

### 5.3.7. Dateninterpolation und -glättung

Die Lücken in den HEM-Daten, die durch die Eliminierung von Daten, deren relativen Rauschniveaus oberhalb eines Schwellwertes (0,01) lagen, bzw. durch die Berücksichtigung der anthropogenen

Effekte entstanden sind, wurden durch flächenhafte Interpolation der Halbraumparameter mit nachfolgender Neuberechnung der relativen Sekundärfelder geschlossen. Die relativen Rauschniveaus wurden jeweils aus 100 benachbarten Werten bestimmt und auf die (Modell-)Amplituden normiert. Abschließend wurden die korrigierten Daten analog zu **Abschnitt 5.3.3** gefiltert, aber mit leicht modifizierten Filterparametern (NL-Filter: 10 Werte mit Toleranz 3,0; TP-Filter mit 20 Werten). Somit liegen die finalen Daten, die in die Inversion (vgl. **Abschnitt 5.3.8**) eingehen, als korrigierte (nivellierte, interpolierte und geglättete) Messwerte an jedem Messpunkt und für jede Messfrequenz vor.

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

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

Die prozessierten HEM-Daten zu allen Messfrequenzen werden in die Parameter eines geschichteten Halbraums, spezifischer Widerstand und Mächtigkeit, invertiert. Da der hier verwendete Inversionsalgorithmus (Sengpiel & Siemon, 2000) auf dem Marquardt-Verfahren beruht, ist ein Startmodell notwendig. Dieses Startmodell wird automatisch aus den  $\rho_a(z^*)$ -Sondierungskurven für jeden Messpunkt neu berechnet. Standardmäßig wird das Startmodell aus ebenso vielen Schichten aufgebaut wie Messfrequenzen vorhanden sind, wobei die Schichtwiderstände auf die scheinbaren spezifischen Widerstände und die Schichtgrenzen auf das logarithmische Mittel zweier benachbarter Schwerpunkstiefen gesetzt werden. Alternativ kann das Startmodell auch eine frequenzunabhängige Anzahl von Schichten besitzen. Hierzu wird die interpolierte Sondierungskurve in mit der Tiefe zunehmenden Schichtmächtigkeiten unterteilt und die zugehörigen spezifischen Widerstände in der jeweiligen Schichtmitte aus der Sondierungskurve abgegriffen (Siemon, 2006). Wahlweise kann bei beiden Verfahren eine schlecht leitende Deckschicht hinzugefügt werden, deren Mächtigkeit sich aus der scheinbaren Tiefe  $d_a$  der höchsten Messfrequenz und ggf. zusätzlich einer vorzugebenden Luftschichtmächtigkeit (z. B. 5 m) ergibt, mindestens aber 1 m beträgt. Im Inversionsprozess wird das Startmodell solange iterativ verbessert, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt ist. Dies ist erreicht, wenn die differenzielle Verbesserung der Anpassung der Modelldaten an die Messdaten weniger als z. B. 5% beträgt.

Für die Inversion der HEM-Daten im Messgebiet Staßfurt wurden nivellierte Daten (vgl. **Abschnitt 5.3.7**) und ein Startmodell mit vier mit der Tiefe mächtiger werden Schichten zuzüglich einer schlecht leitenden Deckschicht verwendet. Die Deckschicht (Luft) ermöglicht es, nicht ausreichend gut bestimmte Abstandsmessungen auszugleichen. Da die Daten der dritten Messfrequenz (5.489 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 Systeme verwenden, die empfindlich für die lateralen Leitfähigkeitsstrukturen sind, wurden diese Daten für die Inversion nicht benutzt.

### **5.3.9. Präsentation der HEM-Ergebnisse**

Die HEM-Ergebnisse werden als Karten und Vertikalschnitte präsentiert. Karten (vgl. **Kapitel 6**) im Maßstab von 1:50.000 wurden für die Halbraumparameter scheinbarer spezifischer Widerstand  $\rho_a$

(in  $\Omega\text{m}$ ) und Schwerpunktstiefe  $z^*$  (in m unter GOK) für sechs Messfrequenzen und die spezifischen Widerstände  $\rho$  (in  $\Omega\text{m}$ ) in zehn Tiefen (1–60 m unter GOK), abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen, produziert.

In den Tiefenschnitten unterhalb von 30 m unter GOK treten in Bereichen hoher Leitfähigkeit Lücken in den Widerstandskarten auf, da dort aufgrund der geringen Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder keine verlässlichen Informationen über die Höhe des spezifischen Widerstandes abgeleitet werden konnten. Daher sind Widerstandskarten für Tiefenschnitte unterhalb von 60 m unter GOK, bei denen die Lücken zu groß für eine vertretbare Interpolation geworden sind, nicht produziert worden.

Die für die Produktion der Karten der Halbraumparameter verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte (Fluglinie) dargestellt. Die weißen Punkte markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind. Auf den Karten des spezifischen Widerstandes in verschiedenen Tiefen geben die weißen Punkte einen Hinweis auf die Anzahl der interpolierten Datensätze. Existiert kein weißer Punkt auf der schwarzen Fluglinie, dann sind die Daten aller Messfrequenzen nicht interpoliert worden, und je größer der Punkt, desto mehr interpolierte Daten sind bei der Inversion verwendet worden. Die grauen Punkte kennzeichnen Datenpunkte, für die meist aufgrund zu geringer Eindringtiefe keine plausiblen spezifischen Widerstände berechnet werden konnten und somit bei der Kartenproduktion interpoliert wurden.

Vertikalsektionen des spezifischen Widerstandes mit einem Horizontalmaßstab von 1:50.000 und einem Vertikalmaßstab von 1:5.000 wurden für jedes der resultierenden 197 Messprofile und der 39 Querprofile hergestellt. Diese Vertikalsektionen sind aufgebaut aus den einzelnen 1D-Inversionsmodellen mit vier Schichten des spezifischen Widerstandes, die als Farbsäulen entsprechend ihrer topografischen Höhe längs eines Profils nebeneinandergestellt werden. Die Mächtigkeit der untersten Schicht (Substratum) wird in Abhängigkeit vom spezifischen Widerstand dieser Schicht berechnet, beträgt aber mindestens 10 m. Bei geringen Widerstandskontrasten verschwindet die Bedeutung der Schichtgrenzen, sodass Schichtmächtigkeiten auch zu groß oder verschwindend klein werden können. Dies kann dazu führen, dass die Länge der dargestellten Widerstandssäulen in relativ homogenen Bereichen stark variieren können. Über den Modellen sind zusätzlich die Höhe der Flugsonde, der Anpassungsfehler der Inversion und die Messdaten dargestellt, die in einer Legende erklärt werden.

## 5.4. Datenverarbeitung in der Magnetik

### 5.4.1. Magnetisches Totalfeld

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

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

mit

$F(r)$  = magnetisches Hauptfeld (IGRF = International Geomagnetic Reference Field)

$\Delta T(r)$  = anomaler, lokaler Anteil des erdmagnetischen Feldes im Messgebiet

$\Delta V(t)$  = Tagesvariation des erdmagnetischen Feldes während der Messung

$\delta_T(r,t)$  = sonstige Anteile (u. a. magnetisches Eigenfeld des Hubschraubers).

Gesucht werden die Anomalien des magnetischen Totalfeldes  $\Delta T(r)$ . Während das IGRF  $F(r)$ , das anhand von Tabellenwerten berechnet werden kann, und die Tagesvariationen  $\Delta V(t)$ , die in der Bodenstation registriert werden, von der gemessenen Totalintensität subtrahiert werden können, sind die sonstigen Anteile  $\delta_T(r,t)$  nicht isoliert zu erfassen. Sie sind den Anomalien  $\Delta T(r)$  überlagert, d. h. in den abgeleiteten  $\Delta T$ -Werten sind sowohl die gesuchten geogenen als auch die störenden anthropogenen Anteile enthalten, deren Quellen (z. B. Gebäude) sich meist an der Erdoberfläche befinden.

### 5.4.2. Berechnung des IGRF

Für die Bestimmung der Anomalien der Totalintensität des erdmagnetischen Feldes ( $\Delta T$ ) wird das alle fünf Jahre von der IAGA (1992) in Kugelfunktionsdarstellung zur Verfügung gestellte „International Geomagnetic Reference Field“ (IGRF) verwendet, mit dem für jeden Punkt auf und oberhalb der Erdoberfläche und für einen bestimmten Zeitpunkt ein Feldwert berechnet werden kann. Das aktuell gültige Modell IGRF-10 aus dem Jahre 2005 (IAGA, 2005) diente zur Berechnung des magnetischen Hauptfeldes an jedem Messpunkt zur entsprechenden Messzeit.

### 5.4.3. Berücksichtigung der Tagesvariationen

Die Referenzstation zur Erfassung der magnetischen Tagesvariationen  $\Delta V(t)$  befand sich auf dem Flugplatz Magdeburg-Cochstedt.  $\Delta V(t)$  ergibt sich aus dem Messwert der Basisstation abzüglich dem IGRF-Feld am Ort der Basisstation zum Zeitpunkt der Messung. Kurzzeitige Störeinflüsse in den Daten der Basisstation werden durch Anwendung eines Tiefpassfilters beseitigt. Weiterhin werden geringfügige Niveauunterschiede in den Aufzeichnungen verschiedener Messtage (durch leicht unterschiedliche Positionierung des Sensors) ermittelt und korrigiert.

### 5.4.4. Statistische Niveaueinpassung

Zur Synchronisation der gemessenen Magnetikdaten mit den Positionsdaten wird eine Verschiebung der Daten um -1,4 Sekunden angebracht. Niveauunterschiede zwischen einzelnen Flügen bzw. Fluglinien werden durch eine Niveaueinpassung mittels Kreuzungspunktstatistik korrigiert (Tieline-

Levelling). Verbleibende Niveauunterschiede konnten durch ein Microlevelling mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft ausgeglichen werden. Zur Vermeidung von Verschmierungseffekten bei der Filterung werden lokale magnetische Anomalien aus dem Datensatz mittels adaptiver Filterung zunächst entfernt und nach dem erfolgtem Microlevelling für die Messprofile, angepasst auf das neue Umgebungsniveau, wieder eingesetzt. Die Niveaueinpassung auf den Kontrollprofilen erfolgt auf Basis der korrigierten Messprofile, indem die geglättete Differenz der Messdaten und der auf die Kontrollprofile projizierten Gitterdaten der korrigierten Messprofile als Niveaufehler deklariert und von den Messdaten abgezogen werden.

#### **5.4.5. Präsentation der Magnetik-Ergebnisse**

Die Ergebnisse Magnetik werden als Karte der Anomalien des magnetischen Feldes präsentiert (vgl. **Kapitel 6**), in der auch die kurzwelligen Anomalien anthropogenen Ursprungs enthalten sind. Die für die Produktion der Karte verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Punkte (Fluglinie) dargestellt. Die weißen Punkte markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind.

## 5.5. Datenverarbeitung in der Radiometrie

Entsprechend den Empfehlungen der IAEA (1991) sind die mit dem Gammastrahlenspektrometer im Hubschrauber gemessenen Zählraten der Radioelemente K, U und Th in ihre Konzentrationen im oberen Erdreich umzurechnen. Die Radioisotope U und Th selbst emittieren keine Gammastrahlen. Um eine Abschätzung der Konzentrationen für U und Th zu erhalten, wird mit dem Gammastrahlenspektrometer die abgegebene Gammastrahlung ihrer radioaktiven Tochterprodukte Bi-214 (Uran) und Tl-208 (Thorium) gemessen. Da diese Abschätzung unter der Annahme vorgenommen wird, dass zwischen den Elementen U bzw. Th und ihren Tochterprodukten ein Gleichgewicht vorhanden ist, werden die berechneten Konzentrationen als Äquivalentgehalte von Uran (eU) und Thorium (eTh) bezeichnet.

Die natürliche Gammastrahlung der Gesteine und Böden beruht im Wesentlichen auf den oben genannten drei Quellen. Die Roh-Zählraten enthalten darüber hinaus noch Anteile mit nicht-geogener Ursache, wie etwa der kosmischen Höhenstrahlung und der Eigenstrahlung des Hubschraubers. Störend wirkt gelegentlich der sehr variable Anteil von Radon in der Luft, dessen Strahlung in den Uran-Kanal fällt. Diese Störeinflüsse sind nach Möglichkeit zu eliminieren.

Die o. g. Ziele erforderten folgende Vorarbeiten und Korrekturen:

- Verminderung des Rauschens in den aufgenommenen Zählraten;
- Registrierzeitkorrektur;
- Bestimmung der Hintergrundzählraten durch Flüge über ausgedehnten Wasserflächen;
- Ermittlung der Absorptionskonstanten mittels Steigflügen;
- Korrektur des Compton-Effektes beim Durchgang der Strahlung durch den Boden, die Luft und den Sensor;
- Korrektur der in unterschiedlicher Höhe gemessenen Zählraten auf eine Standardflughöhe von 80 m;
- Umrechnung der Zählrate von der Standardflughöhe 80 m auf die Zählrate am Boden;
- Berechnung von Konzentrationen am Boden aus den berechneten Zählraten.

### 5.5.1. Verminderung des Rauschens

Auf Grund des relativ großen Abstandes zwischen den Quellen der radioaktiven Strahlung an der Erdoberfläche und dem Strahlungsdetektor im Hubschrauber sind die Zählraten in der Aerogammaspektrometrie allgemein gering. Dies führt dazu, dass die aufgenommenen Gammaskpektren, und damit auch die daraus ermittelten Radionuklidgehalte entlang der Profillinien, 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 von Spektren mit vermindertem Rauschen über Hauptkomponentenanalyse. Als Ergebnis erhält man geglättete Spektren, aus denen die Zählraten der drei interessierenden Energiefenster (vgl. **Tab. 6**) neu bestimmt werden. Weiterhin kommt ein von Mathis (1987) vorgestellter adaptiver Filter zur Glättung der Zählraten-Kanäle zur Anwendung.

### 5.5.2. Registrierzeitkorrektur

Ein Spektrometer benötigt eine bestimmte Zeit, um einen Impuls vom Detektor zu verarbeiten. Während dessen werden eingehende Impulse zurückgewiesen. Die als „Live-time“ bezeichnete Zeit, in der das Spektrometer für eingehende Impulse empfangsbereit ist, wird durch das System mitregistriert und dient zur Korrektur der aufgenommenen Zählraten. Die Korrektur ist gewöhnlich klein, kann aber bedeutend in Gebieten mit hoher Radioaktivität sein. Die Registrierzeitkorrektur wird durchgeführt, indem die gemessenen Zählraten auf den Messzyklus von 1 Sekunde hochgerechnet werden (IAEA, 2003):

$$N = n \cdot 10^3 / t_L$$

mit:

- N = korrigierte Zählrate,
- n = registrierte Roh-Zählrate,
- t<sub>L</sub> = Live-Time (in ms)

### 5.5.3. Hintergrundstrahlung

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

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

mit:

- N<sub>c</sub> = kosmische und Messsystem-Hintergrundstrahlung für jeden Messkanal,
- a = Hintergrundstrahlung des Hubschraubers inkl. des Messsystems für jeden Messkanal,
- b = kosmische Einstreuung für jeden Messkanal,
- C<sub>H</sub> = Zählrate im Höhenstrahlungskanal.

Zur Bestimmung der Werte a und b wurde im Jahre 2008 Messflüge in verschiedenen Höhen über der Nordsee durchgeführt (**Tab. 14**). Mit den Messdaten wurden die Korrekturgrößen für die Kanäle K, U, Th und TC (Gesamtstrahlung) mittels linearer Regression der Zählraten dieser Kanäle gegen die Zählraten der kosmischen Strahlung bestimmt.

**Tab. 14:** Korrekturfaktoren Hintergrundstrahlung

Kanal	Messsystem a [cps]	Höhenstrahlung b
TC	29,56	0,719
K	5,23	0,040
U	0,44	0,033
Th	0,31	0,041

#### 5.5.4. Anpassung der Messhöhe an Standardtemperatur und -druck

Für die Anwendung der Datenanalysetechniken der Radiometrie ist es notwendig, die gemessenen Daten an Standardbedingungen anzupassen. Dies schließt die Anpassung der gemessenen Höhe des Hubschraubers, und damit des Detektors, über Grund an Standardtemperatur und -druck (STD) ein. Die Höhenkorrektur wird nach der Empfehlungen der IAEA (2003) durchgeführt:

$$h_e = h_r \frac{T_0 P}{(T + T_0) P_0}$$

mit :

- $h_e$  = effektive Höhe über Grund (in m) unter STD-Bedingungen,
- $h_r$  = Höhe des Hubschraubers über Grund (in m),
- $T_0$  = 273,15 K, Gefrierpunkt des Wassers auf Kelvin-Skala,
- $T$  = gemessene Lufttemperatur (in °C),
- $P_0$  = 101,325 kPa; mittlerer Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe,
- $P$  = im Hubschrauber gemessener barometrischer Druck (in kPa).

#### 5.5.5. Compton-Korrektur

Die Streuung von Gammaquanten beim Durchgang von Materie wird als Compton-Effekt bezeichnet. Praktisch hat dies zur Folge, dass ein bestimmter Anteil z. B. von der Thorium-Strahlung in die niedrigeren Energiebereiche des Uran- und Kalium-Fensters einstreut. Ebenso streuen Uran-Anteile in den Kalium-Kanal. Der umgekehrte Effekt, d. h. die Einstreuung in höhere Energiekanäle existiert auch, ist aber deutlich geringer. Die Koeffizienten der Einstreuratzen (stripping ratios) wurden im Jahre 2008 über Kalibrierkörper der BGR bestimmt und entsprechend den Empfehlungen der IAEA (2003) angebracht. Die Werte sind in **Tab. 15** aufgelistet.

**Tab. 15:** Koeffizienten der Einstreuratzen

	<b>Einstreurate</b>	<b>Wert</b>
Th->U	$\alpha$	0,2485
Th->K	$\beta$	0,3852
U->K	$\gamma$	0,6599
U->Th	a	0,0395

Die Werte von  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  steigen mit der Höhe des Hubschraubers über Grund an und müssen daher unter STD-Bedingungen korrigiert werden:

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

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

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

wobei  $h_e$  die äquivalente Höhe über Grund (in m) unter STD-Bedingungen ist. Um die Netto-Zählraten der jeweiligen Kanäle zu erhalten, muss von den gemessenen Werten der eingestreute Anteil abgezogen werden:

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

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

$$N_{K(corr)} = N_K - \beta N_{Th(corr)} - \gamma N_{U(corr)}$$

Dabei repräsentieren  $N_{Th}$ ,  $N_K$  und  $N_U$  die bezüglich der Hintergrundstrahlung unter STD-Bedingungen korrigierten Netto-Zählraten,  $N_{Th(corr)}$ ,  $N_{U(corr)}$  und  $N_{K(corr)}$  die bezüglich der Einstreuratzen korrigierten Zählraten und  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  und a die Einstreuratzen unter STD-Bedingungen. Für die Gesamtstrahlung wird keine Compton-Korrektur durchgeführt.

### 5.5.6. Zählraten in Standardflughöhe

Die Intensität der vom Boden stammenden Gammastrahlung nimmt durch Absorption in der Luft mit der Höhe über Grund ab. Die energieabhängige Absorptionskonstante  $\mu$  der Luft wird bestimmt wie in IAEA (1991) beschrieben. Die Absorption hängt hauptsächlich von der Dichte und Feuchtigkeit der Luft ab. Im Uran-Kanal ist sie zusätzlich von veränderlichen Radon-Konzentrationen in Luft beeinflusst.

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

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

mit

- $N_s$  = Zählraten bezogen auf die Standardhöhe  $h_0$ ,
- $N_m$  = Zählraten nach Abzug der Hintergrundstrahlung und der Einstreuratzen bei der effektiven Höhe  $h_e$ ,
- $\mu$  = Absorptionskoeffizient für das jeweilige spektrale Fenster.

Die Absorptionskonstanten  $\mu$  (**Tab. 16**) wurden über einer Teststrecke in Allensteig, Österreich, mit Hilfe von Testflügen in unterschiedlichen Höhen bestimmt (Röttger, 2003).

**Tab. 16:** Absorptionskonstanten

Spektralfenster	Absorptionskonstanten $\mu$ (in 1/m bei STD)
TC	-0,007594
K	-0,008900
U	-0,009022
Th	-0,006925

### 5.5.7. Berechnung von Radioelement-Konzentrationen und Strahlungsrate

IAEA (2003) empfiehlt die Umrechnung der Zählraten der drei Gammastrahler in Äquivalent-Konzentrationen am Boden sowie die Angabe der Strahlungsrate (Exposure Rate) am Boden. Dies hat den Vorteil, dass die Ergebnisse von Messungen verschiedener Instrumente (z. B. mit unterschiedlichem Kristallvolumen) untereinander vergleichbar sind. Als Ergebnis erhält man die Äquivalentgehalte der drei Radioelemente K (in %), eU (in ppm) und eTh (in ppm) in den oberflächennahen Bodenschichten sowie die Strahlungsrate am Boden in  $\mu\text{R/h}$ . Die erforderlichen Eichfaktoren (Sensitivitäten S) wurden mit Hilfe von Testmessungen über einer Eichstrecke in Allensteig, Österreich ermittelt (**Tab. 17**):

**Tab. 17:** Sensitivitäten

Sensitivität
1 % K = 32,45 cps
1 ppm eTh = 2,31 cps
1 ppm eU = 3,58 cps

Die Umwandlung der Zählraten in Konzentrationen am Boden erfolgt nach folgender Beziehung:

$$C = N_s/S$$

mit

- C = Konzentrationen der Elemente (K in %, eU in ppm, eTh in ppm)
- $N_s$  = korrigierte Zählrate im jeweiligen Energiefenster
- S = Sensitivität der Strahlungsquelle im Energiefenster (vgl. **Tab. 6**)

Die so ermittelten Äquivalentgehalte beziehen sich auf eine unendlich ausgedehnte, gleichmäßig strahlende Ebene. Sie können sich von den wahren Konzentrationen der Elemente im Boden unterscheiden, insbesondere wenn die strahlenden Flächen unregelmäßig verteilt sind. Weiterhin ergeben sich über ausgedehnten Waldflächen allgemein zu kleine Konzentrationen als Folge der Strahlungsabsorption in der Biomasse. Ohne genauere Kenntnis über die Dichte der Biomasse kann keine diesbezügliche Korrektur der Konzentrationen erfolgen.

Die Strahlungsrate am Erdboden wird berechnet als Funktion der K-, U-, and Th- Konzentrationen:

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

E = Strahlungsrate am Erdboden [ $\mu$ R/h]

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

### 5.5.8. Statistische Niveauanpassung

Zur Korrektur von Niveauunterschieden zwischen einzelnen Flügen bzw. Fluglinien wurde eine Niveauanpassung mittels Kreuzungspunktstatistik durchgeführt (Tieline-Levelling). Verbleibende Niveauunterschiede konnten durch ein Microlevelling mit dem Programm Oasis montaj von Geosoft ausgeglichen werden. Die Niveauanpassung auf den Kontrollprofilen erfolgte auf Basis der korrigierten Messprofile, indem die geglättete Differenz der Messdaten und der auf die Kontrollprofile projizierten Gitterdaten der korrigierten Messprofile als Niveaufehler deklariert und von den Messdaten abgezogen wurden.

### 5.5.9. Präsentation der Radiometrie-Ergebnisse

Die radiometrischen Ergebnisse werden in Form von Karten der Äquivalentkonzentrationen der Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie der Gesamtstrahlung und der Strahlungsrate am Erdboden (vgl. **Kapitel 6**) dargestellt. Die für die Produktion der Karte verwendeten Datenpunkte sind als schwarze Fluglinie dargestellt. Die weißen Punkte auf den Fluglinien markieren Bereiche, in denen die Daten interpoliert worden sind.

## 6. Kartografische Arbeiten

### 6.1. Topographische Karte 1:50.000

Als Hintergrund zur Darstellung der aerogeophysikalischen Messergebnisse wurde eine Topographische Karte mit einem Sonderblattschnitt auf Grundlage von Rasterdaten der DTK 50-V (Topographische Karte 1:50.000) hergestellt. Zur Abdeckung des Messgebietes ergab sich ein Blatt mit der Ausdehnung von 32 km × 30 km. **Tab. 14** enthält die Eckpunktkoordinaten des Blattes.

**Tab. 14:** Eckpunktkoordinaten des Blattschnittes Staßfurt

Karteneckpunkt	Gauß-Krüger-Koordinaten	
	Rechtswert	Hochwert
SW	4451 000	5735 000
NW	4451 000	5765 000
NE	4483 000	5765 000
SE	4483 000	5735 000

Die Ergebniskarte 1:50.000 basiert auf Rasterdaten der TK 50, Blätter L 3932 Oschersleben, L 3934 Magdeburg, L 3936 Schönebeck, L 4132 Halberstadt, L 4134 Staßfurt, L 4136 Calbe, L 4332 Quedlinburg, L 4334 Aschersleben, L 4336 Bernburg. Herausgeber ist das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a. M.. Abgedeckt wird der Bereich, der zentral im Kartenbild zwischen Schönebeck und Bernburg im Osten, Aschersleben im Süden und Hadmersleben im Nordosten liegt.

Digital wurde dazu ein Kartenrahmen mit Gauß-Krüger-Eckpunktkoordinaten im 3°-Meridian-Streifensystem mit 12° als Mittelmeridian (Zone 4), basierend auf dem Bessel-Ellipsoid, und ergänzenden geografischen Koordinaten erstellt. Der Grauton der topografischen Darstellung wird durch eine fünfzigprozentige Aufrasterung der digitalen Topografie erreicht.

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

Für jeden Ergebnisparameter werden farbige Isolinienkarten im Maßstab 1:50.000 hergestellt. Als Kartengrundlage dienen die oben angeführten Blätter der Topographischen Karte TK 50. Des Weiteren sind die Fluglinien ebenfalls auf den Karten enthalten.

Für die Herstellung der geophysikalisch-thematischen Karten und der ihnen zugrunde liegenden Gitter wird das Software-Paket Oasis montaj 7.0 von Geosoft verwendet. **Tab. 15** zeigt die Gitterparameter, die für das Messgebiet Staßfurt verwendet wurden. Die Zusammenstellung von Geophysik, Topografie und Legendeninformationen erfolgt mit dem Programm ArcGIS 9.3.1 von ESRI. Zum Import und zur Darstellung der Geosoft-Raster-Dateien als Rasterlayer in ArcMap wird ein Zusatzmodul von Geosoft für ArcGIS als Erweiterung benötigt (<http://www.geosoft.com/resources/releasesnotes/plugins/arcGISplugin.asp>, auch beiliegend auf DVD). Die Erstellung von PDF-Dokumenten wird mit Adobe Acrobat 9.3 vorgenommen.

**Tab. 15:** Gitterparameter

Parameter	Wert
Methode zur Flächeninterpolation	minimale Krümmung
Gitterzellengröße [m]	25
Startsuchradius [m]	100
Maximaler Darstellungsbereich [m]	400
Interne Spannung [0 – 1]	0,5
Zellen außerhalb der Datenpunkte	10
Log-Option	linear, (außer: log $\rho$ )

### 6.3. Ergebniskarten

Für das Messgebiet Staßfurt wurden 28 geophysikalische Ergebniskarten sowie ein digitales Höhenmodell jeweils mit unterlegter Topografie im Maßstab 1:50.000 hergestellt (siehe Kartenverzeichnis und **Anhang III**). 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 eine Fluglinienkarte produziert, die die Lage der Messprofile auf der Grundlage der Topographischen Karte im jeweiligen Maßstab zeigt. Die Profile sind an ihrem Anfang in Flugrichtung mit Liniennummern versehen. Die Positionen der Zeitmarken (10 s, d. h. 100 Werte) sind mit einem „x“ gekennzeichnet. Jede zehnte 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 2.1 – Geophysikalische Erkundung – Ressourcen und Oberflächenprozesse archiviert. Darüber hinaus sind Ergebnisdaten als ASCII-codierte Profildaten im Geosoft XYZ-Format und die Endergebnisse (Bericht, Karten und Vertikalsektionen) als PDF-Dokumente im Originalmaßstab auf einer DVD (**Tab. 16**) als **Anlage** zu diesem Bericht abgelegt. Die ArcGIS-Projekte beinhalten die Kartendarstellung als MXD-Daten für ArcGIS 9.3.1 inklusive der Legendeteile (Import als BMP) und der Rasterdaten DTK 50 (Datenformat GRID, Typ Integer, mit Color File, Auflösung 200 Pixel/cm [508 dpi]).

**Tab. 16:** Inhalt der DVD

Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Bericht		Technischer Bericht
\Adobe Reader		Adobe® Acrobat® Reader (auch unter <a href="http://get.adobe.com/de/reader/">http://get.adobe.com/de/reader/</a> )
\Daten...	\HEM	ASCII-Datei der Rohdaten (HEM124_RAW.xyz) ASCII-Datei der bearbeiteten Daten (HEM124_DAT.xyz) ASCII-Datei der abgeleiteten Parameter (HEM124_APP.xyz) ASCII-Datei der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM124_INV.xyz)
	\HMG	ASCII-Datei der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, IGRF, Bodenstationsdaten, Tagesvariation etc. (HMG124.xyz)
	\HRD	ASCII-Datei der Rohdaten und der Konzentrationen für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Strahlungsrate (HRD124.xyz)
	\Fluglinien	Karte 1:50.000 des tatsächlich zurückgelegten Flugweges mit Topografie
\Karten...	\DEM	Karte 1:50.000 des Digitalen Höhenmodells
	\HEM	Karten 1:50.000 der Halbraumwiderstände und Schwerpunktstiefen für die Frequenzen 386, 1.822, 8.339, 5.489, 41.485 und 133.350 Hz Karten 1:50.000 der spezifischen Widerstände bei 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 und 60 m unter GOK
	\HMG	Karte 1:50.000 der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes
	\HRD	Karten 1:50.000 der Konzentrationen am Boden für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Gesamtstrahlung und die Strahlungsrate am Boden
	\ArcGIS	Kartenprojekte für ArcGIS 9.3.1 (*.mxd) inklusive Legendenteile (*.bmp), Rasterdaten TK 50 (GRID) und Geosoft-Plugin für ArcGIS
	\VRS	Vertikalschnitte des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnissen mit vier Schichten für jedes Messprofil im Horizontalmaßstab 1:50.000 und Vertikalmaßstab 1:5.000

## 8. Literatur

- ATKIS-DGM, 2009. Digitales Geländemodell DGM5 LSA. Landesamt für Vermessung und Geoinformationen, Sachsen-Anhalt.  
<http://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/leistungen/landesaufnahme/dgm/atkis-dgm.htm>
- Gerardi, J., 2009. Vorwort zu: Gerardi, J. (Hrsg.): Forschungsverbundvorhaben „Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks“. 2. Workshop in Kelbra 2009 – Statusseminar, Exkurs. f. und Veröffentl. DGG (EDGG), 242, 5–7, Hannover.
- 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.
- IAEA, 1991. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. International Atomic Energy Agency Technical Reports Series, No. 323, Vienna.
- IAEA, 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometer data. International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1363AEA, Vienna.
- IAGA, 1992. International Geomagnetic Reference Field, 1991 Revision. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group 8: Analysis of the main field and secular variation. Geophys. J. Int., 108, 945–946.
- IAGA, 2005. International Geomagnetic Reference Field, 2005, 10<sup>th</sup> generation. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Division V, Working Group V-MOD.  
<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
- Jordan, H. & Siemon, B., 2002. Die Tektonik des nordwestlichen Harzrandes - Ergebnisse der Hubschrauber-Elektromagnetik. Z. dt. geol. Ges., 153/1: 31-50, 9 Abb., 2 Tab., Stuttgart.
- Kerner, T., Krause, Y., Siemon, B., Grisseemann, C. & Noell, U., 2009. Forschungsverbundvorhaben „Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks“ – Geophysikalische Erkundung, BMBF-FKZ: 02C1476. In: Röhling, H.-G. (Hrsg.), GeoDresden 2009, Geologie der Böhmischen Masse – Regionale und Angewandte Geowissenschaften in Mitteleuropa, Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Dresden, 253.
- Kerner, T. & Siemon, B., 2010. Aero-geophysikalische Erkundung der elektrischen Leitfähigkeit (HEM – Hubschrauberelektromagnetik) im Bereich des Staßfurt-Egelter Sattels. In: Gerardi, J. (Hrsg.): Forschungsverbundvorhaben „Dynamik abgesoffener oder gefluteter Salzbergwerke und ihres Deckgebirgsstockwerks“. 2. Workshop in Kelbra 2009 – Statusseminar, Exkurs. f. und Veröffentl. DGG (EDGG), 242, 9-19, Hannover.
- Knödel, K., Lux, K.-H., Seifert, G., Voigt, H.-J., Lauterbach, M. & Schuck, A., 2002. Maßnahmen der nachhaltigen Gefahrenabwehr für Altlasten in Gebieten mit bergbaubedingten Destabilisierungsvorgängen am Beispiel der Stadt Staßfurt. BMBF-Verbundvorhaben, Abschlussbericht.

- Krause, Y., Kerner, T., Siemon, B., Grissemann, C., Furche, M. & Noell, U., 2009. Airborne and ground geophysical measurements to investigate mechanisms of salt dissolution and subsidence in abandoned mining areas. In: Proceedings of NovCare – Novel Methods for Subsurface Characterization and Monitoring: From Theory to Practice, 13.-16.5.2009, Leipzig, 89.
- Mathis, G.L., 1987. Smoothing spectral gamma logs: A simple but effective technique. *Geophysics*, 52, 363-367.
- Röttger, B., 2003. Auswertung Spektrometer-Eichung, Teststrecke Allensteig/Österreich 2001; Szinti Flug über Wasser Swakopmund/Namibia 2003., BGR-Bericht, Hannover.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 1998. Examples of 1-D inversion of multifrequency AEM data from 3-D resistivity distributions. *Exploration Geophysics*, 29, 133-141.
- Sengpiel, K.-P. & Siemon, B., 2000. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. *Geophysics*, 65, 1983-1992.
- Siemon, B., 2001. Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 46, 65-76.
- 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, 206-218.
- Siemon, B., Blum, R., Pöschl, W. & Voß, W., 2001. Aeroelektromagnetische und gleichstromgeoelektrische Erkundung eines Salzwasservorkommens im Hessischen Ried. *Geol. Jb. Hessen* 128, 115-125, Wiesbaden.
- Siemon, B. & Röttger, B., 2005. Aero-geophysikalische Kartierung von Störungszonen im Bereich des Windhoek-Aquifers, Namibia. In: *Tagungsband zur 65. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, 21.-25.2.2005, Graz, 85.
- TopScan, 2009. Abschlußbericht zur Laserscannermessung Staßfurt – Befliegung 2009, im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. TopScan – Gesellschaft zur Erfassung topographischer Informationen mbH.
- Wilford, J.R., Bierwirth, P.N. & Craig, M.A., 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 201-216.

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

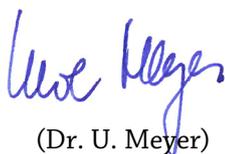
Abteilungsleiter



(Dr. M. Kosinowski)

Leiter der Abteilung  
„Grundwasser und Boden“

Fachbereichsleiter



(Dr. U. Meyer)

Leiter des Fachbereichs  
„Geophysikalische  
Erkundung – Ressourcen  
und Oberflächenprozesse“

Sachbearbeiter



(Dr. B. Siemon)

Leiter des Arbeitsbereichs  
„Aerogeophysik und  
Luftfahrttechnischer  
Betrieb“

## Anhang I

### Messgebiet 124 – Staßfurt

<b>Basis:</b>	Flugplatz Magdeburg-Cochstedt Flugplatzhöhe: 596 ft / 182 m	
<b>Basisstation:</b>	11°25'54,3" westlicher Länge und 51°51'31,4" nördlicher Breite	
<b>Messgebiet:</b>		
<b>Profilabstand:</b>	Messprofile – 100 m	Querprofile – 1000 m
<b>Profilrichtung:</b>	Messprofile – 132,5° /312,5°	Querprofile – 42,5° /222,5°
<b>Profilkilometer:</b>	ca. 4630 Messprofile–km	ca. 470 Querprofile–km
<b>Größe des Messgebietes:</b>	ca. 467 km <sup>2</sup>	

#### Allgemeine Anmerkungen:

- 1) Die Messprofile sind durch L\*.1 und die Kontrollprofile durch T\*.9 gekennzeichnet. Profile, die wiederholt wurden, sind durch L\*.2 bzw. T\*.8 gekennzeichnet.
- 2) Die Linien L10\*.4 bzw. T\*.7 kennzeichnen geteilte Profilabschnitte (nur für HEM, ergänzend zu L\*.1 bzw. T\*.9).
- 3) Die Linien mit der Kennung 100 kennzeichnen die Testlinie, die am Ende jedes Messfluges nahe dem Flugplatz Magdeburg-Cochstedt überflogen wurde.

## Messgebiet 124 – Staßfurt

**Tab. A-1:** Flugprotokoll

Flug	Datum	Zeit (UTC) Anfang – Ende	Profil	Bemerkungen zum Messflug
14088	06.06.07	13:24 – 16:18	T33.9 T32.9 T31.9 T30.9 T29.9 T28.9 T27.9 T26.9 T25.9 T24.9 T23.9 100	Querprofile Erster Messflug mit dem um eine koaxiale Frequenz auf 6 Frequenzen erweiterten EM-Bird <b>BKS 36a</b> und dem <b>HeliDAS-System</b> . <b>Video:</b> verschwommen und unbrauchbar <b>Fluglinie 100</b> ist eine Teststrecke parallel zur Landebahn des Flugplatzes Magdeburg-Cochstedt, die am Ende eines jeden Messfluges zu überfliegen ist. Wetter: bewölkt, 25° C
14089	07.06.07	07:50 – 10:30	<b>T22.9</b> T21.9 T20.9 T19.9 T18.9 T17.9 T16.9 T15.9 T14.9 T13.9 T12.9 100	Querprofile <b>Linie 22.9:</b> kein Mag <b>EM:</b> bei der 5. und 6. Frequenz fehlen die Aufzeichnung der Frequenz sowie der Referenzamplitude <b>Mag:</b> das Mag wird erst ab Fid 1198.0 aufgezeichnet <b>Heli-GPS:</b> die GPS-Daten sind in folgenden Bereichen gestört: Fid 4190.1 – 4190.8; 4195.6 – 4209.9; 5110.0 – 5111.0; 6760.1 – 6764.4; 8736.1 – 8736.9 Wetter: sonnig, 27° C, kaum Wind
14090	07.06.07	12:08 – 14:35	T11.9 T10.9 T9.9 T8.9 T7.9 T6.9 T5.9 T4.9 T3.9 T2.9 T1.9 T22.8 100	Querprofile <b>EM:</b> die für EM 1 angezeigte Frequenz springt an einigen Stellen EM5, EM6: keine Frequenzdaten, keine Referenzspannungen <b>GPS-Hubschrauber:</b> in folgenden Bereichen ist das Signal vom HS-GPS unbrauchbar: Fid 4190.1 – 4190.9 Fid 5110.1 – 5110.9 Fid 6760.1 – 6764.4 Fid 8736.1 – 8736.8 <b>Video: unbrauchbar</b> Wetter: bewölkt, 25° C

14091	11.06.07	07:03 – 09:38	L3.1 L6.1 L9.1 L12.1 L15.1 L18.1 L21.1 L24.1 100	<p>Messprofile (es wird zunächst jedes 3. Profil befliegen)</p> <p><b>EM:</b> die angezeigte Frequenz springt an einigen Stellen: EM1: 41477 – 41491 – 41504 Hz + 3 Ausreißer, EM3: 1 Ausreißer, EM4: konstant 133333 Hz; 1 Ausreißer EM5, EM6: keine Frequenzdaten, keine Referenzspannungen</p> <p><b>GPS-Hubschrauber:</b> Fid 6630 – 6643: Sprung in der Höhe um ca. 110 m</p> <p><b>Video: unbrauchbar</b></p> <p>Wetter: sonnig, 30° C</p>
14092	11.06.07	10:11 – 12:38	L27.1 L30.1 L33.1 L36.1 L39.1 L42.1 L45.1 100	<p>Messprofile (Wiederholung 14092)</p> <p><b>EM:</b> EM6: kein Signal in I und Q; nur sehr schwaches Referenzsignal (Senderplatine defekt)</p> <p>Frequenzanzeigen: die angezeigten Frequenzen springen an einigen Stellen: EM1: 41491 – 41504 – 41518 Hz, EM2: springt kurzzeitig auf 9070 Hz (von 8323 Hz), EM3: springt kurzzeitig auf 369 Hz (von 387 Hz), EM4: springt 3 mal kurz, sonst 133333 Hz</p> <p><b>Laser Altimeter:</b> häufige Ausreißer über einem See</p> <p><b>Video:</b> nach Korrektur am Objektiv liefert die Videokamera brauchbare Bilder</p> <p>Wetter: sonnig, 30° C</p>
14093	12.06.07	07:51 – 10:18	L48.1 L51.1 L54.1 L57.1 L60.1 L63.1 L66.1 100	<p>Messprofile</p> <p><b>EM:</b> Senderplatine der 6. Frequenz gewechselt; EM1: Fid 1357, 1935 Nullniveaushiftung in I und Q, verbunden mit Phasenverschiebung; EM2: Fid 1366, 1935: Nullniveaushiftung in I und Q, verbunden mit Phasenverschiebung</p> <p><b>Video:</b> Das Videobild ist am Anfang vorhanden. Danach verschwindet das Bild.</p> <p>Wetter: sonnig, 25° C</p>

14094	12.06.07	11:25 – 13:46	L69.1 L72.1 L75.1 L84.1 L81.1 L78.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5: starke Störungen vermutlich durch P.L. zwischen Fid 7200 und 7330 EM6: starker Noise durch Sferics während des gesamten Fluges; Fid 4240, 6233: möglicherweise Nullniveauverschiebung <b>Video:</b> Das Videobild ist am Anfang vorhanden. Danach verschwindet das Bild zeitweise und es erscheinen auf dem Tablet Computer nur noch die eingeblendeten digitalen Informationen. <b>L75.1:</b> 7 km vor Ende Abbruch wegen Regen Wetter: bewölkt, 28°C
14095	13.06.07	07:00 – 09:16	L87.1 L90.1 L93.1 L96.1 L99.1 L102.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM6: zu Beginn des Fluges starke Drift in Q; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, 22°C, sehr diesig
14096	25.06.07	11:28 – 13:48	L105.1 L108.1 L111.1 L114.1 L117.1 L120.1 L123.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM6: zahlreiche Sferics <b>Bodenstation:</b> gegen Ende des Fluges ist die Bodenstation zeitweise gestört durch Erntefahrzeuge Wetter: bewölkt, starker Wind
14097	26.06.07	07:02 – 09:20	L126.1 L129.1 L132.1 L135.1 L138.1 L141.1 L144.1 L147.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>Szinti:</b> falsche Einstellung der Verstärkung bei Kristall #1 Wetter: bewölkt, stürmisch

14098	26.06.07	10:39 – 12:56	150.1 N 153.1 S 156.1 N 159.1 S 160.1 N 31.1 S 32.1 N 35.1 S 100	Messprofile (Abschluss der Übersichtsbefliegung, Beginn der Verdichtungsbelegung) <b>EM:</b> EM 6: Störungen durch Sferics; <b>L35.1:</b> die 6. Frequenz ist unbrauchbar (Drift + Phasenverschiebung + Nullniveausprung); <b>EM5+6:</b> Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>Szinti:</b> falsche Einstellung der Verstärkung bei Kristall # 1 Wetter: bewölkt, stürmisch mit 22 Knoten
14099	27.06.07	06:59 – 09:14	L34.1 L37.1 L38.1 L41.1 L40.1 L43.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>L37.1:</b> Magnetometer ist zwischen Fid 1865 und 1873 gestört Wetter: bewölkt, stürmisch, 11°C
14100	27.06.07	10:50 – 11:35	L44.1 L47.1	Messprofile Der Messflug wurde in 2 Teilen aufgezeichnet, da nach L47.1 die Datenaufzeichnung ausfiel. <b>EM 5, EM 6:</b> Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>L47.1:</b> Magnetometer ist ab Fid 2392 wiederholt gestört Wetter: bewölkt, stürmisch, 14°C
14101	27.06.07	11:36 – 12:46	L46.1 L49.1 L50.1 100	Messprofile 2. Teil des Messfluges <b>EM 5, EM 6:</b> Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>L46.1:</b> Wiederholung, da keine EM-Eichung vor Beginn der Linie <b>L50.1:</b> Wiederholung wg. Problemen mit dem EM Wetter: bewölkt, stürmisch, 14°C
14102				Keine Aufzeichnung

14103	28.06.07	07:01 – 07:51	L46.2 L49.2	Messprofile Der Messflug wurde in 2 Teilen aufgezeichnet, da bei Fid 1231 und 1248 Störungen (Phasenverschiebung, Nullniveausprung) in EM1 auftraten. <b>EM:</b> EM1: Fid 1231, 1248 – Phasenverschiebungen + Nullniveausprünge; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, sehr windig, 16°C
14104	28.06.07	07:51 – 09:10	L50.2 L53.1 L52.1 100	Messprofile 2. Teil des Messfluges <b>EM:</b> Fid 2662 – die Eichung erfolgt bei zu geringer Höhe; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, sehr windig, 16°C
14105	28.06.07	10:52 – 13:02	L55.1 L56.1 L59.1 L58.1 L61.1 L62.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, Regen, starker Wind
14106	29.06.07	06:31 – 08:45	L64.1 L65.1 L68.1 L67.1 L70.1 L71.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM2: relativ starke Drift; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, 12°C
14107	02.07.07	13:05 – 15:19	L74.1 L73.1 L76.1 L77.1 L80.1 L79.1 100	Messprofile <b>EM:</b> Mehrere Sprünge bei den Frequenzaufzeichnungen Wetter: bewölkt, regnerisch
14108	03.07.07	06:54 – 07:57	L82.1 L83.1 L86.1	Messprofile <b>EM:</b> EM6: Ausfall des Senders vor Beginn von L86.1; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>CXPL, CXSP</b> – keine Informationen Wetter: sonnig, kaum Wind

14109	03.07.07	10:17 – 12:40	L85.1 L88.1 L89.1 L92.1 L91.1 L94.1 L95.1 100	Messprofile <b>EM:</b> Sender von EM 6 vor dem Flug gewechselt; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, starker Wind
14110–17				Keine Aufzeichnung
14118	22.08.07	06:59 – 09:10	L1.1 L2.1 L5.1 L4.1 L7.1 L8.1 L11.1 L10.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM6: relativ starke Drift in I und Q während der ersten Hälfte des Fluges zwischen den Profilen; Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>HS-GPS:</b> die Antenne ist vorne links am Staurohr befestigt Wetter: sonnig, teilweise bewölkt, warm, Wind mit 10 Knoten aus 235°; (starker Regen am Tag vorher)
14119–22				Keine Aufzeichnung
14123	22.08.07	11:07 – 13:29	L13.1 L14.1 L17.1 L16.1 L19.1 L20.1 L23.1 L22.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, kaum Wind
14124	23.08.07	06:59 – 11:45	L25.1 L26.1 L29.1 L28.1 L97.1 L98.1 L101.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM6: relativ kräftige Drift in I zwischen den Profilen; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>HS-GPS:</b> auf L101.1 fällt mehrfach das GPS aus Wetter: sonnig, kaum Wind

14125	23.08.07	10:43 – 13:00	L145.1 L146.1 L149.1 L148.1 L151.1 L152.1 L155.1 L154.1 L157.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>HS-GPS:</b> auf L149.1 und L152.1 fällt das GPS kurzzeitig aus Wetter: bewölkt, kaum Wind
14126	24.08.07	06:49 – 09:10	L100.1 L103.1 L104.1 L107.1 L106.1 L109.1 L111.2 100	Messprofile <b>EM:</b> EM6: starke Drift in I + Q zwischen den Profilen, die mit zunehmender Flugdauer schwächer wird; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, 19°C
14127	24.08.07	10:10 – 12:40	L112.1 L113.1 L116.1 L115.1 L118.1 L119.1 L122.1 L121.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM2: L112.1 – geringe Phasenverschiebung; EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>HS-GPS:</b> relativ häufiger Ausfall Wetter: bewölkt
14128	27.08.07	08:34 – 11:00	L124.1 L125.1 L128.1 L127.1 L130.1 L131.1 L134.1 L133.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>HS-GPS:</b> häufiger Ausfall <b>Barometr. Höhenmesser:</b> in einigen Bereichen gestört Wetter: bewölkt, 17°C
14129	27.08.07	12:19 – 14:32	L136.1 L137.1 L140.1 L139.1 L142.1 L143.1 L158.1 L161.1 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet <b>HS-GPS:</b> eine neue Antenne ist auf dem rechten Staurohr befestigt; keine Ausreißer <b>Barometr. Höhenmesser:</b> zu Beginn des Fluges deutlicher Noise Wetter: sonnig, 20°C

14130	28.08.07	06:58 – 09:19	L27.2 L30 .2 L33.2 L36.2 L39.2 L42.2 L45.2 100	Messprofile <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: bewölkt, 11°C
14131	28.08.07	10:49 – 11:35		1. Teil des Messfluges: Magnetometer-Eichung 135°: 48945,532 nT 315°: 48942,905 nT 300°: 48945,100 nT 120°: 48943,971 nT 225°: 48946,178 nT 45°: 48945,979 nT 210°: 48947,006 nT 30°: 48947,278 nT
14132	28.08.07	11:35 – 12:58		2. Teil des Messfluges: Sonderprofile 1. Neugattersleben – Staßfurt 2. Parallel zu einer Power Line a) 60 m N b) 200 m S c) 300 m S d) 300 m N 3. Parallel zu einer Gasleitung 4. Parallel zur Autobahn <b>EM:</b> EM5+6: Frequenz und Referenzspannung wurden nicht aufgezeichnet Wetter: sonnig, 19°C

## Anhang II

### Beschreibung der Datenformate

#### A) Elektromagnetik

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

##### Allgemeiner Header:

```
/BGR HEADER (SHORT VERSION):  
/  
/AREANAME  
/STASSFURT  
/AREACODE  
/124  
/C_MERIDIAN, ZONE and GEOID  
/ 12 4 BESSEL  
/BIRD  
/61  
/NUMFREQ  
/ 6  
/FREQUENCY  
/ 386.00 1822.00 5489.00 8339.00 41485.00 133350.00  
/COILGEOMETRY  
/ 1.00 1.00 4.00 1.00 1.00 1.00  
/COILSEPERATION  
/ 7.94 7.93 9.06 7.93 7.91 7.92  
/TOWCABLE  
/ 40.00  
/DUMMY  
/ -999.99  
/DECIMATIONVALUE  
/ 1  
/PRIVTEXT  
(hier können bis zu fünf Zeilen Kommentar stehen)
```

**1) Rohdaten: HEM124\_RAW.XYZ**

Beispiel:

/Unprocessed data

/ XYZ EXPORT [01/28/2010]

/ DATABASE [.\124\_ALL\_FL\_for\_SPLIT.gdb]

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

//Flight 14088

//Date 2007/06/06

Random 0

```
4460335 5747327 11.4227483 51.8586158 0 132445.0 -2.37 0.22 179.10 184.55 181.43 2070.17 -945.88 ... -1300.37 323.47 41518 ... 5476 0.0101 0.0215
4460335 5747327 11.4227483 51.8586158 1 132445.1 -2.59 0.22 179.10 184.60 180.97 2081.53 -941.35 ... -1307.80 322.38 41519 ... 5476 0.0099 0.0406
4460335 5747327 11.4227483 51.8586158 2 132445.2 -1.91 0.22 179.10 184.65 181.58 2091.01 -939.37 ... -1313.14 323.35 41521 ... 5476 0.0074 0.0543
```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 12°, Rechtsverschiebung ("false easting") 4500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALTR	ft	Messwert des Radarhöhenmessers
ALTL_FP	m	Messwert des Laserhöhenmessers
ZHG_BIRD_RAW	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
ZHG_HELI_RAW	m	GPS-Höhe über NN des Hubschraubers, Bezugssystem WGS-84
ALTB	ft	barometrische Höhe des Hubschraubers, defekt
EM1I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41485 Hz
EM1Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41485 Hz
EM2I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8339 Hz
EM2Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8339 Hz
EM3I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
EM3Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
EM4I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=133350 Hz
EM4Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=133350 Hz
EM5I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1822 Hz
EM5Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1822 Hz
EM6I	ppm	Messwert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5489 Hz
EM6Q	ppm	Messwert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5489 Hz

EM1_FREQ	Hz	Frequenz für EM1-Kanäle (etwa f=41485 Hz)
EM2_FREQ	Hz	Frequenz für EM2-Kanäle (etwa f=8339 Hz)
EM3_FREQ	Hz	Frequenz für EM3-Kanäle (etwa f=386 Hz)
EM4_FREQ	Hz	Frequenz für EM4-Kanäle (etwa f=133350 Hz)
EM5_FREQ	Hz	Frequenz für EM5-Kanäle (etwa f=1822 Hz)
EM6_FREQ	Hz	Frequenz für EM6-Kanäle (etwa f=5489 Hz)
CPPL		Powerline-Detektor
CPSP		Sperics-Detektor

Anmerkungen:

- Zeilen, die mit "/" beginnen, sind Kommentarzeilen.
- Zeilen, die mit "//" beginnen, geben Auskunft über Flugnummer und Datum.
- Zeilen, die mit "Random" beginnen, kennzeichnen die Flüge.

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

## 2) Daten: HEM124\_DAT.XYZ

Beispiel:

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

/Levelled data

```
/ X      Y      LON      LAT  RECORD  UTC  TOPO  H_RADAR  H_LASER  BIRD_NN  H_BARO  REAL_1  QUAD_1... REAL_6  QUAD_6
LINE 1.1
4463769 5763108 11.470937 52.000679 4000 70547.0 82.34 42.77 46.16 128.50 133.51 129.72 139.60 ... 996.47 161.86
4463771 5763105 11.470969 52.000656 4001 70547.1 82.42 41.54 46.19 128.61 134.26 129.64 137.75 ... 989.82 160.72
4463773 5763103 11.471002 52.000629 4002 70547.2 82.49 42.24 46.23 128.72 134.63 126.72 137.40 ... 984.50 157.98
```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 4500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	korrigierte topografische Höhe über NN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe des Hubschraubers abzüglich der korrigierten Laserhöhe, über der Nordsee auf 0 gesetzt
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	korrigierter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
REAL_1	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
QUAD_1	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=386 Hz
REAL_2	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=1822 Hz
QUAD_2	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=1822 Hz
REAL_3	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=5489 Hz auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
QUAD_3	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=5489 Hz auf horizontal-koplanare Spulenanordnung umgerechnet
REAL_4	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=8339 Hz
QUAD_4	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=8339 Hz
REAL_5	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=41485 Hz
QUAD_5	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=41485 Hz
REAL_6	ppm	korrigierter Wert der Inphase-Komponente für die Frequenz f=133350 Hz
QUAD_6	ppm	korrigierter Wert der Quadrature-Komponente für die Frequenz f=133350 Hz

### 3) Halbraumparameter: HEM124\_APP.XYZ

Beispiel:

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

/Levelled data

/ X Y LON LAT RECORD UTC TOPO H\_RADAR H\_LASER BIRD\_NN H\_BARO RHOA\_1 KDA\_1 ZST\_1... RHOA\_6 KDA\_6 ZST\_6

LINE 1.1

```
4463769 5763108 11.470937 52.000679 4000 70547.0 82.34 42.77 46.16 128.50 133.51 5.07 8.37 37.21 ... 14.78 0.76 3.41
4463771 5763105 11.470969 52.000656 4001 70547.1 82.42 41.54 46.19 128.61 134.26 5.07 8.37 37.20 ... 14.84 0.80 3.45
4463773 5763103 11.471002 52.000629 4002 70547.2 82.49 42.24 46.23 128.72 134.63 5.06 8.37 37.19 ... 14.90 0.84 3.50
```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 4500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	korrigierte topografische Höhe über NN abgeleitet aus der korrigierten GPS-Höhe des Hubschraubers abzüglich der korrigierten Laserhöhe, über der Nordsee auf 0 gesetzt
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	korrigierter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHOA_1	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz $f=386$ Hz
KDA_1	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz $f=386$ Hz
ZST_1	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz $f=386$ Hz
RHOA_2	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz $f=1822$ Hz
KDA_2	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz $f=1822$ Hz
ZST_2	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz $f=1822$ Hz
RHOA_3	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz $f=5489$ Hz
KDA_3	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz $f=5489$ Hz
ZST_3	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz $f=5489$ Hz
RHOA_4	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz $f=8339$ Hz
KDA_4	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz $f=8339$ Hz
ZST_4	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz $f=8339$ Hz
RHOA_5	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz $f=41485$ Hz
KDA_5	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz $f=41485$ Hz
ZST_5	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz $f=41485$ Hz
RHOA_6	$\Omega$ m	scheinbarer spezifischer Halbraumwiderstand für die Frequenz $f=133350$ Hz
KDA_6	m	scheinbarer Abstand des Messsystems zur Oberkante des leitenden Halbraums für die Frequenz $f=133350$ Hz
ZST_6	m	Schwerpunktstiefe für die Frequenz $f=133350$ Hz

#### 4) Inversionsdaten HEM124\_INV.XYZ

Beispiel:

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

/Levelled data

```
/ X      Y      LON      LAT  RECORD  UTC  TOPO  H_RADAR  H_LASER  BIRD_NN  H_BARO  RHO_I_1  D_I_1  RHO_I_2  D_I_2  RHO_I_3  D_I_3  RHO_I_4  QALL
LINE 3.1
4463769 5763108 11.470937 52.000679 4000 70547.0 85.46 42.77 45.66 131.12 136.18 19.70 7.48 12.12 17.64 6.75 15.78 4.10 5.74
4463771 5763105 11.470969 52.000656 4001 70547.1 85.46 41.54 45.76 131.22 136.92 19.64 7.50 12.13 17.06 6.82 16.09 4.13 5.74
4463773 5763103 11.471002 52.000629 4002 70547.2 85.47 42.24 45.84 131.32 137.29 19.56 7.56 12.11 16.62 6.87 16.32 4.15 5.76
```

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 4500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
TOPO	m	topografische Höhe über NN, abgeleitet aus Geländemodellen
H_RADAR	m	korrigierter Messwert des Radarhöhenmessers abzüglich der Kabellänge vom Hubschrauber zur Flugsonde, entspricht der Höhe der Flugsonde
H_LASER	m	korrigierter Wert des Laserhöhenmessers; entspricht der Höhe der Flugsonde über dem Modellraum
BIRD_NN	m	korrigierte GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
H_BARO	m	geglättete barometrische Sensorhöhe über NN, abgeleitet aus der barometrischen Höhe des Hubschraubers abzüglich der Kabellänge
RHO_I_1	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der ersten (oberen) Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
D_I_1	m	Mächtigkeit der ersten (oberen) Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_2	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der zweiten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
D_I_2	m	Mächtigkeit der zweiten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_3	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der dritten Schicht des 4-Schicht-Inversionsmodells
D_I_3	m	Mächtigkeit der dritten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
RHO_I_4	$\Omega$ m	spezifischer Widerstand der vierten Schicht des 5-Schicht-Inversionsmodells
QALL	%	Anpassungsfehler der Inversion (L1-Norm)

Anmerkungen:

Im Header steht zusätzlich:

/NUMLAYER

/ 4

/MUELAYER

/ 0

## B) Magnetik

Beschreibung der ASCII-Datei **HMG124.XYZ** mit den niveauekorrigierten Ergebnissen der Hubschraubermagnetik.

Beispiel:

/ XYZ EXPORT [03/02/2010]

/ DATABASE [..\..\HMG\Oasis\124\_mag.gdb]

/ X Y LON LAT ECORD UTC\_TIME ALT\_BIRD MAG\_BASE\_RAW MAG\_BASE\_F MAG\_RAW MAG\_COR MAG\_LEV

//Flight 12418

//Date 2007/08/22

Line 1.1

4463769 5763109 11.470937 52.000679 4000 70547.0 128.50 48996.03 48995.97 49017.70 -15.82 -16.92

4463771 5763106 11.470969 52.000655 4001 70547.1 128.61 48996.03 48995.97 49017.25 -15.17 -16.26

4463774 5763103 11.471002 52.000631 4002 70547.2 128.72 48996.03 48995.97 49016.85 -14.54 -15.63

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

Feldname	Einheit	Beschreibung
X	m	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 12°, Rechtsverschiebung ("false easting") 4500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
ALT_BIRD	m	GPS-Höhe über NN der Flugsonde, Bezugssystem WGS-84
MAG_BASE_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
MAG_BASE_F	nT	bereinigte Daten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Basisstation
MAG_RAW	nT	Rohdaten des erdmagnetischen Totalfeldes an der Flugsonde
MAG_COR	nT	Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes nach Abzug des IGRF und der Tagesvariation sowie Korrektur des richtungsabhängigen Fehlers (heading error)
MAG_LEV	nT	niveauekorrigierte Anomalie des erdmagnetischen Totalfeldes

Anmerkungen:

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

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

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

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

## C) Radiometrie

Beschreibung der ASCII-Datei **HMG124.XYZ** mit den niveauekorrigierten Ergebnissen der Hubschrauberradiometrie.

Beispiel:

/ XYZ EXPORT [03/02/2010]

/ DATABASE [..\HRD\Oasis\124\_gamma.gdb]

/ X Y LON LAT RECORD UTC\_TIME HAG PRESS TEMP LIVE\_T COSMIC TOT\_RAW POT\_RAW URA\_RAW THO\_RAW URAUP TOT\_LEV POT\_LEV URA\_LEV THO\_LEV EXPO

//Flight 12418

//Date 2007/08/22

Line 1.1

```
4463769 5763109 11.470937 52.000679 4000 70547.0 87.3 99.1 17.5 933 70 803 99 20 27 4 812.83 2.39 3.95 10.86 9.29
4463791 5763082 11.471260 52.000439 4010 70548.0 91.6 99.1 17.5 940 63 876 90 20 30 2 802.38 2.38 3.82 10.49 9.09
4463814 5763055 11.471595 52.000204 4020 70549.0 90.8 99.1 17.5 936 77 761 102 20 19 2 788.37 2.35 3.71 10.16 8.88
```

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	Gauß-Krüger Rechtswert, Bezugssystem DHDN (Bessel-Ellipsoid), Mittelmeridian 9°, Rechtsverschiebung ("false easting") 4500000m
Y	m	Gauß-Krüger Hochwert
LON	°	Geografische Länge, Bezugssystem WGS-84
LAT	°	Geografische Breite, Bezugssystem WGS-84
RECORD		an Messzeitpunkt orientierte fortlaufende Messpunktnummer
UTC_TIME	hhmmss.s	GPS-Zeit (UTC)
HAG	m	Höhe des Hubschraubers über Grund
PRESS	kPa	Luftdruck
TEMP	°C	Lufttemperatur
LIVE_T	ms	Registrierzeitintervall
COSMIC	cps	Kosmische Strahlung > 3 MeV
TOT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Totalstrahlung
POT_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Kaliumstrahlung
URA_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung
THO_RAW	cps	Rohdaten der gemessenen Thoriumstrahlung
URAUP	cps	Rohdaten der gemessenen Uranstrahlung von dem nach oben gerichteten Kristall
TOT_LEV	cps	Totalstrahlung (niveauekorrigiert)
POT_LEV	%	Kaliumgehalt (K-40) im Boden (niveauekorrigiert)
URA_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Uran (eU) im Boden (niveauekorrigiert)
THO_LEV	ppm	Äquivalentgehalt von Thorium (eTh) im Boden (niveauekorrigiert)
EXPO	µR/h	Strahlungsrate am Erdboden, ermittelt aus niveauekorrigierten Gehalten

Anmerkungen: siehe Magnetik

## **Anhang III**

### **Karten**

(Originalkarten verkleinert auf 1:175.000)



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

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