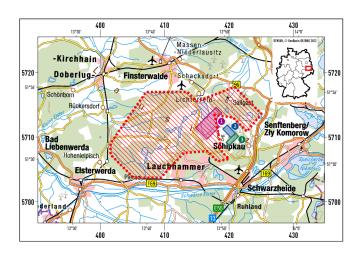


# Gebietsbericht D-AERO-Finsterwalde HEM/HMG/HRD-Befliegung 191 Finsterwalde Mai/Juli 2021





B2.1 · Aerogeophysik · 09/2022



# Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Gebietsbericht D-AERO-Finsterwalde HEM/HMG/HRD-Befliegung

191 Finsterwalde

Mai/Juli 2021



BGR-Projekt:

**D-AERO-Finsterwalde** 

PSP-Element: A-0304004.A

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

Datum: 16.09.2022



# Inhaltsverzeichnis

Ad	lresse	2
1	Zusammenfassung	3
2	Einleitung	5
3	Messgebiet	6
4	Befliegungen	7
5	Bearbeitung der Messdaten	
	5.1 Positionsdaten	
	5.2 Daten der Elektromagnetik	
	5.2.1 Kalibrierung	
	5.2.2 Niveaukorrektur	
	5.2.3 Korrektur von anthropogenen Effekten	
	5.2.4 1D-Inversion	
	5.3 Daten der Magnetik	14
	5.3.1 Basisstation	
	5.3.2 Sensorlage	
	5.3.3 Statistische Niveauanpassung	19
	5.3.4 Reduktion auf den Pol	19
	5.3.5 Filterung	19
	5.4 Daten der Radiometrie	20
	5.4.1 Geogene und anthropogene Einflüsse	
	5.4.2 Bodenfeuchtekorrektur	
6	Ergebnisse	21
	6.1 Elektromagnetik	21
	6.1.1 Generelle Ergebnisse	21
	6.1.2 Vergleich mit elektrischer Leitfähigkeit von Seewasser	
	6.1.3 Vergleich mit elektrischer Leitfähigkeit im Grundwasser	
	6.1.4 Vergleich mit Lithologie	
	6.2 Magnetik	31
	6.2.1 Anthropogene Strukturen	
	6.2.2 Geogene Strukturen	34
	6.3 Radiometrie	35
7	Fazit	37
8	Archivierung	38
9	Literatur	39
IJn	nterschriften	41



Anhang		43
Anhang I:	Verzeichnisse	43
Anhang I.1	: Abbildungsverzeichnis	43
Anhang I.2	: Tabellenverzeichnis	43
Anhang I.3	: Abkürzungsverzeichnis	44
Anhang II:	Flugtabelle	46
Anhang III:	Protokolle	48
Anhang III	.1: Positionsdatenverarbeitungsparameter	48
Anhang III	.2: HEM-Datenverarbeitungsparameter	50
Anhang III	.3: HMG-Datenverarbeitungsparameter	53
Anhang III	.4: HRD-Datenverarbeitungsparameter	54
Anhang IV:	Karten	55
Anhang IV	1: Fluglinien	56
Anhang IV	2: Geländehöhen	59
Anhang IV	3: HEM-Karten	60
Anhang IV		
Anhang IV	.5: HRD-Karten	91
Anhang V:	HEM-Vertikalsektionen	96
Anhang V.	1: Vertikalsektionen basierend auf Modellen mit 6 Schichten	96
Anhang V.2	2: Vertikalsektionen basierend auf Modellen mit 20 Schichten	121
Anhang VI:	Inhalt der DVD	146

Anlage: DVD

# Adresse:

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Fachbereich B2.1 "Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie" Stilleweg 2 D-30655 Hannover

Tel.: (0511) 643 3212 (Dr. U. Meyer) 3488 (Dr. B. Siemon)

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



# 1 Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) baut als Fachbehörde im Geschäftsbereich Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ein Forschungs- und Entwicklungszentrum Bergbaufolgen (FEZB) in der Lausitz zur nachhaltigen Gestaltung von Bergbaufolgelandschaften auf. Grundwasser und Boden, Sanierungsbergbau, Geotechnik und Umwelt-Monitoring sind die im Fokus des FEZB stehenden Forschungsthemen. Dabei werden bereits etablierte Methoden mit integrativen Weiterentwicklungen bewährter Technologien verknüpft. Dazu zählen aerogeophysikalische, drohnengestützte und weitere minimal-invasive Erkundungsmethoden, die grundlegende Parameter für die Bewertung großräumiger Haldenstrukturen und interner Wasserhaushalte liefern.

Die BGR führte von 10/2020 bis 06/2022 im Kernhaushaltsprojekt D-AERO-Finsterwalde eine Pilotstudie zur aerogeophysikalischen Erkundung der "Finsterwalder Restlochkette" mit ihrem Hubschraubermesssystem durch, um großflächig Informationen zu Grundwasserleitern in einem ehemaligen Gebiet des Braunkohletagebaus in der Lausitz zu gewinnen. Es handelt sich hierbei um die Tagebaufelder "Lauchhammer-Plessa" mit den Bergbaufolgeseen der "kleinen Restlochkette" südlich von Finsterwalde. Das eingesetzte Hubschraubermesssystem umfasst die Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD). Die Messtechnik befindet sich im Hubschrauber (HRD, Datenerfassung), in einer Flugsonde (HEM, HMG, Position und Lage) sowie in einer Basisstation (Tagesvariationen des Erdmagnetfeldes). Die zehn Messflüge über das etwa 250 km² große Messgebiet "Finsterwalde", das etwa 50 km südwestlich von Cottbus liegt, fanden im Sommer 2021 statt. Die Auswahl dieses Messgebietes erfolgte in Zusammenarbeit mit der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) sowie in Absprache mit dem Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR).

Für die Auswertung der aerogeophysikalischen Daten war zunächst eine umfangreiche Aufarbeitung der Positionsdaten notwendig, da erstmalig in der Flugsonde ein Satellitennavigationssystem verwendet wurde, dessen Rohdaten – ebenso wie die des Hubschraubers – über einen Web-Dienst des geologischen Dienstes von Kanada nachprozessiert werden konnten. Auch die Orientierung der Flugsonde wurde erstmalig registriert und konnte zur genaueren Abstandsbestimmung zur Erdoberfläche genutzt werden. Diese genauere Bestimmung der Positions- und Abstandsdaten war wichtig, da die aktuellen Geländehöhen sowie die Wasserstände in den Bergbaufolgeseen von dem verwendeten digitalen Geländehöhenmodel z. T. erheblich abwichen.

Aus den registrierten elektromagnetischen Daten zu sechs Messfrequenzen (im Bereich 0,38–128 kHz) wurden nach Bearbeitung bezüglich systemspezifischen (Rauschen, thermische Drift, Kalibrierung) und anthropogenen Einflüssen die spezifischen Widerstände auf Basis von einfachen 1D-Modellen für jeden Messpunkt abgeleitet. Hierzu dienten homogene Halbraummodelle für die Daten jeder Messfrequenz sowie Schichtmodelle, die auf sechs bzw. zwanzig horizontalen Schichten basierten. Die spezifischen Widerstände wurden als Karten bezüglich der Messfrequenzen bzw. bei ausgewählter Tiefen und als Vertikalschnitte entlang der Fluglinien präsentiert. Es zeigte sich, dass die abgeleiteten spezifischen Widerstände der HEM durch die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten an den See- und Grundwassermessstellen des LMBV prinzipiell im Rahmen der Auflösung des HEM-Verfahrens gut zu erklären waren. Die HEM-Ergebnisse lieferten auch Hinweise auf den Grundwasserspiegel im gesamten Messgebiet, was aufgrund noch nicht verfügbarer Vergleichsdaten bisher nicht verifiziert werden konnte. Markante, elektrisch leitfähigere Strukturen außerhalb des vom Bergbau beeinflussten Gebietes konnten mit Ton/Schluff-Ablagerungen sowie Braunkohle- und Torfschichten erklärt und von den sandig/kiesigen Bereichen abgegrenzt werden, da Letztere im Bereich von schwach mineralisiertem Grundwasser erhöhte spezifische Widerstände aufwiesen.

4

Die HMG-Daten wurden mit einem Cäsium-Magnetometer erfasst und bezüglich der Tagesvariationen an einem festen Punkt an der Erdoberfläche korrigiert. Nach Abzug des Hauptfeldes über ein aktuelles Referenzmodell und einigen systembedingten Korrekturen konnten die Anomalien des erdmagnetischen Feldes abgeleitet werden. Diese Anomalien werden im Allgemeinen durch Prozesse im Erduntergrund hervorgerufen, die die Magnetisierung gewisser Mineralien prägt bzw. diese umlagert. Daher treten magnetische Anomalien oft in Bereichen von vulkanischer Aktivität und Störungszonen auf, aber auch im Bereich von glazial geprägten Rinnen, in denen Fremdmaterial abgelagert wird. Neben diesen geogenen Ursachen beeinflussen auch anthropogene Effekte die Magnetfeldmessungen, da z. B. Metalle bei ausreichender Größe erkennbare Anomalien hervorrufen können. Diese Effekte, die häufig in besiedelten Gebieten und im Bereich anderer Infrastruktur (Eisenbahn, Straßen, Gasleitungen etc.) auftreten, werden bei der Datenverarbeitung in der Regel beseitigt. In diesem Bericht wurden beide Versionen präsentiert, da auch untersucht werden sollte, ob vergrabene oder verschüttete Bergbaurelikte aus der Luft zu detektieren sind. Es zeigte sich, dass solche Objekte mittels HMG generell nur nachweisbar sind, wenn die damit verbundene Anomalie groß genug ist, da das verwendete Magnetometer einen geräteinternen Tiefpassfilter mit einer Abschneideperiode von 0,5 s besitzt, was einer Flugstrecke von etwa 20 m entspricht. Zur Aufspürung von noch kleineren Objekten sind Messungen am Boden oder mit Drohnen erforderlich, die mit höherer Auflösung näher am Untersuchungsobjekt durchgeführt werden können.

Mit der Radiometrie lassen sich generell Unterschiede von Sand- und Tongehalten in der obersten Bodenschicht kartieren, da die Tonfraktion meistens Minerale mit den natürlich vorkommenden Radionukliden Kalium, Uran und Thorium enthält, während in der Sandfraktion meistens das nicht strahlenden Mineral Quarz überwiegt. Die registrierte Gammastrahlung wurde nach Anbringung etlicher Korrekturen (Energiekalibrierung, Spektrenglättung, Radon-Korrektur) und Filter auf die Gehalte bzw. Äquivalentgehalte von Kalium, Uran und Thorium am Boden umgerechnet. Die daraus abgeleiteten Ionendosisleistungen sind allgemein relativ gering und weisen auf eine tonarme Lithologie des Bodens hin. Allerdings ist ein großer Anteil der Gesamtfläche von Wald bedeckt, was ebenfalls eine Verringerung der Strahlungswerte verursacht. Höhere Werte liegen fast ausschließlich in anthropogen überprägten Gebieten des ehemaligen Bergbaus. Hier steigen die Konzentrationen aller drei Radioelemente in etwa gleichförmig im Vergleich zur Umgebung an, was auf vergleichbares Material hindeutet. Demgegenüber ließen sich Feuchtbereiche und nasse Moorgebiete deutlich abgrenzen, da sie sich wegen des dämpfenden Einflusses des Wassers durch sehr niedrige Strahlungswerte auszeichnen.

Weitere Detailuntersuchungen, wie z. B. im Bereich der Abraumhalden, wurden noch nicht vorgenommen, da dies sowie eine weiterführende Interpretation der Aerogeophysik-Ergebnisse ab 07/2022 im Nachfolgeprojekt Finsterwalder Restlochkette - Interpretation Aerogeophysik (FINA) vorgenommen werden soll.



# 2 Einleitung

Der Bund ist aufgerufen, einen Beitrag zum strukturpolitischen Wandel in den Braunkohlekernregionen zu leisten. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) treibt daher als Fachbehörde im Geschäftsbereich Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) die Gründung eines Forschungs- und Entwicklungszentrums Bergbaufolgen (FEZB) in der Lausitz zur nachhaltigen Gestaltung von Bergbaufolgelandschaften voran. Die im Fokus des FEZB stehenden Forschungsthemen sind auf Grundwasser und Boden, Sanierungsbergbau, Geotechnik und Umwelt-Monitoring ausgerichtet. Dabei wird die intelligente Kopplung von in der BGR bereits etablierten Methoden, aber auch die integrative Weiterentwicklung bewährter Technologien vorangetrieben. Dies sind aerogeophysikalische, drohnengestützte und weitere minimal-invasive Erkundungsmethoden, die grundlegende Parameter für die Bewertung großräumiger Haldenstrukturen und interner Wasserhaushalte liefern.

Zur Rehabilitation ehemaliger Gebiete des Braunkohletagebaus in der Lausitz werden großflächig Informationen zu Grundwasserleitern benötigt. Hierzu wurde eine Pilotstudie zur aerogeophysikalischen Erkundung der Tagebaufelder "Lauchhammer-Plessa" mit den Bergbaufolgeseen der "kleinen Restlochkette" südlich von Finsterwalde (kurz "Finsterwalder Restlochkette") mit dem Hubschraubermesssystem der BGR im Kernhaushaltsprojekt D-AERO-Finsterwalde durchgeführt. Zwar gab es vor Projektbeginn keine aktuellen Erfahrungen zu Befliegungen über Braunkohlentagebauen, aber erfahrungsgemäß können Horizonte wie Tonschichten oder Grundwasserspiegel sowie die Mineralisation des Grundwassers aus aerogeophysikalischen Daten abgeleitet werden.

Das Hubschraubermesssystem der BGR umfasst die Methoden Elektromagnetik (HEM), Magnetik (HMG) und Radiometrie (HRD). Das komplette Messsystem besteht aus einem Hubschrauber (Sikorsky S-76B, Kennung D-HBGR) als Systemträger, den simultan registrierenden geophysikalischen Messinstrumenten, die sich in einer geschleppten Flugsonde (RESOLVE BKS36a, Methoden HEM und HMG) bzw. im Hubschrauber (Spektrometer RS-500 mit RX-5, Methode HRD) befinden, den Navigations- und Positionierungsinstrumenten (Laserhöhenmesser LD90-3800VHS und Satellitennavigationssystem (GNSS) mit Empfänger Novatel PwrPak7-E1 und Lagesensor in der Flugsonde) und Steuerungseinheit mit Datenaufzeichnung (HeliDAS SYS14) sowie einer Basisstation (CF1) am Boden zur Erfassung der Variation des Magnetfeldes. Weitere Details sind in einem Technischen Bericht zu den Mess- und Auswertetechniken der Hubschraubergeophysik (Siemon et al., 2019) sowie in den Befliegungsberichten (Siemon et al., 2021a,b) beschrieben.



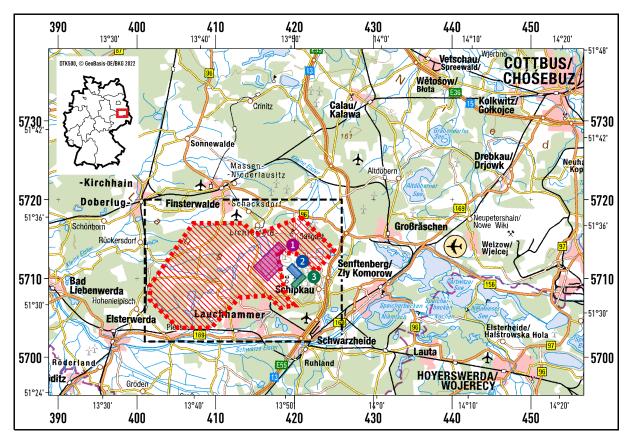
# 3 Messgebiet

6

Das Messgebiet (**Abbildung 1, Tabelle 1**) liegt zwischen Finsterwalde und Lauchhammer in Brandenburg (Niederlausitz), etwa 50 km südwestlich von Cottbus. Die Auswahl dieses Messgebietes erfolgte in Zusammenarbeit mit der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) sowie in Absprache mit dem Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR).

**Tabelle 1.** Rahmenparameter zur Befliegung Finsterwalde.

Gebietsbezeichnung	Finsterwalde
Gebietsnummer	191
Projekt	D-AERO-Finsterwalde
Datum	10.–11.05.2021 (2 Messflüge) 12.–17.07.2021 (8 Messflüge)
Flugplatz	Verkehrslandeplatz Welzow (EDCY) Flugplatzhöhe: 118 m NHN (387 ft) Koordinaten: 51° 34′ 50″ N, 14° 08′ 50″ 0
Transferdistanz	ca. 20 km



**Abbildung 1.** Planmäßige Lage und Ausdehnung des Gesamtmessgebietes Finsterwalde bei Cottbus sowie der drei Detailgebiete nordöstlich von Lauchhammer.



# 4 Befliegungen

In einer ersten Messkampagne im Mai 2021 (Finsterwalde-1) wurde nur das Gammastrahlen-Spektrometer (HRD) eingesetzt (Siemon et al., 2021a), um Informationen über Altlasten und Oberflächeneigenschaften im Messgebiet zu erhalten und um eine fliegerische Vorerkundung des Geländes vorzunehmen. Im Juli 2021 (Finsterwalde-2) wurden weitere Messungen (HEM, HMG, HRD) unter Einsatz der Flugsonde durchgeführt (Siemon et al., 2021b). Hierbei sollte auch der tiefere Untergrund untersucht werden, um die Grundwasserleiter zu erkunden. Des Weiteren wurden drei kleine Detailgebiete beflogen (**Abbildung 1**), um zu testen, ob auch kleinräumige Altlasten mit dem eingesetzten Hubschraubermesssystem zu erfassen sind. **Tabelle 2** listet die Befliegungsparameter auf. Insgesamt sind in dem etwa 250 km² großen Messgebiet Daten auf 176 Fluglinien (117 NW–SO-Messprofile (L) und 59 NO–SW-Kontroll-/Querprofile (T)) mit einer Gesamtlänge von 1736 km erhoben worden (plus 45 km auf 8 Referenzlinien beim Flugplatz Welzow). Die vollständige Flugtabelle befindet sich in **Anhang II**, die Karten mit den Fluglinien in **Anhang VI.1**.

**Tabelle 2.** Befliegungsparameter für das Messgebiet Finsterwalde.

Gebiet	191 Finsterwalde-1	191 Finsterwalde-2
Methoden	Hubschrauberradiometrie (HRD)	Hubschrauber- elektromagnetik (HEM), magnetik (HMG) radiometrie (HRD)
Anzahl Messflüge	2	8
Fläche	Flächenüberdeckung: ca. 190 km²	Flächenüberdeckung: ca. 250 km²
Anzahl Messprofile (L)	10	Gesamtgebiet: 86 + 11 wiederholt Detailgebiet 2: 10 Referenzlinien: 8
Anzahl Kontroll-/ Querprofile (T)	24	Gesamtgebiet: 11 Detailgebiet 1: 14 Detailgebiet 3: 10
Profilabstand (L)	2750 m	Gesamtgebiet: 250 m Detailgebiet 2: 100 m
Profilabstand (T)	1875 m	Gesamtgebiet: 625–3125 m  Detailgebiet 1: 187 m  Detailgebiet 3: 50 m
Profilkilometer (L/T)	93 km / 382 km	Gesamtgebiet: 984 km / 150 km  Detailgebiete: 28 km / 99 km  Referenzlinien: 45 km
Profilrichtung (L/T)	135° / 225° (NW-SO / NO-SW)	135° / 225° (NW-SO / NO-SW)
Flughöhe	45–65 m über Grund (mittlere Hubschrauberhöhe etwa 55 m)	80–120 m über Grund (mittlere Höhe der Flugsonde etwa 60 m)



# 5 Bearbeitung der Messdaten

Die generelle Bearbeitung der Messdaten (Positionsdaten sowie geophysikalische Daten der Methoden HEM, HMG und HRD) ist im Detail in Siemon et al. (2019) beschrieben. Hier werden nur kurze Zusammenfassungen gegeben sowie die messgebietsspezifischen Aspekte näher erläutert.

Die Datenbearbeitung ist methodisch unterteilt worden, um auf die unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren eingehen zu können. Die unterschiedlichen Fluglinienabstände stellten dabei eine besondere Herausforderung dar. Während die Vorerkundung (Finsterwalde-1) mit einem sehr großen Fluglinienabstand von etwa 2 km verwendete (nur HRD), wurde die Haupterkundung (Finsterwalde-2) mit 250 m Linienabstand (plus einige Kontrollprofile mit variablem Abstand) durchgeführt (HEM, HMG und HRD). Aufgrund des guten Messfortschrittes konnten am Ende der Befliegung auch noch drei Detailgebiete mit geringerem Linienabstand (187 m, 100 m und 50 m) überflogen werden – ebenfalls mit allen Methoden (siehe **Tabelle 2**). Die Fluglinien verliefen sowohl in Messprofilrichtung (L) als auch senkrecht dazu (daher auch als Querprofile (T) bezeichnet). Eine gesonderte Bearbeitung der Detailgebiete hat aber bisher nicht stattgefunden.

Alle Daten und Darstellungen verwenden das Koordinatensystem ETRS89, Zone 33N, (EPSG Code 25833), im Folgenden auch kurz als UTM33 bezeichnet.

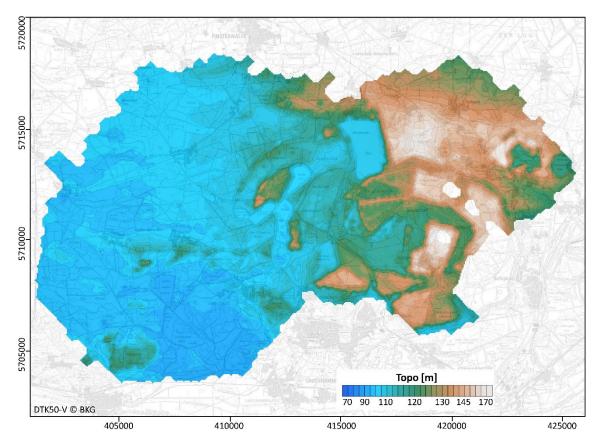
#### 5.1 Positionsdaten

Die Positionsdatenbearbeitung beinhalt die Kontrolle und – falls erforderlich – die Korrektur der Positionsund Abstandsdaten. Dies betrifft in der Regel die GPS-Daten von Hubschrauber (Heli) und Flugsonde (Bird) sowie die Abstandmessungen (Hubschrauber oder Flugsonde zur Geländeoberfläche) mit einem Laserhöhenmesser. Ein digitales Geländemodell (DEM) dient hierbei zur Kontrolle bzw. Korrektur (DGM25, BKG, 2012).

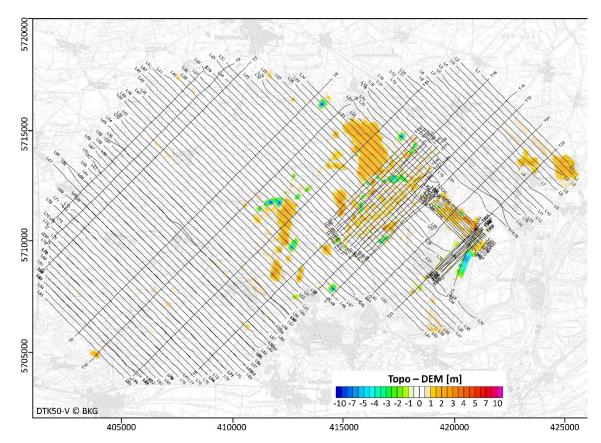
Bei der Befliegung Finsterwalde-2 wurde erstmalig auch in der Flugsonde ein GNSS-System verwendet, dessen Rohdaten – ebenso wie die des Hubschraubers in beiden Befliegungen – über den Web-Dienst *Precise Point Positioning* (PPP) des geologischen Dienstes von Kanada (*Natural Resources Canada*) nachprozessiert werden konnten. Diese Nachbearbeitung mit *GpsProc* (BGR-eigenes Programm) lieferte eine deutliche Verbesserung für die Position der Flugsonde, insbesondere für die kritische Vertikalkomponente. Dies hatte zur Folge, dass aufwändige, semi-automatische Nachbearbeitungen der Positionsdaten der Flugsonde mit-*PosView07* (BGR-eigenes Programm) verringert werden konnten. Lediglich bei einem Flug (19111) war die Anzahl der erfassten GPS-Satelliten zu gering, um eine hohe Positionsgenauigkeit zu erzielen.

Auch wurden erstmalig während einer größeren Befliegung mit dem im neuen GNSS-System integrierten Lagesensor die Neigungswinkel der Flugsonde aufgezeichnet, aus denen Korrekturen für die Messwerte der Laserhöhe abgeleitet werden konnten. Diese Korrekturen führten ebenfalls zu einer deutlichen Verbesserung der Abstandmessung zwischen Flugsonde und Geländeoberfläche (bzw. Bewuchs und Bebauung).

Die beiden o. g. Verbesserungen ermöglichten auch eine genauere Ableitung der Geländehöhe aus den Flugdaten (Topo, **Abbildung 2**), sodass der Unterschied zu dem verwendeten DEM sehr klein ist (Topo – DEM, **Abbildung 3**), sofern kein Bewuchs bzw. Bebauung oder eine nachträgliche (bezogen auf die letzte Aktualisierung des verwendeten DEM) Geländeveränderung existiert. Die Bearbeitung der Höhendaten im Messgebiet Finsterwalde mit *PosView07* legten allerdings nahe, nicht nur Bereiche mit Bäumen und Häusern, sondern auch solche mit Wiesen und Feldern zu entfernen und mit Hilfe des DEM zu interpolieren. Die korrigierten Laserdaten wurden schließlich nur dort verwendet, wo das DEM zum Zeitpunkt der Befliegung (Juli 2021) offensichtlich nicht korrekt war, wie z. B. bei den Wasserständen in den Bergbaufolgeseen oder im Bereich von Erdraumarbeiten (Halden, Kippen, Gruben, Tagebauhängen), oder das DEM eventuell nicht korrekt sein könnte, wie z. B. in Moorbereichen, da dort ein DEM von der aktuellen Mooroberfläche auch abweichen kann.



**Abbildung 2.** Geländehöhen (Topo) abgeleitet aus den Flugsondendaten (GPS-Höhe – Laserhöhe).



**Abbildung 3.** Differenzen aus Topo und DEM (DGM25, BKG, 2012) mit allen Fluglinien aus Finsterwalde-2.



Für den Flug 19111 musste die GPS-Höhe der Flugsonde nachkorrigiert werden, da die GPS-Korrektur (PPP) nicht ausreichend war. Diese Anpassung erfolgte durch Vergleich des berechneten Abstandes der Flugsonde zum DEM mit der korrigierten Laserhöhe. Die stark geglättete Differenz von beiden diente schließlich als Korrektur für die GPS-Höhe der Flugsonde.

Die größten Abweichungen zwischen der abgeleiteten Geländehöhe und dem verwendeten DEM treten im Bereich der Bergbaufolgeseen auf, die meist einen erhöhten Wasserspiegel aufwiesen. Lokal sind aber auch Änderungen in den Bergbaubereichen zu beobachten. Bei der Vorerkundung (Finsterwalde-1) wurde auf eine manuelle Nachkorrektur der Höhendaten verzichtet, da nur radiometrischen Daten erhoben wurden, für deren Auswertung ein geringfügiger Geländehöhenfehler unkritisch ist. Die verwendeten Bearbeitungsparameter sind in **Anhang III.1** aufgelistet.

#### 5.2 Daten der Elektromagnetik

Die Bearbeitung der HEM-Daten (Real- und Imaginärteil des Sekundärfeldes, die in der Aerogeophysik üblicherweise als In-phase (I) und Quadrature (Q) bezeichnet werden) hat zum Ziel, bestmöglich die Parameter des Erduntergrundes (spezifische elektrische Widerstände bzw. deren Kehrwerte, elektrische Leitfähigkeiten) zu bestimmen. Hierzu gehört auch, die Einflüsse auf die Messdaten, die nicht von dem Erduntergrund herrühren, zu erkennen und zu korrigieren. Dies können lokale Ursachen, wie z. B. nahe Gewitter, und anthropogene Effekte, wie z. B. elektromagnetische Störquellen (Stromleitungen, Sendestationen, etc.) oder metallische Installationen (Leitungen, Zäune, Schienen), sein. Aber auch systembedingte Ursachen, wie z. B. eine inkorrekte Kalibrierung, die thermische Drift der Elektronik, das Datenrauschen sowie bewegungsinduzierte Effekte, können die HEM-Daten verfälschen. Bei den lokalen Einflüssen können schwache Effekte durch geeignete Filter (nicht-lineare (NL) und Tiefpass-Filter) unterdrückt werden, größeren Effekte müssen aber markiert und die betroffenen Datenbereiche entfernt werden. Kleineren Datenlücken können anschließend meist durch eine geeignete Interpolation geschlossen werden. Zur Reduzierung der systembedingten Einflüsse werden Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt. Hierzu dienen transformierte HEM-Daten, die auf Basis von Halbraummodellen gewonnen werden, wobei an jedem Messpunkt aus den beiden HEM-Daten einer jeden Messfrequenz jeweils der Abstand des Messsystems zu einem leitenden Untergrund sowie dessen spezifischer Widerstand berechnet werden. Da die Halbraumparameter (im Unterschied zu den HEM-Daten) kaum noch eine Abhängigkeit von der Sensorhöhe (über Grund) aufweisen, können diese wesentlich besser als die HEM-Daten selbst für eine Datenqualitätskontrolle genutzt werden. Diese Halbraumparameter, scheinbarer spezifischer Widerstand (= Halbraumwiderstand) und scheinbare Tiefe (Differenz aus berechneter und gemessener Sensorhöhe), können sowohl zur Beurteilung und Korrektur von Kalibrier- und Niveaufehlern als auch für die Interpolation von Datenlücken verwendet werden. Für die bearbeiteten HEM-Daten werden schließlich mittels 1D-Inversion Schichtmodelle berechnet (Details siehe Siemon et al., 2019). Die finale Auswertung der HEM-Daten erfolgte mit HemView20g (BGR-eigenes Programm). Die verwendeten Steuerparameter sind in Anhang III.2 aufgelistet.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt anhand von Karten und Vertikalsektionen. Die Karten (siehe Gridparameter in **Anhang III.2)** werden für die Halbraumparameter jeder Messfrequenz produziert sowie für ausgewählte Tiefenschnitte abgegriffen aus den spezifischen Widerständen der 1D-Inversionsmodelle. Zusätzlich werden die Fluglinien (schwarz) sowie darauf auch Qualitätsparameter (weiß) dargestellt. Letztere markieren auf den Halbraumparameterkarten die interpolierten Datenbereiche bzw. auf den Tiefenschnitten einen Datenqualitätsparameter (QCP). Für den QCP wird auch eine eigene Karte produziert. Die Vertikalsektionen zeigen die nebeneinander gestellten Säulen (Breite etwa 4 m) der 1D-Inversionsmodelle mit Bezug auf NHN sowie weitere Informationen (HEM-Daten, Sensorhöhe, QCP). Details zur Darstellung können der jeweiligen Legende sowie Siemon et al. (2019) entnommen werden.



#### 5.2.1 Kalibrierung

Für eine bessere Kalibrierung der HEM-Daten der Befliegung Finsterwalde-2 wurden mehrere Maßnahmen durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden die vom Hersteller der Flugsonden gelieferten Kalibrierfaktoren (ICA-Werte) über relativ gut bekanntem Untergrund überprüft und angepasst. Hierzu wurde am 20.09.2021 entlang der Fahrrinne der Jade nördlich von Wilhelmshaven bei Flut ein Messflug mit dem in Finsterwalde verwendeten HEM-Messsystem (BKS36a, SYS14) durchgeführt. Dieser Bereich mit großen Wassertiefen (>15 m) stellt einen nahezu homogenen Untergrund dar, wobei ein spezifischer Widerstand des Meerwassers von  $\rho_{\rm w}$  = 0,21  $\Omega$ m angenommen wurde. Dieser Wert entsprach in etwa dem mittleren Halbraumwiderstand aller Messfrequenzen (vor Anpassung der Kalibrierfaktoren) und war plausibel für die aktuelle Wassertemperatur von etwa 17°C. Mittels Amplituden- und Phasenkorrekturen wurden die HEM-Daten zu allen Messfrequenzen so angepasst, dass die beiden Zielwerte (Halbraumwiderstand ≈ ρw, scheinbare Tiefe  $\approx 0$  m) angenähert wurden. Größere Korrekturen (>10 % in der Amplitude und >0.5° in der Phase) ergaben sich bei der höchsten und der mittleren Messfrequenz (Tabelle 3). Zu beachten ist, dass die Einstellung der genauen Amplituden- und Phasenkorrekturen über Meerwasser insbesondere für die höchste Messfrequenz generell schwierig ist, da ein Einfluss des hoch leitfähigen Meerwassers auf die automatische Kalibrierung (Autocal: Justierung des Messsystems auf Basis der ICA-Werte des Herstellers) zu Beginn eines Messfluges nicht ausgeschlossen werden konnte. Ferner ist die Quadrature-Komponente generell sehr klein, was sie empfindlich gegenüber auch kleineren Niveaufehlern macht. Hinzu kommt, dass die Abstandsmessungen mit dem Laserhöhenmesser über Wasser häufig aufgrund der spiegelnden Wasseroberfläche fehlen und somit deren Interpolationen fehlerhaft sein können.

**Tabelle 3.** Kalibrierwerte für das HEM-System BKS36a ermittelt über der Jade-Fahrrinne am 20.09.2021.

	Frequenz	Spulenabstand	ICA-Werte	Korrektu	rwerte
	[Hz]	[m]	[ppm]	Amplitude [ ]	Phase [°]
ЕМ3	378	7,938	-226	1,01	0,30
EM5	1.821	7,931	-204	1,02	0,20
EM6	5.417	9,055	88	1,10	-0,20
EM2	8.393	7,925	-160	1,28	-0,90
EM1	41.358	7,912	-610	1,04	0,40
EM4	128.362	7,918	-854	0,82	-23,40

In einem zweiten Schritt wurden die HEM-Daten einer Referenzlinie genutzt, die zum Abschluss eines Messfluges beim Flugplatz Welzow überflogen wurde. Diese verlief über dem Sedlitzer See und anschließend parallel zur Landebahn. Sowohl die zugehörigen Halbraumparameter als auch die Inversionsmodelle wurden miteinander verglichen. Zunächst wurden die Korrekturwerte aus **Tabelle 3** verwendet. Durch Vergleich der Halbraumparameter von verschiedenen Flügen und Messfrequenzen zeigte sich, dass insbesondere bei der höchsten Messfrequenz (EM4) Nachkorrekturen für jeden Messflug erforderlich waren. Diese Nachkorrekturen sind oft notwendig, wenn die automatische Kalibrierung des HEM-Systems zu Beginn eines Messfluges gestört ist, z. B. durch externe elektromagnetische Felder. Daher kann auch die über Meerwasser durchgeführte Kalibrierung fehlerhaft sein.

Im letzten Schritt wurden die Karten der Halbraumparameter im gesamten Messgebiet betrachtet, um verbliebene, flugspezifische Abweichungen zu erkennen und durch leichte Anpassung der Kalibrierfaktoren zu korrigieren. Die deutlichsten Abweichungen im Vergleich zu der Kalibrierung über Salzwasser sowie die größten Schwankungen von Flug zu Flug traten bei der höchsten Messfrequenz (EM4) in Amplitude und Phase auf (**Tabelle 4** und Korrekturwerte für Kalibrierfaktoren in **Anhang III.2**).



**Tabelle 4.** Angepasste Kalibrierwerte plus Standardabweichung für das HEM-System BKS36a ermittelt aus Vergleich der HEM-Daten im Messgebiet.

	Frequenz	Spulenabstand	Angepasste Korrekturwerte		
	[Hz]	[m]	Amplitude [ ]	Phase [°]	
ЕМ3	378	7,938	1,01 ± 0,01	0,29 ± 0,36	
EM5	1.821	7,931	1,01 ± 0,01	0,29 ± 0,42	
EM6	5.417	9,055	1,09 ± 0,04	-0,46 ± 1,02	
EM2	8.393	7,925	1,28 ± 0,01	-0,80 ± 0,39	
EM1	41.358	7,912	1,04 ± 0,02	1,20 ± 0,31	
EM4	128.362	7,918	0,60 ± 0,05	-17,99 ± 4,57	

#### 5.2.2 Niveaukorrektur

Die Niveaukorrektur erfolgte iterativ. Zunächst wurden mit vorläufig gesetzten Stützstellen die HEM-Daten aller Messfrequenzen in großer Flughöhe abgegriffen und als Nullniveau definiert, d. h. die dortigen HEM-Daten auf null verschoben. Hierauf basierend wurden Karten der beiden Halbraumparameter produziert und die Stützstellen zu auffälligen Linienabschnitten nachjustiert, indem die HEM-Daten der jeweiligen Frequenzen an den jeweiligen Stützstellen so gesetzt wurden, dass die zugehörigen Halbraumparameter in den betroffen Profil- und Kartenausschnitten besser zur Umgebung passten. Schließlich wurde die statistische Niveaukorrektur durchgeführt, indem zunächst die Halbraumparameter aneinander angeglichen und die daraus resultierenden synthetischen HEM-Daten (Modelldaten) als Basis für die Niveaukorrektur der Messdaten verwendet wurden (HSP- und IQ-Levelling, siehe Siemon et al. (2019) und Prozessierungsparameter in Anhang III.2). Manuelle Nachkorrekturen durch Rücknahmen bzw. Anpassungen der automatischen Korrekturen erfolgten an einigen Stellen, an denen aufgrund von linienparallelen, natürlichen Strukturen (z. B. Hänge bei Tälern, Kippen und Seen) zu stark beim HSP-Levelling korrigiert wurde. Den Abschluss der Niveaukorrektur bildet eine erneute Filterung (NL-Filter und schwacher, interpolierender Spline). In Bereichen mit stark variierenden HEM-Daten kann die NL-Filterung dennoch zu stark sein und zu einer Abflachung der Datenkurven führen. Daher kann die Abschlussfilterung an kritischen Stellen wahlweise ausgesetzt werden.

Die Detailgebiete wurden gesondert behandelt. Aufgrund ihrer geringen Länge wurden bei den Linien von den Detailgebieten 1 und 2 im IQ-Levelling die jeweiligen Differenzen (vor und nach HSP-Levelling) stärker mittels der verwendeten Spline-Funktion geglättet (SpSmth = 1,00 statt 0,85), sodass quasi nur noch kleine, schwach variierende Abweichungen angebracht wurden. Die Linien vom Detailgebiet 3 wurden vom abschließenden IQ-Levelling ausgeschlossen, da diese Linien in Kontrollprofilrichtung weitgehend isoliert von den übrigen Linien lagen und somit kein vernünftiges HSP-Levelling möglich war.

### 5.2.3 Korrektur von anthropogenen Effekten

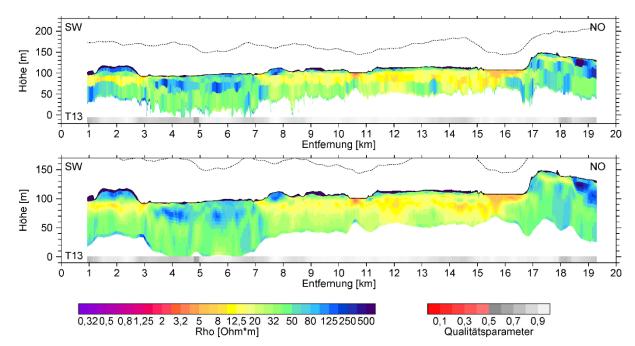
Kleine anthropogene Effekte, die sich in der Größenordnung des Datenrauschen befinden, können durch eine Filterung der Daten unterdrückt werden, sodass diese in den von den HEM-Daten abgeleiteten Produkten (Halbraumparameter, 1D-Inversionsmodelle) nicht mehr als störend wahrnehmbar sind. Die Parameter der verwendeten Filter (NL- und Tiefpassfilter) sind in der Tabelle mit Prozessierungsparametern in **Anhang III.2** aufgelistet. Diese stellen einen Kompromiss zwischen der Unterdrückung von ungewünschten (Rauschen, anthropogene Effekten) und gewünschten (geogene Signale) in den Daten dar. Folglich kam es vor, dass kleinräumige geogene Signale zu stark geglättet wurden, während die stärkeren anthropogenen



Effekte noch sichtbar blieben. Daher wurden Letztere markiert, entfernt und bei nicht zu großen Lücken wieder auf Gitterebene interpoliert (siehe Siemon et al., 2019).

#### 5.2.4 1D-Inversion

Bei der 1D-Inversion wird versucht, für jeden Messpunkt ein Modell des Untergrundes zu finden, das aus horizontalen Schichten (Modellparameter: spezifischer Widerstand und Mächtigkeit) besteht und die HEM-Daten bestmöglich erklärt. Prinzipiell lassen sich hierfür viele äquivalente Modelle ableiten. Hier wurden zwei grundsätzliche Ansätze verwendet: 1) Modelle mit wenigen (6) Schichten, keine zusätzliche Glättung und freie Modellparameter, 2) Modelle mit vielen (20) Schichten, zusätzliche Glättung (2,7-fach verstärkt) und Festhaltung einiger Modellparameter (20 spezifische Widerstände und Deckschichtmächtigkeit sind variabel, alle anderen Schichtmächtigkeiten sind fix, d. h. wie im Startmodell vorgegeben). Beide Ansätze haben Vor- und Nachteile: Während die Variante 1 markante Schichtgrenzen besser auflösen kann, liefert Variante 2 ruhigere Inversionsmodelle, nicht nur vertikal, sondern meist auch lateral. Daher werden hier beide Varianten verwendet (Details siehe Siemon et al. (2019) und Tabelle mit den Inversionsparametern in Anhang III.2). Ein Beispiel zeigt die Abbildung 4 für eine etwa 18 km lange Fluglinie von Südwesten (SW) nach Nordosten (NO). Beide Inversionsergebnisse sind ähnlich, wobei die Inversion mit wenigen Schichten häufig stufiger erscheint. Anhang V.1 und Anhang V.2 zeigt eine Übersicht der Inversionsergebnisse basierend auf Modellen mit 6 bzw. 20 Schichten für alle Fluglinien. Auf der beiliegenden DVD (siehe Anhang VI) befinden sich alle Vertikalsektionen in modifizierter Form (mit Daten und Anpassungsfehler sowie einer ausführlichen Legende).



**Abbildung 4.** Beispiel für Vertikalsektionen (etwa 15-fach überhöht) mit 6 (oben) und 20 (unten) Schichten entlang der Fluglinie T13.8. Die Darstellung der Mächtigkeit der letzten Schicht (Halbraum) ist willkürlich (hier: 5 m).

# D-AERO-Finsterwalde, Befliegungen Mai/Juli 2021

#### 5.3 Daten der Magnetik

Ziel der Datenbearbeitung in der Magnetik ist es, mit Hilfe der in der Flugsonde registrierten Messdaten die Anomalien des erdmagnetischen Feldes ΔT flächenhaft zu erfassen und darzustellen. Die Quellen der Anomalien können sowohl anthropogener als auch geogener Natur sein. In einem anthropogen überprägten Gelände wie dem Untersuchungsgebiet kann diese Zuordnung häufig nicht zuverlässig erfolgen. Insbesondere die oberflächennahen Quellen können sowohl anthropogener als auch geogener Natur sein.

Die Bearbeitung der Daten erfolgte im Wesentlichen nach einem Standard, der in Siemon et al. (2019) dokumentiert ist. Die dabei verwendeten Parameter sind in **Anhang III.3** aufgelistet. Die auf die HMG-Daten angewendeten Prozessierungsschritte umfassten: Filterung der Basisstationsdaten, automatische Entfernung fehlerhafter Aufzeichnungen des Sensors in der Flugsonde bei ungünstiger Orientierung ("toter Winkel"), Korrektur des Einflusses der Sensorlage auf die Magnetikdaten, Berechnung von  $\Delta T$ , Tieline-Levelling, Microlevelling, Reduktion auf den Pol und Entfernen anthropogener Anomalien zur Erzeugung einer bereinigten Anomalienkarte.

Als Ergebnis werden Karten der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes, mit und ohne anthropogene Effekte, erstellt (siehe **Anhang IV.4**). Zusätzlich werden die Fluglinien (schwarz) sowie darauf die Interpolationsbereiche (weiß) dargestellt. Details können der jeweiligen Legende sowie Siemon et al. (2019) entnommen werden.

#### 5.3.1 Basisstation

Die auch als Bodenstation bezeichnete Basisstation zur Aufzeichnung des magnetischen Tagesganges befand sich während der gesamten Messkampagne am südwestlichen Ende des Flughafens Welzow. Die Aufzeichnung deutet auf keine ungewöhnliche magnetische Unruhe hin. Der Rauschpegel, vermutlich hervorgerufen durch die nahegelegene solartechnische Anlage, betrug etwa ±1 nT und konnte durch die Anwendung eines 30-Minuten-Tiefpassfilters unterdrückt werden.

#### 5.3.2 Sensorlage

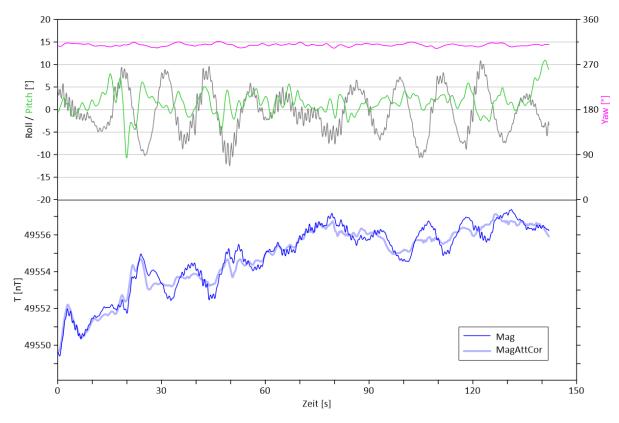
Die Befliegung in Finsterwalde war eine der ersten, bei dem ein Lagesensor in der Flugsonde (Bird) zum Einsatz kam. Der Lagesensor befindet sich im Bird auf der gleichen Plattform wie auch der Magnetiksensor. Er misst mit einer Frequenz von 10 Hz die drei Winkel Roll (Drehung um die Längsachse), Pitch (Drehung um die horizontale Querachse) und Yaw (Drehung um die vertikale Querachse). Damit besteht prinzipiell die Möglichkeit, eine sogenannte aeromagnetische Kompensation durchzuführen. Hintergrund hierfür ist, dass das im Bird gemessene Magnetfeld stets Anteile eines durch die Plattform generierten Störfeldes enthält, welche das eigentliche Nutzsignal, dessen Quellen in der Erdkruste liegen, überlagern und verfälschen. Als Plattform wird in diesem Zusammenhang der Bird selber mit allen Installationen angesehen. Der Hubschrauber kommt wegen seiner Entfernung von etwa 40 m als Störquelle weniger in Frage und wird hier nicht weiter betrachtet. Gemäß dem Tolles-Lawson-Modell (Tolles & Lawson, 1950) setzt sich das Störfeld zusammen aus einem permanenten, einem induzierten und einem durch Wirbelströme erzeugten Feld. Der permanente Anteil wird durch ferromagnetische Quellen, der induzierte durch paramagnetische Quellen im Erdmagnetfeld und der Wirbelstrom-Anteil durch Bewegungen der metallischen Elemente der Plattform bei Flugmanövern erzeugt. Die Anteile des Störfeldes stehen zum Teil untereinander in Beziehung und sind alle winkelabhängig. Unter einer aeromagnetischen Kompensation versteht man, die von der Orientierung des Magnetiksensors abhängige Stärke des erwarteten Störfeldes aus den Daten eines Lagesensors zu bestimmen und den jeweils ermittelten Wert zur Korrektur des gemessenen Magnetfeldes zu verwenden. Da es um die Messung des Totalfeldes geht, handelt es sich bei der Korrektur um einen skalaren Wert. Die Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen Sensorlage und Störfeld erfolgt experimentell. Dazu können zu-



nächst Kalibrierflüge durchgeführt werden, bei denen in großer Höhe mit dem System eine Reihe von Manövern vollzogen werden. Die dabei aufgezeichneten Daten werden dann einer Analyse unterzogen, deren Ziel es ist, aus den Daten des Lagesensors eine möglichst genaue Vorhersage für das Störfeld zu errechnen. Für die Lösung dieses Problems gibt es eine Reihe von Ansätzen, beispielsweise über die Lösung linearer Gleichungssysteme oder auch über die Anwendungen künstlicher neuronaler Netze.

Mit dem Messsystem der BGR mit dem neuen Lagesensor wurden bisher noch keine wie oben beschriebene Kalibrierflüge durchgeführt, um eine umfassende aeromagnetische Kompensation durchführen zu können. Dennoch wurde versucht, für das Messgebiet Finsterwalde ein einfaches, empirisches Korrekturverfahren bezüglich der Sensorlage zu entwickeln und anzuwenden. Im Folgenden wird dazu die Analyse der Daten im Zeit- wie auch im Frequenzbereich und das daraus entwickeltes Korrekturverfahren beschrieben.

**Abbildung 5** zeigt die Aufzeichnungen des Lagesensors zusammen mit denen des Magnetiksensors für die Fluglinie L77.2. In **Abbildung 6** sind die zugehörigen Powerspektren gezeigt. Man erkennt einige Korrelationen zwischen den Daten. Insbesondere Roll weist einige charakteristische Schwingungsperioden auf (in **Abbildung 6** mit grauen Pfeilen markiert), die sich auch in der Aufzeichnung des Magnetfeldes wiederfinden (blaue Pfeile). Eine Ausnahme bildet die Periode bei 0,29 s, welche sich nicht in den Magnetikdaten zeigt. Ursache dafür ist ein Filter im Magnetiksensor, der Perioden unterhalb 0,5 s unterdrückt. Die Periode von 3,1 s in der Pitch-Spur findet sich nur schwach, und die Periode von 3,9 s in der Yaw-Spur augenscheinlich nicht im Spektrum der Magnetik wieder. Es scheint daher zumindest eine klare Beeinflussung der Magnetikdaten durch den Roll-Winkel zu geben. Die Ursache hierfür sind durch das Erdmagnetfeld induzierte Sekundärfelder in der Messanordnung.



**Abbildung 5.** Aufzeichnungen des Lagesensors (oben) und des Magnetiksensors (unten, dunkelblau = unkorrigiert, hellblau = korrigiert) auf Fluglinie L77.2.

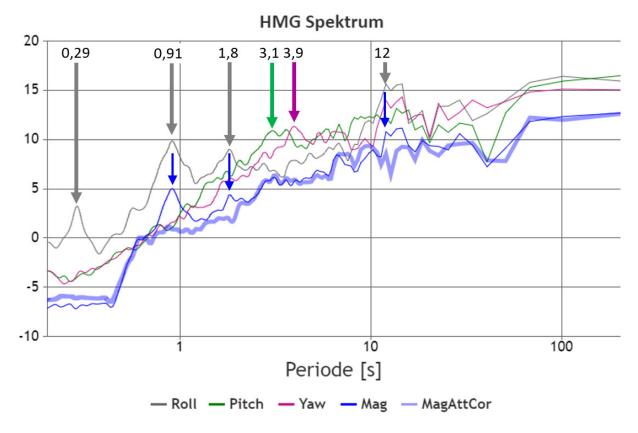
16



Um den beobachteten Einfluss genauer zu beschreiben und korrigieren zu können, wurde eine einfache Korrektur der Magnetikdaten definiert als:

$$MagAttKor[i] = Mag[i] + Roll[i+lag] \cdot rollFaktor.$$

Dabei sind <code>Mag[i]</code> und <code>MagAttKor[i]</code> die unkorrigierten und korrigierten Werte des Totalfeldes zum Zeitpunkt <code>i</code> sowie <code>lag</code> und <code>rollFaktor</code> Variablen, die den zeitlichen Versatz zwischen den Registrierungen von Lage- und Magnetiksensor und einen Proportionalitätsfaktor angeben. Eine empirische Abschätzung von <code>lag</code> und <code>rollFaktor</code> erfolgte, indem durch Variation dieser Werte Korrelationen in den resultierenden Spuren und Spektren optisch minimiert wurden.

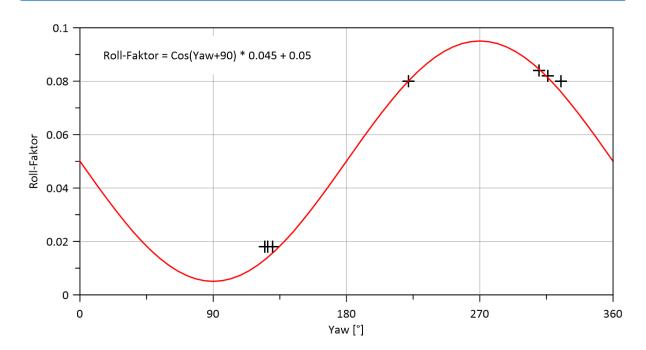


**Abbildung 6.** Powerspektren der Spuren aus Abbildung 5 mit Markierungen einiger signifikanten Schwingungsperioden (Y-Achse logarithmisch in willkürlicher Einheit). Die Spektren wurden nach einer Methode von Konno & Omachi (1998, Parameter B = 60) geglättet.

Es wurde ferner beobachtet, dass die für *rollFaktor* ermittelten Werte vom Yaw-Winkel, also im Wesentlichen von der Flugrichtung abhingen. Im gezeigten Fall der Fluglinie L77.2 beträgt dieser im Mittel etwa 310°. Um diesen Zusammenhang weiter aufzudecken, wurden Werte für *rollFaktor* auf Linien unterschiedlicher Flugrichtung bestimmt und gegen den jeweiligen mittleren Yaw-Winkel aufgetragen (**Abbildung 7**). Da die Bestimmung von *rollFaktor* nicht immer zuverlässig möglich ist, existieren für diese Betrachtung nur wenige Werte. Als Randbedingung kann ferner angenommen werden, dass der Abhängigkeit vom Yaw-Winkel eine Winkelfunktion zugrunde liegt. Es wurde daher, ebenfalls empirisch, eine Kosinus-Funktion an die Wertepaare angepasst. Mit der in **Abbildung 7** gezeigten Funktion war es so möglich, die Magnetikdaten des gesamten Messgebietes bezüglich des Roll-Winkels zu korrigieren.

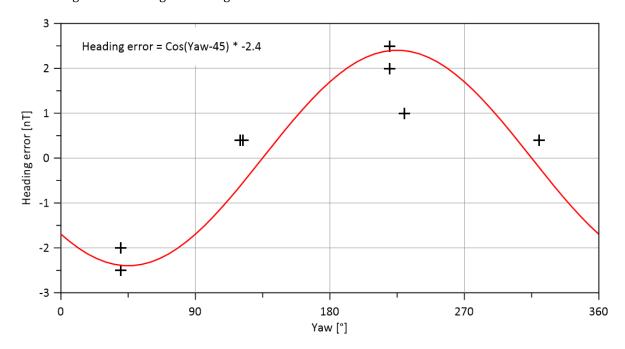
Der Erfolg dieser Korrektur ist in den **Abbildungen 5–6** als breite, hellblaue Linie gezeigt. Es ist eine deutliche Beruhigung des Signals in der Spur und im Spektrum zu erkennen, was für eine Wirksamkeit der Korrektur spricht.





**Abbildung 7.** Abhängigkeit des Roll-Faktors vom Yaw-Winkel (Kreuze = manuell abgeschätzte Werte, rote Linie = Kosinus-Anpassung).

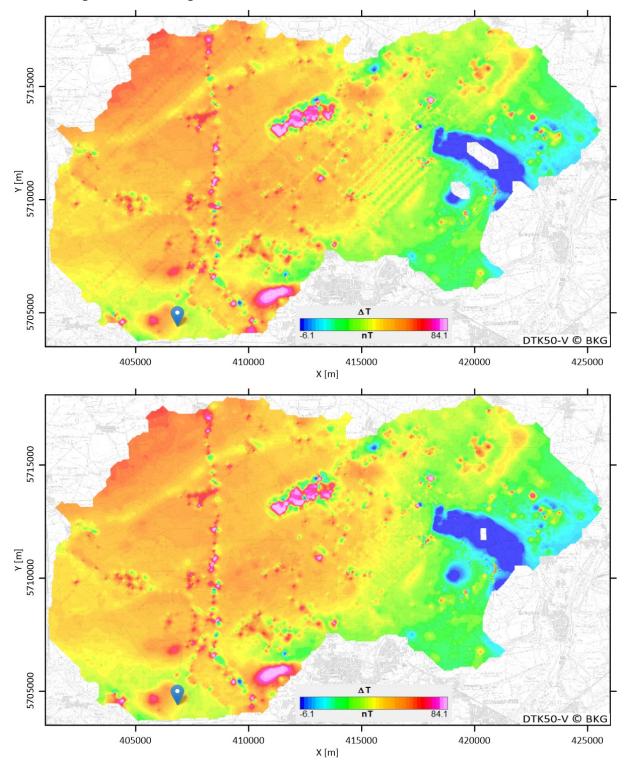
Ein weiterer Einfluss auf die Magnetikdaten ist der von der Flugrichtung abhängige Heading-Error. Dieser wurde zunächst manuell über die Beobachtungen von streifenförmigen Artefakten in der  $\Delta T$ -Anomalienkarte für die verschiedenen Flugrichtungen abgeschätzt. Darauf folgte wieder ein Auftragen gegen die jeweiligen Yaw-Winkel und die empirische Ermittlung einer periodischen Funktion zur Korrektur (**Abbildung 8**). Der so für jeden Messpunkt bestimmte Heading-Error konnte nun für eine weitere Korrektur der Daten des gesamten Messgebietes angebracht werden.



**Abbildung 8.** Abhängigkeit des Heading-Errors vom Yaw-Winkel (Kreuze = manuell abgeschätzte Werte, rote Linie = Kosinus-Anpassung).



In **Abbildung 9** sind  $\Delta T$ -Karten des Gebietes vor und nach den oben beschriebenen Korrekturen bezüglich der Sensorlage dargestellt. Zu erkennen ist eine deutliche Verminderung von streifenförmigen Artefakten sowie ein allgemein etwas ruhigeres Anomalienbild.



**Abbildung 9.** ΔT-Karte vor (oben) und nach (unten) Korrekturen bezüglich der Sensorlage.



Es sei betont, dass es sich bei den hier gezeigten Verfahren auf Basis empirisch ermittelter Korrekturwerte um einen ersten Versuch der Korrektur handelt. Die vielfältigen Einflüsse auf das im Bird gemessene Magnetfeld werden durch dieses Verfahren mit Sicherheit nicht im vollen Umfang erfasst. So wurde beispielsweise der Pitch-Winkel bisher nicht berücksichtigt, da sein Einfluss auf die Magnetikdaten nicht isoliert sichtbar wird. Dagegen lassen sich der Einfluss des Roll-Winkels in den Spuren und im Spektrum und der der Flugrichtung in einer Zusammenschau der Daten im Grid relativ gut erfassen. Eine umfassende aeromagnetische Kompensation erfordert aber, wie oben beschrieben, die Ermittlung von Korrekturgrößen über die Durchführung von Kalibrierflügen mit speziellen Flugfiguren.

Im Gegensatz zu den hier beschriebenen Korrekturen bezüglich der Sensorlage befindet sich eine Beschreibung der nun folgenden Bearbeitungsschritte wieder in Siemon et al. (2019).

#### 5.3.3 Statistische Niveauanpassung

Nach Anwendung der verschiedenen Korrekturen bezüglich der Sensorlage erfolgte ein Tieline-Levelling, gefolgt von einem Microlevelling. Durch das Levelling wurden Niveaufehler in Magnetikdaten stark abgeschwächt, sodass das resultierende  $\Delta T$ -Gitter praktisch keine sichtbaren Niveaufehler mehr aufwies.

#### 5.3.4 Reduktion auf den Pol

Nach dem Levelling erfolgte der Bearbeitungsschritt Reduktion auf den Pol (RTP). Dieses 2D-Spektralverfahren erzeugt unter Verwendung der lokalen Richtung des erdmagnetischen Hauptfeldes ein  $\Delta T$ -Gitter, bei dem die Anomalien senkrecht oberhalb der Quellen zu liegen kommen. Dieses Gitter wird im Anschluss wieder entlang der Fluglinien abgetastet und die folgenden Auswertungen an der resultierenden RTP-Spur vorgenommen.

## 5.3.5 Filterung

In einem weiteren Schritt wurden anthropogene Anomalien so gut wie möglich aus den ΔT-Daten entfernt. Anschließend erfolgte eine Bandpass-Filterung (0,5–20 km) auf Gitterebene. Eine Aufbereitung dieser Art eignet sich dazu, auch schwache geogene Signaturen in der Anomalienkarte besser sichtbar zu machen.



#### 5.4 Daten der Radiometrie

Ziel der Datenbearbeitung in der Radiometrie ist es, mit Hilfe der im Hubschrauber erfassten Messdaten die Gehalte der drei natürlich vorkommenden Radionuklide Kalium, Uran und Thorium sowie die Ionendosisleistung des oberflächennahen Bodens zu kartieren. Die Bearbeitung der gammaspektrometrischen Daten erfolgte nach einem Standard, der in Siemon et al. (2019) dokumentiert ist. Die dabei verwendeten Parameter sind in **Anhang III.4** aufgelistet. Die auf die HRD-Daten angewendeten Prozessierungsschritte umfassten: Energiekalibrierung, Spektrenglättung (NASVD), Radon-Korrektur, Ermittlung von Elementkonzentrationen und Ionendosisleistung, Filterung auf Spurebene, Bodenfeuchtekorrektur (Tieline-Levelling) und Filterung auf Gitterebene. Im Folgenden werden einige Besonderheiten bei der Prozessierung beschrieben.

Als Ergebnis werden Karten der (Äquivalent-)Gehalte von Kalium, Uran und Thorium sowie der Ionendosisleistung am Boden und der Gesamtstrahlung erstellt (siehe **Anhang IV.5**). Zusätzlich werden die Datenpunkte auf den Fluglinien (schwarz) sowie darauf die Interpolationsbereiche (weiß) dargestellt. Details können der jeweiligen Legende sowie Siemon et al. (2019) entnommen werden.

#### 5.4.1 Geogene und anthropogene Einflüsse

Das Messgebiet Finsterwalde ist von zahlreichen Infrastrukturelementen (Straßen, Siedlungen) durchzogen, deren gammaspektrometrisches Signal keine Information über den geologischen Untergrund enthält. Ferner sind große Flächen von Wald oder offene Wasserflächen (Seen) bedeckt, was eine mehr oder weniger starke Dämpfung des gemessenen Gammasignals zur Folge hat. Während der Prozessierung wurde darauf verzichtet, Abschnitte der Fluglinien, die in die oben genannten Bereiche fallen und damit radiometrisch beeinflusst sind, gesondert zu behandeln. In den Ergebniskarten sind daher zahlreiche Strukturen meist verminderter Intensitäten erkennbar, die nicht auf geringere Konzentrationen von Radionukliden im Boden, sondern auf die abschwächende Wirkung von Biomasse und Wasser oder, bei Bebauung, auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen sind. In **Kapitel 6.3** wird diese Problematik noch einmal näher betrachtet.

#### 5.4.2 Bodenfeuchtekorrektur

Bei der Datenbearbeitung der Radiometrie konnten neben den Daten der Messkampagne im Juli 2021 (Finsterwalde-2, Flüge 19103 bis 19112, siehe Siemon et al., 2021b) auch die Daten der Kampagne im Mai 2021 (Finsterwalde-1, Flüge 19101 und 19102, siehe Siemon et al., 2021a), bei der ausschließlich das HRD-System geflogen worden war, verwendet werden. Dabei war es von Interesse, ob sich zwischen den beiden Kampagnen merkliche Unterschiede im Niveau der Strahlungsintensitäten zeigten. Solche Unterschiede lassen sich meistens auf Variationen im Feuchtegehalt des oberflächennahen Untergrundes zurückführen und z. T. auch korrigieren. Zur Untersuchung dieses Aspektes wurde ein in Siemon et al. (2019) beschriebenes statistisches Verfahren (Tieline-Levelling) durchgeführt. Im Ergebnis zeigten sich keine statistisch signifikanten Niveauunterschiede in den Strahlungsintensitäten der verschiedenen Flüge. Es brauchte daher keine Bodenfeuchtekorrektur durchgeführt zu werden.



# 6 Ergebnisse

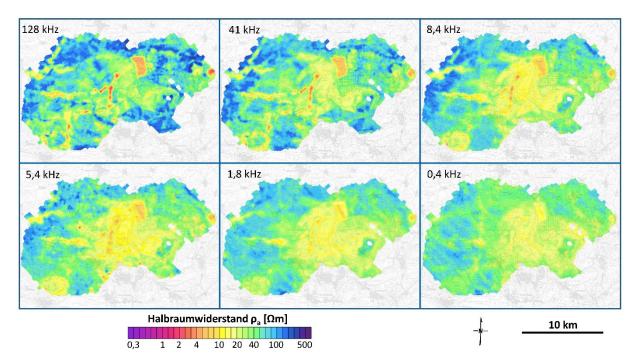
Im Folgenden werden die Ergebnisse der eingesetzten drei aerogeophysikalischen Methoden zunächst qualitativ und später im Vergleich zu externen Daten beschrieben. Alle Ergebniskarten und -schnitte befinden sich in verkleinerter Form im **Anhang IV-V** sowie im Originalmaßstab auf der beiliegenden DVD (Inhalt siehe **Kapitel 8** sowie **Anhang VI**).

#### 6.1 Elektromagnetik

Mit der Elektromagnetik sollen vor allem Ergebnisse für eine regionale Grundwassererkundung erzielt werden. Dabei stehen die Erfassung des aktuellen Grundwasserstandes und die Mineralisation des Grundwassers sowie die Ausweisung der Grundwasserleiter und -stauer im Vordergrund. Die Ergebniskarten der Elektromagnetik, die die Halbraumparameter zu jeder Messfrequenz sowie die spezifischen Widerstände in ausgewählten Tiefen, abgeleitet aus den 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten, zeigen, befinden sich im **Anhang IV.3**. Die auf den 1D-Inversionsmodellen mit 6 bzw. 20 Schichten basierenden Vertikalschnitte entlang aller Fluglinien sind im **Anhang V.1**. bzw. **Anhang V.2** zusammengefasst.

#### 6.1.1 Generelle Ergebnisse

Exemplarisch zeigt die **Abbildung 10** die Karten der scheinbaren spezifischen Widerstände (Halbraumwiderstände) bei allen Messfrequenzen (f=128-0.4~kHz), die die Strukturen in zunehmender Tiefe widerspiegeln. Die zugehörigen Schwerpunktstiefen sind abhängig von der Messfrequenz und den jeweiligen Halbraumwiderständen. Die Mittelwerte ( $\pm$  Standardabweichungen) liegen etwa bei 4-11~m (f=128~kHz), 6-15~m (f=41~kHz), 14-28~m (f=8.4~kHz), 16-32~m (f=5.4~kHz), 28-53~m (f=1.8~kHz) und 60-100~m (f=0.4~kHz). Hohe Halbraumwiderstände zeigen sich in vorwiegend sandigen Gebieten mit schwach mineralisiertem Grundwasser (blaue Farben). Bei höhere Mineralisierung oder tonhaltigen Sedimenten treten geringere Halbraumwiderstände auf (gelbe bis grüne Farben). Die niedrigsten Werte (orange Farben) werden bei den Bergbaufolgeseen mit meist deutlich erhöhter Mineralisation beobachtet.



**Abbildung 10.** Halbraumwiderstände bei allen Messfrequenzen (auf DTK50-V).

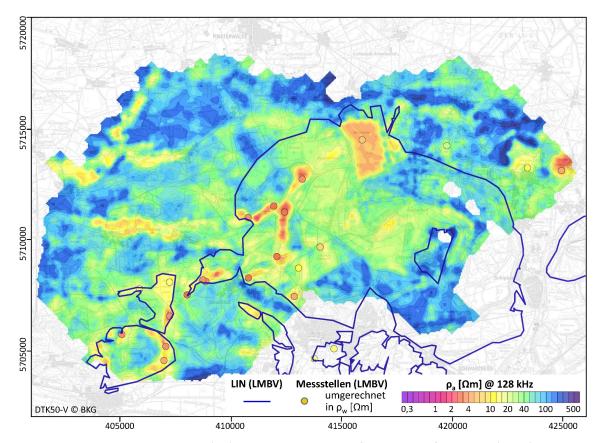


#### 6.1.2 Vergleich mit elektrischer Leitfähigkeit von Seewasser

Die Mineralisation und somit auch die elektrische Leitfähigkeit der Wässer der verschiedenen Seen im Messgebiet variiert (**Tabelle 5**). Dies äußert sich auch in den Halbraumwiderständen der höchsten Messfrequenz bei f = 128 kHz ( $\rho_{a6}$ ). So treten beispielsweise im größten See, dem Bergheider See, Halbraumwiderstände von etwa  $\rho_{a6} = 5~\Omega m$  (orange Farben) auf, was einer elektrischen Leitfähigkeit des Wassers von etwa  $\sigma_w = 2000~\mu S$ /cm entspricht. In einigen Seen westlich davon (z. B. Heidesee, Grünhauser See, Kleinleipischer See, Koynese, Großer Woobergsee, Seewaldsee, Grüner See) liegen die Halbraumwiderstände bei etwa  $\rho_{a6} = 3-4~\Omega m$  (orange-rote Farben,  $\sigma_w = 2500-3300~\mu S$ /cm), während andere Seen (z. B. Schmaler See, Grünwalder Lauch, Poleysee) niedrigere Werte  $\rho_{a6} = >10~\Omega m$  (gelbe-hellgrüne Farben,  $\sigma_w < 1000~\mu S$ /cm) aufweisen. In **Abbildung 11** sind als Farbpunkte die elektrischen Leitfähigkeiten aufgetragen, die an den Messstellen in den Seen im Zeitraum 30.04.–01.10.2021 erhoben wurden (LMBV, persönliche Mitteilungen). Dabei sind die elektrischen Leitfähigkeiten ( $\sigma_w$ ) in spezifische Widerstände ( $\rho_w$ ) umgerechnet worden:

$$\rho_{\rm w} [\Omega m] = 10.000 / \sigma_{\rm w} [\mu S / cm].$$

Die Gebiete der durch den ehemaligen Bergbau beanspruchten Flächen (Landinanspruchnahme (LIN), LMBV, 2022) sind hier wie auch in den nachfolgenden Karten als blaue Umrandung eingetragen.



**Abbildung 11.** Halbraumwiderstände (ρ<sub>a6</sub>) bei der höchsten Messfrequenz von f = 128 kHz (Karte) im Vergleich zu elektrischen Leitfähigkeiten von Wasser an Messstellen in Seen (Punkte); Messstellendaten bereitgestellt durch LMBV. Die blauen Polygone kennzeichnen die LIN-Flächen.

Die Messstellenwerte und die jeweiligen Halbraumwiderstände der höchsten Messfrequenz (f = 128 kHz) sind in **Tabelle 5** gelistet. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messstellenwerten (Punktmessungen) und den HEM-Ergebnissen (Volumenmessungen), wenn Messstellen mindestens 60 m vom nächsten Ufer entfernt liegen (**Abbildung 12a**). Einigen Messstellen weisen Koordinaten auf, die auf der DTK50-V nicht in den eingezeichneten Seebereichen liegen. Es konnte bisher nicht geklärt werden, ob



das an der zunehmenden Ausdehnung der Seeflächen liegt oder andere Ursachen hat. Diesen Messstellen wurde zur Kennzeichnung ein Abstand von 10 m zugeordnet (rot in **Abbildung 12**). Ohne die ufernahen (< 60 m Abstand) Messstellen liegen die an den Positionen übrigen Messstellen aus der Karte abgegriffenen Halbraumwiderstände nahe (Mittelwert = 1,17 + 0,36) am Erwartungswert (d. h.  $\rho_{a6}/\rho_w$  = 1). Die lineare Regressionsgerade ist etwas zu steil und geht nicht direkt durch den Ursprung ( $\rho_{a6}$  = 1,126  $\rho_w$  + 0,187  $\Omega$ m mit Bestimmtheitsmaß R² = 0,972), da insbesondere an einer Messstelle (Grünhauser See Ost, schwarzes Kreuz in den **Abbildungen 12a-c**) ein viel zu hoher Halbraumwiderstand beobachtet wurde. Bei Betrachtung der logarithmischen Widerstandswerte (**Abbildungen 12c**) werden zwar die Abweichungen von den Sollwerten (Steigung = 0,992, Schnittpunkt = 0,059  $\triangleq$  1,145  $\Omega$ m, Sollwert = 1  $\Omega$ m) geringer, aber das Bestimmtheitsmaß (R² = 0,895) wird schlechter. Die logarithmische Betrachtung hat den Vorteil, dass sich bei der Analyse von spezifischen Widerstände ( $\rho_{a6}$  vs.  $\rho_w$ ) und Leitfähigkeiten ( $\sigma_{a6}$  = 1/ $\rho_{a6}$  vs.  $\sigma_w$  = 1/ $\rho_w$ ) vergleichbare Werte ergeben.

Tabelle 5. Elektrische Leitfähigkeiten an Messstellen in Seen im Vergleich zu HEM-Ergebnissen.

Bezeichnung des Sees	X UTM33	Y UTM33	σ <sub>w</sub> [μS/cm]	ρ <sub>w</sub> [Ωm]	ρ <sub>a6</sub> [Ωm] Linie	ρ <sub>a6</sub> [Ωm] Karte
Bergheider See	415912	5714464	2010	4,98	4,90	5,01
Heidesee	413203	5712690	3110	3,22	3,50	4,11
Kleinleipischer See	412405	5711200	3240	3,09	2,90	2,59
Grünhauser See Ost	411918	5711480	3240	3,09	3,20	6,41
Grünhauser See West	410759	5710952	2730	3,66	4,20	24,99
Koynesee	412058	5709196	3330	3,00	3,00	7,82
Kranichbecken Mastkippe	414015	5709624	1350	7,41	13,60	27,71
Kranichsee	410774	5708228	3370	2,97	4,00	14,63
Schmaler See	413041	5708671	945	10,58	21,90	21,13
Grünewalder Lauch Ostfeld	407217	5708036	788	12,69	13,50	13,86
Grünewalder Lauch Westfeld	405861	5707732	671	14,90	18,90	19,43
Großer Woobergsee	408857	5708066	2600	3,85	5,10	16,57
Kleiner Woobergsee	408717	5708140	3120	3,21	7,20	16,95
Grünewalder Linse	408007	5707465	3200	3,12	15,00	21,12
Seewaldsee	407218	5706502	2980	3,36	3,20	3,13
Grüner See	407043	5705132	2530	3,95	4,1	4,73
Plessa-Nord	405060	5705669	2730	3,66	6,30	15,60
Tongrube Plessa 108/109	406960	5704493	2370	4,22	11,00	10,75
Strandbad Kleinleipisch	412847	5707389	2380	4,20	4,10	5,60
Poleysee	419735	5714201	379	26,39	27,00	29,07
Drochow	424912	5713076	2070	4,83	4,50	4,14
Heye Nordfeld-Hauptbecken	423374	5713202	908	11,01	12,40	25,60



An Messstellen im Uferbereich bzw. generell bei schmalen Seen muss ein Geometrieeffekt berücksichtigt werden, da der Einflussbereich des Untergrundes auf die HEM-Messungen (*footprint*) über 100 m betragen kann, d. h. es kann nicht nur das Seewasser, sondern auch der Uferbereich erfasst werden. Ferner kann der Seeuntergrund bei sehr flachen Seen einen Einfluss haben.

Die  $\rho_{a6}$ -Werte, die manuell auf einer Fluglinie in der Nähe der Messstellen (meist weiter vom Ufer entfernt und vermutlich bei größerer Seetiefe) abgegriffen wurden (**Abbildungen 12d-f**), liegen häufiger in der Nähe der Erwartungswerte (Mittelwert = 1,05 + 0,11), sofern ein See an dieser Stelle mindestens 150 m breit ist. Die lineare Regression liefert  $\rho_{a6}$  = 1,035  $\rho_w$  + 0,079  $\Omega$ m mit Bestimmtheitsmaß  $R^2$  = 0,995 (bzw. Steigung = 1,012, Schnittpunkt bei 0,009  $\triangleq$  1,021  $\Omega$ m,  $R^2$  = 0,980 bei Verwendung der logarithmischen Werte). Die größte Abweichung (Faktor 3) wird bei der Grünwalder Linse beobachtet (schwarzes Kreuz in den **Abbildungen 12d-f**), einem recht schmalem See.

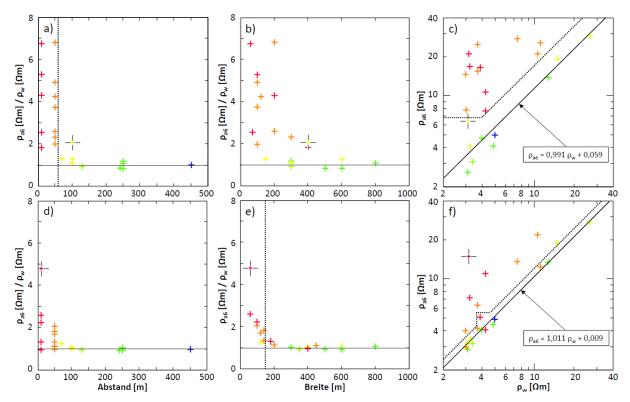


Abbildung 12. Halbraumwiderstände der höchsten Messfrequenz (ρa6) im Vergleich mit spezifischen Widerständen von Seewasser (ρw), abgeleitet aus elektrischen Leitfähigkeiten an LMBV-Messstellen.
a) – c): Abgriff von ρa6 an den Positionen der Messstellen aus der Karte (Abbildung 11),
d) – f): Abgriff von ρa6 an benachbarten Fluglinien über den Seen.
Die Farben der Werte (+) kennzeichnen die kürzesten Abstände der Messstelle zum Ufer,
Farbzuordnung siehe a) oder d). Die Breiten geben in etwa die Ausdehnung der Seen in der
Nähe der Fluglinien an. Die gepunkteten Linien grenzen die für die Regression verwendeten
Werte ab, die in a) und e) rechts bzw. in c) und f) unterhalb davon liegen.

Ferner ist zu beachten, dass unterschiedliche Tiefen für die Entnahme der Wasserproben und den HEM-Daten vorliegen können. Letztere beziehen sich auf ein Volumen, deren Schwerpunkt von der Zielgröße selbst, dem Halbraumwiderstand, abhängt. Bei der hier betrachteten höchsten Messfrequenz variiert diese Schwerpunktstiefe von ca. 1,2 m ( $\rho_{a6}$  = 3  $\Omega$ m) bis ca. 3,8 m ( $\rho_{a6}$  = 30  $\Omega$ m). Für eine genauere quantitative Analyse müssten aufwendige 3D-Modelle anstelle der einfachen Halbraummodelle zur Ableitung der spezifischen Widerstände verwendet werden, um auch laterale Änderungen besser erfassen zu können.

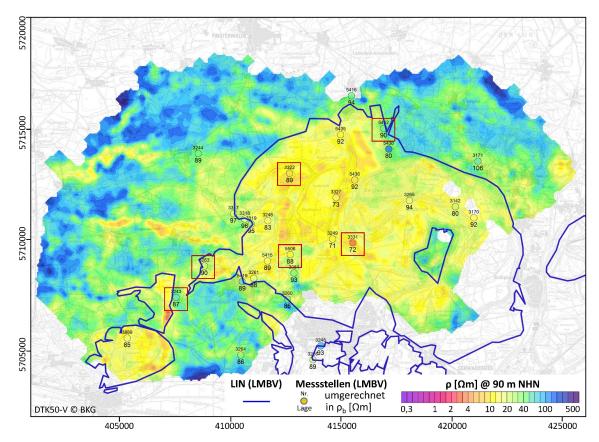


#### 6.1.3 Vergleich mit elektrischer Leitfähigkeit im Grundwasser

Die elektrischen Leitfähigkeiten im Grundwasser können nicht direkt mit den Ergebnissen der HEM verglichen werden, da die HEM-Messungen nicht nur von der Leitfähigkeit des Grundwassers in den Poren des Gesteins, sondern auch vom Gestein selbst, d. h. von der Lithologie (Tonanteil, Porosität), beeinflusst wird. In den Grundwassermessstellen sind die Filterstrecken aber typischerweise in eher sandigen Sedimenten ausgebaut, sodass dort eine ähnliche Lithologie vorherrscht und ein Vergleich möglich sein sollte.

In **Abbildung 13** sind exemplarisch die spezifischen Widerstände in 90 m NHN dargestellt, abgeleitet aus 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten. Dieser Horizont wurde gewählt, da bei den Grundwassermessstellen die meisten Filter bzw. der Mittelpunkt der Filterstrecken (**Tabelle 6**) in etwa bei 88 ± 8 m NHN liegt. Die Farbpunkte stellen die elektrischen Leitfähigkeiten dar, die im Zeitraum 19.07.–15.09.2021 an den Messstellen erfasst wurde (LMBV, persönliche Mitteilungen). Um den Einfluss der Lithologie berücksichtigen zu können, sind die elektrischen Leitfähigkeiten des Grundwassers ( $\sigma_w$ ) in spezifische Widerstände ( $\rho_b$ ) unter Verwendung des Formationsfaktors (FF = 4), der typisch für sandige Sedimente ist (Goes et al., 2009), umgerechnet worden:

$$\rho_{\rm b} [\Omega {\rm m}] = 4 \cdot 10.000 / \sigma_{\rm w} [\mu {\rm S/cm}].$$



**Abbildung 13.** Spezifische Widerstände bei 90 m NHN (Karte) im Vergleich zu elektrischen Leitfähigkeiten des Grundwassers an Messstellen (Punkte), bereitgestellt durch LMBV. Die Messstellenkennung befindet sich oberhalb, die mittlere Filterlage in m NHN unterhalb der Farbpunkte. Sechs Messstellen (Quadrate) werden in Abbildung 14 näher diskutiert. Die blauen Polygone kennzeichnen die LIN-Flächen.



Visuell erscheint die Übereinstimmung der umgerechneten elektrischen Leitfähigkeiten des Grundwassers mit den HEM-Modellwerten in 90 m NHN recht gut zu sein, zumindest wenn die zugehörigen Filtertiefen der Messstellen nicht deutlich tiefer oder höher liegen. Die markenteste Abweichung wird bei der Messstelle 3331 beobachtet, deren Filterstreckenmittelpunkt bei 72 m NHN sitzt (mit je einem Filter bei 64 bzw. 80 m). Die Messstellen außerhalb der LIN-Flächen weisen auf eine geringe Mineralisation des Grundwassers hin.

In **Abbildung 14** sind exemplarisch die Inversionsergebnisse mit 20 Schichten entlang von sechs Fluglinien gezeigt, die in der Nähe der in **Abbildung 13** gekennzeichneten Messstellen des LMBV liegen (Abstand  $\Delta$  < 120 m). Die Messstellen sind als Lithologieprofile dargestellt mit farbigen Balken auf Höhe der Filter. Die elektrischen Leitfähigkeiten des beprobten Grundwassers ( $\sigma_w$ ) sind wieder unter Verwendung von FF = 4 in spezifische Widerstände ( $\rho_b$ ) umgerechnet (**Tabelle 6**) und sowohl als Balkenfarbe als auch als Wert in **Abbildung 14** dargestellt worden. Die Lithologieprofile zeigen, dass die Filter in überwiegend sandigen Schichten gesetzt wurden. Oft passen die bei 90 m NHN abgegriffenen spezifischen Widerstände ( $\rho$ ) der HEM-Modelle recht gut zu den Wasserproben. Größere Unterschiede (> Faktor 2) treten bei den Messstellen 5506 und 3331 auf. In beiden Fällen existiert aber unter- bzw. oberhalb eine gutleitende Schicht, die auf erhöhte Mineralisation des Grundwassers hindeuten könnte.

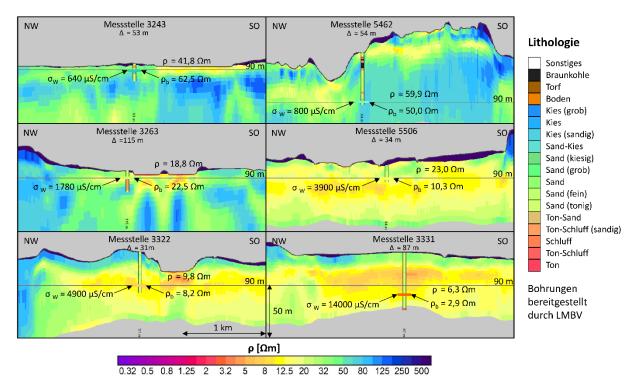


Abbildung 14. Vertikalsektionen (etwa 13-fach überhöht) der spezifischen Widerstände in der Umgebung von Grundwassermessstellen (LMBV). Die elektrische Leitfähigkeit des beprobten Grundwassers ( $\sigma_w$  umgerechnet in spezifische Widerstände  $\rho_b$ ) wird auf Höhe der mittleren Filterposition (Pfeilspitzen) an der Bohrsäule (Lithologieprofil) angezeigt. Oberhalb steht der zugehörige HEM-Wert ( $\rho$ ).  $\Delta$  gibt den Abstand der Messstelle zur jeweiligen Fluglinie an.

**Tabelle 6.** Elektrische Leitfähigkeiten an LMBV-Grundwassermessstellen (Zeitraum: 19.07.–05.10.2021, Messstellen aus Abbildung 14 fett, stärker abweichende Filterpositionen kursiv, Messstellen außerhalb des Messgebietes grau) im Vergleich zu spezifischen Widerständen ρ bei 90 m NHN.

Mess-	X	Υ	Höhe	Filter-O	Filter-U	σ <sub>W</sub>	ρ <sub>b</sub>	ρ
stelle	UTM33	UTM33	[m NHN]	[m NHN]	[m NHN]	[μS/cm]	[Ωm]	[Ωm]
3244	408541	5713823	106,6	89,7	87,7	970	41,2	41,6
5416	415452	5716436	131,5	94,5	92,5	860	46,5	
5438	417129	5714026	133,4	81,3	79,3	241	166,0	41,6
5462	416896	5714959	136,3	91,2	89,2	800	50,0	59,9
5435	414960	5714673	113,6	92,5	90,5	3700	10,8	13,5
3171	421150	5713476	138,4	108,3	104,3	760	52,6	26,9
3263	408817	5708747	97,0	90,5	88,5	1780	22,5	18,8
5415	411662	5708975	110,1	90,2	88,2	2600	15,4	16,0
3261	411046	5708197	103,3	89,3	87,3	2380	16,8	19,2
3084	412857	5708433	110,7	94,1	92,1	1060	37,7	27,8
5506	412690	5709263	101,4	89,4	87,4	3900	10,3	23,0
<i>3317</i>	410132	5711115	108,6	98,4	96,4	2050	19,5	23,0
3318	410638	5710867	109,1	96,9	94,9	2130	18,8	31,0
3319	410935	5710643	110,9	96,2	94,2	1270	31,5	24,5
3246	411677	5710796	113,7	84,4	82,4	2910	13,7	17,6
3322	412659	5712930	121,0	89,8	87,8	4900	8,2	9,8
5436	415597	5712629	118,6	93,5	91,5	4300	9,3	11,7
3327	414757	5711834	114,1	79,3	66,3	3000	13,3	9,3
3249	414595	5709969	118,4	72,4	70,4	3600	11,1	14,9
3331	415511	5709795	120,1	80,9	62,9	14000	2,9	6,3
3265	418061	5711706	129,0	95,0	93,0	2650	15,1	20,5
3142	420131	5711427	141,7	81,5	77,5	1830	21,9	16,7
3170	420965	5710926	152,2	93,8	89,8	2970	13,5	15,0
3169	705388	5402995	123,0	108,4	106,4	1930	20,7	
3889	405339	5705494	102,7	85,8	83,8	2500	16,0	16,1
3243	407545	5707330	95,5	87,8	85,8	640	62,5	40,8
3264	410458	5704729	94,0	87,0	85,0	1040	38,5	25,8
5419	410526	5708046	100,7	89,8	87,8	570	70,2	17,8
3260	412565	5707253	110,9	87,4	85,4	850	47,1	23,9
3248	414064	5705140	100,3	94,1	92,1	440	90,9	
3266	413712	5704515	95,6	89,6	87,6	1720	23,3	

28



Die Annahme eines Formationsfaktors von FF = 4 wird auch durch die Analyse an 27 Messstellen bestätigt. Ein Vergleich von allen σ<sub>w</sub>- bzw. ρ<sub>w</sub>- und ρ-Werten (**Abbildung 15a**) führt auf einen mittleren Formationsfaktor von FF = 4,2 ± 1,9. Zu beachten ist aber, dass nicht alle Filter bei 90 m NHN gesetzt wurden und einige Bohrungen breitere Filterstrecken als die üblichen 2 m aufwiesen (Tabelle 6). Die Beschränkung auf 22 Messstellen (Abbildung 15b), deren mittlere Filterstrecke bei 90 ± 10 m NHN liegen, ergibt ein ähnliches Ergebnis, aber mit etwas reduzierter Streuung: FF = 4,1 ± 1,8. Die Begründung für die recht geringe Verbesserung liefert Abbildung 15c. Dort wurden die abgeleiteten Formationsfaktoren gegenüber dem Abstand der mittleren Filtertiefe von 90 m NHN aufgetragen. Es ist keine nennenswerte Abhängigkeit vom Abstand zu beobachten (Steigung nahe 0, Schnittpunkt mit der FF-Achse bei 4 und R<sup>2</sup> = 0,003), da sowohl bei großen Sand) erhöhten Feinkornanteil (Ton/Schluff/Braunkohle) vorkommen. Beispielweise existiert bei der Messstelle 5438 (schwarze Kreuze in Abbildung 15a und c) in 88-102 m NHN ein Bereich mit überwiegend Ton, Schluff und Braunkohle. Ähnliches trifft bei der Messstelle 5419 (schwarzes Kreuze in Abbildung 15b) zu, da dort Schluffschichten jeweils 1 m ober- und unterhalb der Filterstrecke existieren. Eine aus den HEM-Ergebnissen abgeleitete Leitfähigkeit des Grundwassers würde hier deutlich überschätzt werden. Der umgekehrte Fall tritt am stärksten bei den Messstellen 5506 und 3331 auf (Formationsfaktoren etwa FF = 9, Abbildung 15c), die auch in Abbildung 14 dargestellt sind. Eine schlüssige Erklärung gibt es derzeit nicht.

Des Weiteren ist auffällig, dass bei den sieben Messstellen, die in ebenfalls überwiegend sandigen Kippenbereichen liegen (Kreise in **Abbildung 15c**), der Formationsfaktor etwas erhöht ist:  $FF = 4.5 \pm 1.0$ . Dieser ändert sich kaum ( $FF = 4.5 \pm 0.9$ ), wenn nur die Messstellen mit Filtern bei  $90 \pm 10$  m NHN berücksichtigt werden. Ob dies ein Hinweis auf eine – gegenüber natürlichen abgelagerten sandigen Sedimenten – veränderte Porosität sein kann, lässt sich aufgrund der geringen Anzahl von Messstellen nicht sagen, zumal bei zwei Messstellen niedrige Werte (FF < 4) auftreten. Jedoch könnte zumindest an einer dieser Messstellen (3263) eine Beeinflussung durch eine direkt unter dem Filter beginnende, etwa 12 m mächtige Schluffschicht bestehen, und die Bohrung der anderen Messstelle endet bereits bei etwa 104 m NHN.

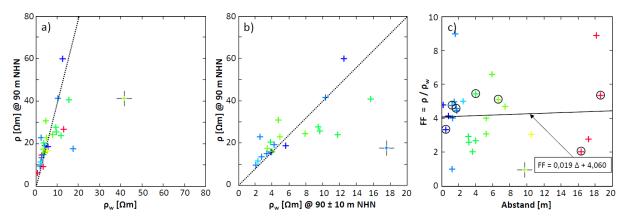


Abbildung 15. Spezifische Widerstände ( $\rho$ ) bei 90 m NHN der HEM-Modelle im Vergleich zu spezifischen Widerständen von Grundwasser ( $\rho_w$ ), abgeleitet aus elektrischen Leitfähigkeiten des Grundwassers an LMBV-Messstellen. a) Werte an allen Messstellen, b) Werte an Messstellen mit Filterbereichen bei 90  $\pm$  10 m NHN, c): Formationsfaktor vs. Abstand der mittleren Filtertiefe zu 90 m NHN. Die Farben kennzeichnen die Abstände der mittleren Filtertiefe zu 90 m NHN, Farbzuordnung siehe c). Die gepunkteten Linien in a) und b) zeigen den Erwartungswert (FF = 4) an.

Bei der Verwendung der 1D-Inversionsmodelle mit 20 Schichten muss berücksichtigt werden, dass sie horizontale Wechsellagerungen geglättet widergeben. Um diesen Glättungseffekt zu betrachten, wurden die spezifischen Widerstände bei 90 m NHN aus den 1D-Inversionsmodellen mit sechs Schichten abgeleitet, die deutlichere Schichtgrenzen, aber auch mehr Sprünge zeigen (**Abbildung 4**), und die Analyse wiederholt. Dies führte zu ähnlichen Formationsfaktoren: Alle 27 Messstellen im Messgebiet: FF = 4,1 ± 1,7 sowie an



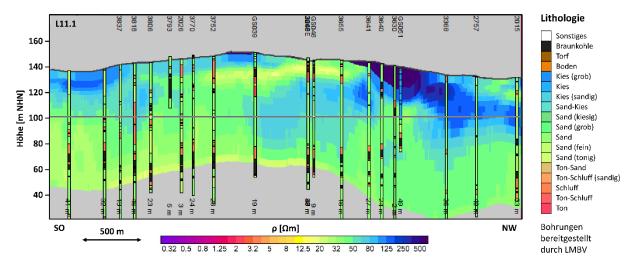
22 Messstellen mit Filtern bei 90  $\pm$ 10 m NHN: FF = 4,1  $\pm$  1,5. Lediglich bei Betrachtung der 7 Messstellen in den Kippen tritt ein höherer Formationsfaktor auf: FF = 4,9  $\pm$  0,8.

Die Existenz von Grundwasser im Sediment verringert den spezifischen Widerstand einer HEM-Erkundung in der Regel deutlich. Selbst ein gering mineralisiertes Grundwasser mit Trinkwasserqualität mit beispielsweise  $\sigma_w$  = 200  $\mu$ S/cm in sandiger Umgebung würde zu spezifischen Widerständen von  $\rho_b$  = 200  $\Omega$ m führen. Bei stärker mineralisiertem Grundwasser sowie tonigen Sedimenten liegt dieser Wert noch niedriger. Somit wären höhere spezifische Widerstände ein Hinweis auf eher trockene Sedimente. In den HEM-Vertikalsektionen (**Abbildung 4**, **Abbildung 14**, **Anhang V**) zeigt sich meist eine Deckschicht mit hohen spezifischen Widerständen ( $\rho$  >> 200  $\Omega$ m). Daher könnte die Unterkannte dieser Schicht den Grundwasserspiegel anzeigen. Da bisher jedoch geeignete Vergleichswerte nicht zur Verfügung standen, konnte die großräumige Ableitung des Grundwasserspiegels nicht überprüft werden. Insbesondere bei Vorhandensein von tonigen Sedimenten oberhalb des eigentlichen Grundwasserspiegels können auch niedrigere spezifische Widerständen ( $\rho$  << 200  $\Omega$ m) auftreten, z. B. wenn Sickerwasser in tonhaltigen Sedimenten gespeichert wird, was zu einer Fehlinterpretation der HEM-Ergebnisse führen könnte.

#### 6.1.4 Vergleich mit Lithologie

Die in den **Abbildungen 11, 13–14** diskutierten Signaturen bezogen sich auf den Einfluss des Grund- und Oberflächenwassers auf die spezifischen Widerstände. Nun wird der Einfluss der Lithologie anhand einiger Beispiele (**Abbildungen 16–18**) erläutert. Die in **Abbildung 13** gezeigten Messstellen weisen außerhalb des LIN-Flächen auf schwach mineralisiertes Grundwasser hin. Daher werden drei Ausschnitte (etwa 4 km) herangezogen, die überwiegend außerhalb des LIN-Flächen liegen, um den Einfluss der natürlichen Lithologie auf die HEM-Modelle beurteilen zu können.

Die Vertikalsektion in **Abbildung 16** (L11.1) weist oberflächennah bei etwa 130 m NHN eine gutleitende Schicht (gelb-grün) auf, die nordwestlich und südöstlich davon durch einen Bereich mit hohen spezifischen Widerständen (blau) abgegrenzt ist. In den Bohrungen ist dort Ton/Schluff/Braunkohle anzutreffen, während angrenzend vermehrt Sande und in einer Bohrung (G5051) sogar 40 m Kies vorkommen. Diese deutliche Erhöhung des spezifischen Widerstandes im NW ist auch auf den benachbarten Fluglinien zu beobachten und erscheint als schmale, langgezogene W-O-verlaufende Struktur in den Halbraumwiderstandskarten (im NO bei 128 und 41 kHz, **Abbildungen 10–11**).

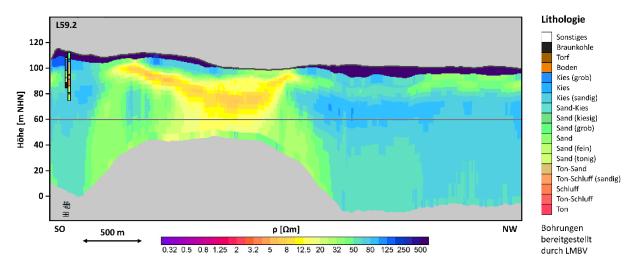


**Abbildung 16.** Ausschnitt einer Vertikalsektion (etwa 11-fach überhöht) im nördlichen Bereich der Fluglinie L11.1 im Vergleich zu Bohrungen des LMBV. Die Bohrkennungen stehen am oberen und die jeweiligen Abstände zur Fluglinie am unteren Bildrand.



Im unteren Bereich der Vertikalsektion liefern die Bohrungen wieder Hinweise auf Ton/Schluff/Braun-kohle-Schichten, was wieder mit – im Vergleich zu den sandigen Bereichen – verringerten spezifischen Widerständen korreliert.

Das nächste Beispiel (**Abbildung 17**) zeigt eine deutliche, wannenförmige Erniedrigung der spezifischen Widerstände entlang der Fluglinie L59.2. Leider liegen für diesen Bereich keine Bohrungen vor. Die Erkenntnisse aus der vorhergehenden Abbildung und vor allem aus anderen Messgebieten (z. B. Siemon et al., 2020b) lässt aber schlussfolgern, dass die gelb-orange Schicht ( $\rho$  = 5–20  $\Omega$ m) von tonig-schluffigen Sedimenten verursacht wird, wie sie beispielsweise auch in der Cuxhaven-Bremerhavener-Rinne vorkommen (Steinmetz et al., 2015). Diese Annahme wird unterstützt durch die Geologische Übersichtskarte 1:100.000 von Brandenburg (LBGR, 2022). Dort werden in diesem Bereich Ablagerungen (Feinsand, Schluff, Ton) in Gletscherstauseen ausgewiesen. Auch auf den benachbarten Fluglinien wird diese Struktur, die nördlich der Landstraße (L22) bei Staupitz in W-O-Richtung verläuft, in unterschiedlicher Ausprägung angetroffen.

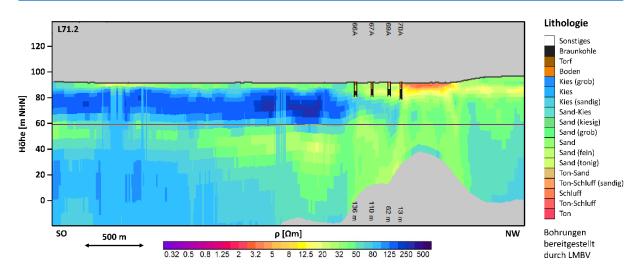


**Abbildung 17.** Ausschnitt einer Vertikalsektion (etwa 11-fach überhöht) im mittleren Bereich der Fluglinie L59.2 im Vergleich zu Bohrungen des LMBV. Die jeweiligen Abstände zur Fluglinie stehen am unteren Bildrand.

Die Fluglinie (L71.2) im letzte Beispiel (**Abbildung 18**) überquert einen Moorbereich, der südöstlich der Bergbauregion um den Seewaldsee liegt. Auch hier gibt es nur wenige Bohrungen, die zudem in der Nähe des Seewaldsees liegen. Diese weisen oberflächennah (wenige Meter) Torf über Schluff aus. In der Vertikalsektion ist südöstlich des Seewaldsees eine etwa 4 m mächtige Schicht mit erniedrigten Widerständen zu beobachten. Signaturen dieser Art sind bereits in anderen Moorgebieten beobachtet worden (Siemon et al., 2020a), sodass angenommen werden kann, die niedrigen spezifischen Widerstände durch Torf (und ggf. Schluff) hervorgerufen werden.

Diese Beispiele veranschaulichen, dass eine Deutung von niedrigen spezifischen Widerständen durch Ton/Schluff ggf. in Kombination mit Braunkohle oder Torf möglich ist. Sandig-kiesige Bereiche weisen demgegenüber eher hohe spezifische Widerstände auf, sofern die die Mineralisation des Grundwassers niedrig ist. Jedoch erscheinen die gutleitenden Schichten (Ton/Schluff/Braunkohle) weniger prägnant, dafür meist mächtiger oder sie sind sogar unsichtbar in den HEM-Modellen, wenn eine abschirmende, gutleitende Schicht nahe der Erdoberfläche existiert.





**Abbildung 18.** Ausschnitt einer Vertikalsektion (etwa 11-fach überhöht) im südlichen Bereich der Fluglinie L71.2 im Vergleich zu Bohrungen des LMBV. Die Bohrkennungen stehen am oberen und die jeweiligen Abstände zur Fluglinie am unteren Bildrand.

#### 6.2 Magnetik

Der Einsatz der Magnetik im Untersuchungsgebiet hatte hauptsächlich zwei Ziele. Zum einen lassen sich erfahrungsgemäß in einem, wie hier vorliegenden, eiszeitlich überprägten Gebiet häufig Rinnenstrukturen im Untergrund über ihre magnetische Signatur identifizieren. Ursache für diese Signaturen ist vermutlich das Auftreten von Tonlagen, ggf. in Verbindung mit Schwermineralablagerungen im Bereich der Rinnen (Siemon et al., 2020b), Zum anderen sollte überprüft werden, ob mit Hilfe der Aeromagnetik in Bergbaufolgelandschaften anthropogene Strukturen und ggf. Altlasten identifiziert werden können. Bei solchen Hinterlassenschaften kann es sich um eisenhaltiges Material an und unter der Oberfläche handeln, welches magnetische Anomalien erzeugt. Die Ergebnisse der Magnetik befinden sich in Form von Karten der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes (Anomalien- bzw. ΔT-Karten) im **Anhang IV.4**. Im Folgenden werden einige Erklärungen und Interpretationshilfen zu diesen Anomalienkarten gegeben.

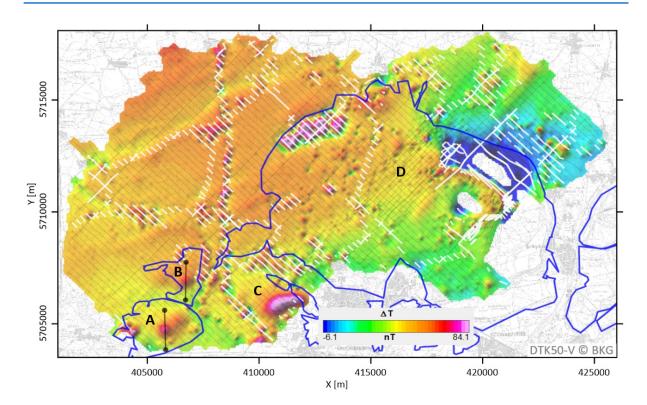
#### 6.2.1 Anthropogene Strukturen

**Abbildung 19** zeigt eine ΔT-Karte nach dem Microlevelling und der Reduktion auf den Pol. In der Karte sind solche Fluglinienabschnitte markiert, die in Bereichen anthropogener Störquellen am Boden liegen (weiße Markierungen). Hierzu zählen Straßen, Siedlungen, Windparks sowie eine Nord-Süd-verlaufende Trasse einer Gasleitung. Außerdem sind die LIN-Flächen eingetragen.

Man erkennt, dass die meisten der deutlich sichtbaren magnetischen Anomalien in die Bereiche der anthropogenen Störquellen fallen. Ausnahmen bilden eine stark positive Anomalie im Süden (C) westlich von Lauchhammer-Mitte sowie einige mittelgroße Anomalien (A, B) im Südwesten und zahlreiche kleinere bis punktuelle Anomalien (D) im zentralen Teil des Gebietes. Während A, B und D ausschließlich in Bereichen der LIN liegen und daher Artefakten des ehemaligen Bergbaus zugeschrieben werden könnten, trifft dies für C nicht zu. Die Ursache für Anomalie C bleibt daher unklar.

**32** 





**Abbildung 19.** ΔT-Karte (RTP) des Messgebietes. Weiß: Fluglinienabschnitte über bekannten anthropogenen Strukturen, schwarz: Fluglinien, blau: LIN-Flächen, A–D: Anomalien.

Für die Anomalien A und B wurde eine sehr einfache magnetische Quelltiefenabschätzung nach einem Lehrbuchverfahren (Reeves, 2005) durchgeführt (**Abbildung 20**). Dazu wird eine Tangente an die steilere Flanke der Anomalie angelegt und die Breite des Überlappungsbereiches multipliziert mit einem Geometriefaktor im Wertebereich zwischen 1,2 und 1,6 (hier 1,4) als Maß für die Quelltiefe angenommen. Für die hier betrachteten Anomalien ergeben sich Werte zwischen 250 und 300 m, was nach Abzug der mittleren Sensorhöhe über Grund von 60 m einer Tiefenlage von 190 bis 240 m unter Grund entspricht. Aufgrund dieser großen Tiefen erscheinen anthropogene Ursachen unwahrscheinlich und es ist von geogenen Quellen auszugehen.

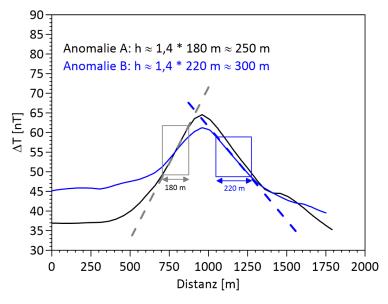
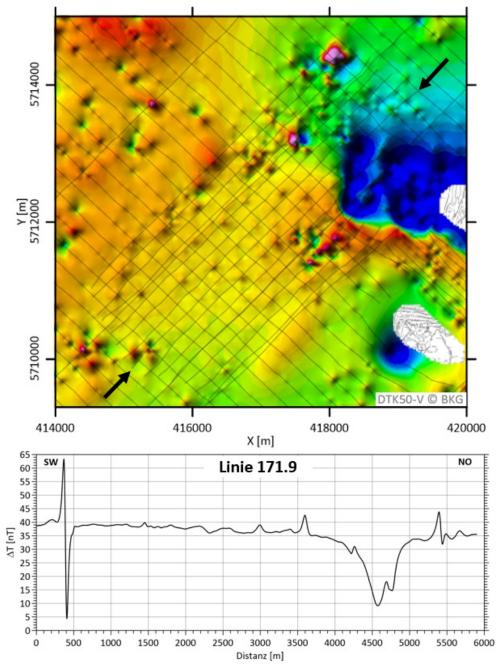


Abbildung 20. Anomalien (A, B) aus Abbildung 19, aufgetragen von Nord nach Süd mit Tiefenabschätzung (h).



Das magnetisch unruhige Gebiet bei D ist in **Abbildung 21** zusammen mit einer Profildarstellung entlang der Fluglinie T171.9 gezeigt. Es wird deutlich, dass die erkennbaren Anomalien eine Breite von mindestens einiger 10er m aufweisen. Diese Beobachtung deckt sich mit der Tatsache, dass die Aufzeichnungen des Magnetiksensors intern mit einem Tiefpass der Periode 0,5 s gefiltert werden, was einer Flugstrecke von etwa 20 m entspricht. Die Identifikation von Anomalien kürzerer Wellenlängen ist damit ausgeschlossen. Ebenso ist bei der Abschätzung einer minimal zu detektierenden Anomalie der Fluglinienabstand sowie die Flughöhe zu beachten. Beide Größen schränken die Detektionsfähigkeit für kleine und kurze Anomalien ein.



**Abbildung 21.** ΔT-Karte (RTP) des Detailgebiets bei Anomalienbereich D und magnetisches Profil entlang der Fluglinie T171.9 (Pfeile).

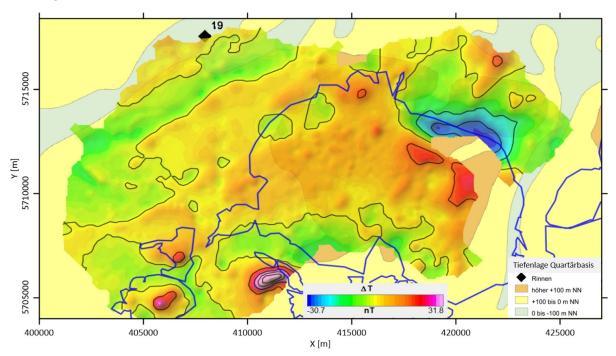


#### 6.2.2 Geogene Strukturen

Um einen Eindruck vom geogen bedingten Anomalienmuster zu erhalten, wurde versucht, einen bereinigten Datensatz zu erzeugen. Dazu wurden alle bekannten anthropogen beeinflussten Abschnitte (in **Abbildung 19** weiß markiert, erweitert um einige manuell markierten Bereiche) aus den Daten entfernt. Das daraus resultierende Gitter wurde anschließend mit einem Bandpassfilter (Wellenlänge 0,5 bis 20 km) bearbeitet.

Man erkennt in **Abbildung 22** wieder die Anomalien A, B und C sowie einen wahrscheinlich immer noch anthropogen beeinflussten Bereich im Gebiet des Windparks im Osten. Für die größte positive Anomalie C westlich von Lauchhammer gibt es bisher keine nachweisliche Erklärung. Lediglich für den Nordosten der Anomalie, aber noch außerhalb der LIN-Flächen, weist eine Grundkarte (OpenStreetMap) im LMBV-Geoportal auf (ehemaligen) Bergbau hin. Da jedoch der überwiegende Teil der Anomalie in einem Waldgebiet ohne Hinweise auf anthropogene Ursachen liegt und auch in den HEM-Daten nichts darauf hindeutet, ist eine geogene Ursache für diese Anomalie anzunehmen. Ob ein Zusammenhang mit oberflächennahen Raseneisenerzvorkommen in der Umgebung von Lauchhammer (Sitschick et al., 2005) besteht, ist noch zu klären. Größe und Form der Anomalie C (wie auch bei den Anomalien A und B) deuten aber auf tiefer liegende Ursachen (z. B. Erzvorkommen) hin.

Darüber hinaus wird eine WSW-ONO-streichende Struktur im nordwestlichen Teil des Gebietes sichtbar. Ein Vergleich mit der Karte der Tiefenlage der Quartärbasisfläche (LBGR, 2022) zeigt, dass diese Struktur parallel zu, aber nicht übereinstimmend mit der Rinne "19" verläuft. Da das Messgebiet in Richtung Nordwesten nicht die gesamte Breite der Rinne überstreicht, bleibt eine Interpretation der sichtbaren magnetischen Signatur unklar.



**Abbildung 22.** Bereinigte und Bandpass-gefilterte ΔT-Karte (RTP) mit Isolinien im Abstand 10 nT. Hintergrund und Legende: Tiefenlage der Quartärbasisfläche (LBGR, 2022). Blaue Polygone: LIN-Flächen.

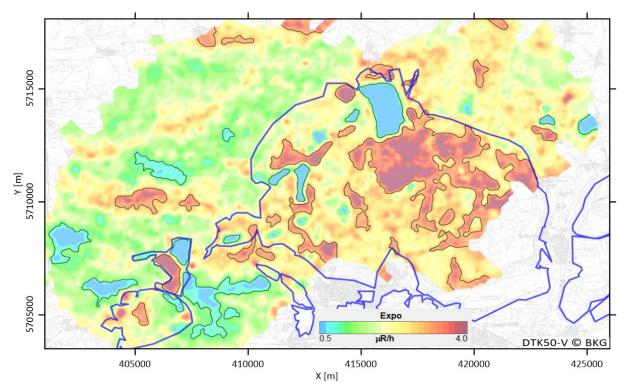


#### 6.3 Radiometrie

Mit der Radiometrie lassen sich Unterschiede im Hinblick auf Sand- und Tongehalte in der obersten Bodenschicht kartieren. Die Tonfraktion enthält meistens Minerale mit den natürlich vorkommenden Radionukliden Kalium, Uran und Thorium. Dagegen besteht die Sandfraktion meistens vorwiegend aus dem nicht strahlenden Mineral Quarz. Weiterhin lassen sich mit der Radiometrie Feuchtbereiche und nasse Moorgebiete abgrenzen, da sie sich wegen des dämpfenden Einflusses des Wassers durch stark erniedrigte Strahlungswerte auszeichnen (Siemon et al., 2020a). Die Ergebnisse der Radiometrie befinden sich in Form verschiedener radiometrischer Karten im **Anhang IV.5**.

Abbildung 23 zeigt exemplarisch eine Karte der Ionendosisleistung in der Einheit Mikroröntgen pro Stunde ( $\mu$ R/h). Die Werte sind mit meistens maximal 4,5  $\mu$ R/h allgemein relativ gering und würden für eine tonarme Lithologie des Bodens sprechen. Allerdings ist ein großer Anteil der Gesamtfläche von Wald und Feuchtgebieten bedeckt, was ebenfalls eine Verringerung der Strahlungswerte verursacht. Dies gilt für die meisten grün gefärbten Kartenbereiche. Die in der Karte eingezeichneten 1  $\mu$ R/h-Konturlinien umschließen offene Wasserflächen und Feuchtgebiete. Die 3  $\mu$ R/h-Konturlinien hingegen liegen fast ausschließlich in anthropogen überprägten Gebieten des ehemaligen Bergbaus (LIN, blaue Polygone). Welche Strukturen an der Erdoberfläche hier genau die erhöhten Strahlungswerte bedingen, kann aus der Ferne nur schwer beurteilt werden. Möglicherweise handelt es sich bei den Bereichen mit Strahlungswerten > 3  $\mu$ R/h um freiliegendes Material ohne Bodenbildung. Genauere Informationen hierzu müssten vor Ort bzw. durch Ortskundige geklärt werden.

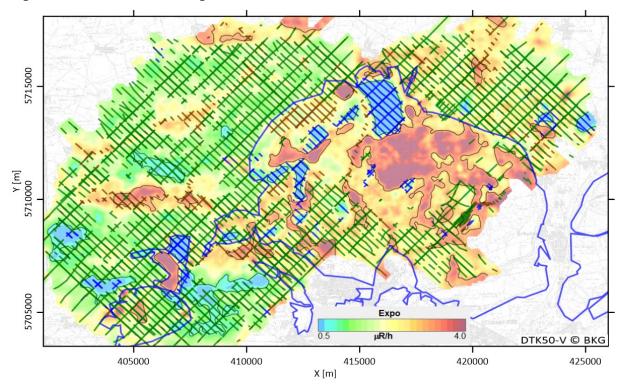
In den Karten der Radioelementkonzentrationen (**Anhang IV.5**) zeigt sich, dass in den stärker strahlenden Gebieten die Konzentrationen aller drei Radioelemente in etwa gleichförmig im Vergleich zur Umgebung ansteigen; es ist kein isoliertes Ansteigen eines oder zweier Elemente zu beobachten. Dies spricht dafür, dass es sich in den umliegenden Gebieten um das gleiche Material handelt, dessen Strahlung jedoch durch Biomasse und/oder Feuchtigkeit gedämpft wird. Die mittleren absoluten Konzentrationen von etwa 0,75 % (K), 1 ppm (eU) und 4 ppm (eTh) deuten auf eine von Sand dominierte Lithologie des Materials hin.



**Abbildung 23.** Karte der Ionendosisleistung (*exposure rate*). Konturlinien umschließen Bereiche mit Werten kleiner 1  $\mu$ R/h (blau) bzw. größer 3  $\mu$ R/h (rot). Blaue Polygone: LIN-Flächen.

**36** 

Die eingeschränkte Interpretationsfähigkeit der radiometrischen Messungen bezüglich des oberflächennahen Bodens im gesamten Messgebiet ist in **Abbildung 24** gezeigt. Hier sind in der Karte der Ionendosisleistung sämtliche Profilabschnitte markiert, die entweder durch Wald (grün), Infrastruktur (braun) oder Wasserflächen (blau) beeinflusst sind. Diese Flächen machen etwa 60 % der Gesamtfläche aus. Die verbleibenden 40 % liegen zu einem Großteil im durch Bergbau überprägten Bereich. Neben den oben genannten Abgrenzungen von Feuchtgebieten und sichtbaren Strukturen der Bergbau-beeinflussten Bereichen liefern die Ergebnisse der Radiometrie wenig weitere bodenkundliche Informationen des Gebietes.



**Abbildung 24.** Karte der Ionendosisleistung mit Markierung der Fluglinienabschnitte mit Waldgebieten (grün), Wasserflächen (blau) und Infrastruktur (braun). Blaue Polygone: LIN-Flächen.



#### 7 Fazit

Mit dem Hubschraubermesssystem der BGR konnten in dem etwa 250 km² großen Messgebiet "Finsterwalde" aerogeophysikalische Daten entlang von 176 Fluglinien mit einer Gesamtlänge von 1736 km erhoben werden. Dies lieferte einen Überblick über großräumige Strukturen im Messgebiet.

Dank des erstmaligen Einsatzes eines Positionierungssystems, das eine Nachbearbeitung der GPS-Daten zuließ und mit dem auch die räumliche Lage der Flugsonde erfasst wurde, war eine Ableitung der aktuellen Geländehöhe aus den Flugdaten in dem von Bergbau stark beeinflussten Gebiet sowie eine Erfassung der Wasserstände in den Bergbaufolgeseen zum Zeitpunkt der Befliegung möglich.

Mit den aus den HEM-Daten abgeleiteten spezifischen Widerständen, deren Verteilung sowohl lateral (Karten) als auch vertikal (Schnitte) visualisiert wurde, konnten Hinweise sowohl auf die Mineralisation des Oberflächen- und Grundwassers als auch über die Verbreitung von dominierenden Lithologien (sandige vs. tonige Sedimente) geliefert werden. Hierzu ist aber anzumerken, dass aufgrund des relative großen Einflussbereiches des Untergrundes auf eine HEM-Messung scharfe Kontraste bei der herkömmlichen Auswertung gemittelt erscheinen. In vertikaler Richtung, d. h. bei den 1D-Inversionsmodellen, ist ferner zu berücksichtigen, dass elektrisch leitfähige Strukturen nahe der Oberfläche eine deutliche stärkere Signatur hervorrufen als ähnliche Strukturen in größerer Tiefe. Somit erscheinen tiefliegende, elektrisch leitfähige Schichten nicht nur schwächer in ihrer Signatur, sie können zudem auch durch oberflächennahe Schichten mit geringen spezifischen Widerständen abgeschirmt sein (z. B. Tonschichten, See- oder Grundwasser mit hoher Mineralisation).

Aus den HMG-Daten konnten einerseits die großräumigen, geogen verursachten Anomalien, die eher auf tiefliegende Quellen hinweisen, und andererseits die lokalen, von Menschen verursachten Anomalien aufgezeigt und als Karten dargestellt werden. Eine gesicherte Detektion von kleinen Objekten (mit weniger als etwa 20 m Durchmesser), z. B. Hinterlassenschaften aus dem Bergbau, war jedoch aufgrund der hohen Fluggeschwindigkeit und -höhe des eingesetzten Hubschraubermesssystems sowie des recht großen Linienabstandes nicht möglich. Für diese Aufgabe sind Messungen mit höherer Auflösung in der Nähe des Bodens erforderlich (z. B. mit Drohnen).

Die aus den HRD-Daten gewonnenen Karten weisen generell auf eine eher geringe Gammastrahlung am Boden hin. Die größten Strahlungswerte treten meist im Bereich der Bergbaubereiche auf. Jedoch zeigen die erhöhten Werte dort eine ähnliche Charakteristik wie in den schwächer strahlenden Bereichen in der Umgebung, d. h. die Verhältnisse der einzelnen Radioelemente sind ähnlich. Da im Messgebiet große Waldgebiete vorkommen, ist ein Großteil der radiometrischen Messungen davon beeinflusst (abgeschwächt), was ohne Kenntnis der Absorptionscharakteristika in den jeweiligen Waldgebieten eine verlässliche Angabe von Strahlungswerten am Boden verhinderte. Bereiche mit sehr niedriger Strahlung sind aber klar den Wasser- und Moorflächen zuzuordnen.



### 8 Archivierung

Alle Daten werden im Fachbereich "B2.1 – Geophysikalische Erkundung – Technische Mineralogie" archiviert. Darüber hinaus sind die Ergebnisdaten und Modelle als ASCII-codierte Profildaten im Geosoft-xyz-Format und die Endergebnisse (Bericht, Karten und Vertikalsektionen) als PDF-Dokumente im Originalmaßstab auf einer DVD (**Tabelle 7, Anhang VI**) als Anlage zu diesem Gebietsbericht abgelegt. Für die Darstellung in ArcGIS-Projekten wurden die auf den Karten dargestellten Parameter als Grids im ArcGIS-GRID-FLOAT-Format (\*.flt) beigefügt. Die Ergebnisse der Befliegungen werden nach Projektende in die BGR-Geodateninfrastruktur eingestellt (abrufbar über das <u>Geoportal</u> der BGR) und dem zuständigen Landesamt (LBGR) übergeben.

Tabelle 7. Inhalt der DVD

V	/erzeichnis	Inhaltsbeschreibung
\Berichte		Allgemeiner Technischer Bericht (PDF) Befliegungsberichte (PDF) Gebietsbericht (PDF)
	\НЕМ	Datei (ASCII) aller gemessenen Daten (HEM191_DAT.xyz) Datei (ASCII) aller abgeleiteten Parameter (HEM191_APP.xyz) Dateien (ASCII) der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM191_INV_L6.xyz, HEM191_INV_L20.xyz) Datei (ASCII) der Qualitätskontrollparameter (HEM191_QCP.xyz)
	\HMG	Datei (ASCII) der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Basisstationsdaten etc. (HMG191.xyz)
\Daten	\HRD	Datei (ASCII) der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Totalstrahlung und die Ionendosisleistung etc. (HRD191.xyz)
	\Fluglinien	Karten (PDF) des Flugweges mit Topografie
	\DEM	Karte (PDF) der Geländehöhen
	\НЕМ	Karten (PDF) der Halbraumwiderstände und der Schwerpunktstiefen für alle Messfrequenzen Karten (PDF) der spezifischen Widerstände bei ausgewählten Tiefen: 45, 55, 65, 75, 85, 90, 95, 105, 115 und 125 m NHN (entnommen aus den 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten)
	\HMG	Karten (PDF) der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes mit und ohne anthropogenen Effekten
\Karten	\HRD	Karten (PDF) der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Ionendosisleistung und die Gesamtstrahlung
∖Kaı	\ArcGIS	Zugehörige Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (flt)
\VRS \VRS	\L6 \L20	Vertikalschnitte (PDF) des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnissen mit 6- bzw. 20 Schichten für jede Fluglinie



### 9 Literatur

- BKG, 2012. Digitales Geländemodel (DGM25). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt a. M., Germany, <a href="https://www.geodatenzentrum.de">https://www.geodatenzentrum.de</a> (Abgerufen am 01.02.2012).
- Goes, B. J. M., Oude Essink, G. H. P., Vernes, R. W. & Sergi, F., 2009. Estimating the depth of fresh and brackish groundwater in a predominantly saline region using geophysical and hydrological methods, Zeeland, the Netherlands. Near Surface Geophysics, 7, 401–412, doi: 10.3997/1873-0604.2009048.
- Konno, K. & Ohmachi, T., 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bulletin of the Seismological Society of America 88, 228–241.
- LBGR, 2022. Geologische Karten des Landes Brandenburg. Geoportal des Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, <a href="https://geo.brandenburg.de/?page=Geologische-Karten">https://geo.brandenburg.de/?page=Geologische-Karten</a>.
- LMBV, 2022. Landinanspruchnahme (LIN). Geoportal der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, <a href="https://www.lmbv.de/service/geoportal/">https://www.lmbv.de/service/geoportal/</a>.
- Reeves, C. (2005): Aeromagnetic surveys principles, practice & interpretation. The Netherlands (Earthworks).
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M. & Frank, S., 2020a. Airborne electromagnetic and radiometric peat thickness mapping of a bog in Northwest Germany (Ahlen-Falkenberger Moor). Remote Sensing, 12(2), 203, doi: 10.3390/rs12020203.
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M. Steuer, A., Deus, N. & Wiederhold, H., 2020b. Airborne electromagnetic, magnetic, and radiometric surveys at the German North Sea coast applied to groundwater and soil investigations. Remote Sensing, 12(10), 1629, doi: <a href="mailto:10.3390/rs12101629">10.3390/rs12101629</a>.
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Steuer, A., Petersen, H., Pielawa, J., Balzer, H.-U. & Plath, C., 2019. Datenverarbeitung in der Hubschraubergeophysik, Teil 1: Grundlagen: Mess- und Auswertetechniken. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0136007, Hannover.
- Siemon, B., Petersen, H. & Pielawa, J., 2021b. Befliegungsbericht D-AERO-Finsterwalde, HEM/HMG/HRD-Befliegung, 191 Finsterwalde, Juli 2021. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0136743, Hannover.
- Siemon, B., Plath, C. & Pielawa, J., 2021a. Befliegungsbericht D-AERO-Finsterwalde, HRD-Befliegung, 191 Finsterwalde, Mai 2021. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0136687, Hannover.
- Steinmetz, D., Winsemann, J., Brandes, C., Siemon, B., Ullmann, A., Wiederhold, H. & Meyer, U., 2015. Towards an improved geological interpretation of airborne electromagnetic data: a case study from the Cuxhaven tunnel valley and its Neogene host sediments (northwest Germany). Netherlands Journal of Geosciences, 94 (2), 201–227, doi: <a href="https://doi.org/10.1017/njg.2014.39">10.1017/njg.2014.39</a>.
- Sitschick, H., Ludwig, F., Wetzel, E., Luckert, J. & Höding, T., 2005. Raseneisenerz auch in Brandenburg ein mineralischer Rohstoff mit bedeutender wirtschaftlicher Vergangenheit. Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge, 12(1/2), 119–128.
- Tolles, W. & Lawson, J., 1950. Magnetic Compensation of MAD Equipped Aircraft. Airborne Instruments Lab. Inc., Mineola, NY, USA.

40 Gebietsbericht

D-AERO-Finsterwalde, Befliegungen Mai/Juli 2021



### **Danksagung**

Der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) wird führ die Bereitstellung von Messstellendaten und Bohrdaten im Messgebiet Finsterwalde gedankt. Ein herzlicher Dank gebührt auch Olaf Cortés Arroyo (BGR/FEZB) für die Aufbereitung der zahlreichen Bohrdaten und der BGR-Hubschrauber-Crew (Hauke Petersen, Hans-Ulrich Balzer und Carsten Plath) sowie Martin Klenke und Bernhard Stooß (Piloten, Air Lloyd Aerotechnics GmbH) für die gute Durchführung der Befliegung.

### D-AERO-Finsterwalde, Befliegungen Mai/Juli 2021

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

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

Leiter der Abteilung "Grundwasser und Boden"

Leiter des Fachbereichs "Geophysikalische Erkundung -Technische Mineralogie"

Leiter des Arbeitsbereichs "Aerogeophysik und Luftfahrttechnischer Betrieb"

(Dr. B. Siemon)

42 Gebietsbericht





### Anhang I: Verzeichnisse

#### Anhang I.1: Abbildungsverzeichnis

- 1. Planmäßige Lage und Ausdehnung des Gesamtmessgebietes Finsterwalde bei Cottbus.
- 2. Geländehöhen abgeleitet aus den Flugsondendaten.
- 3. Differenzen aus Topo und DEM mit allen Fluglinien aus Finsterwalde-2.
- 4. Beispiel für Vertikalsektionen mit 6 und 20 Schichten entlang der Fluglinie T13.8.
- 5. Aufzeichnungen des Lagesensors und des Magnetiksensors auf Fluglinie L77.2.
- 6. Powerspektren mit Markierungen einiger signifikanten Schwingungsperioden.
- 7. Abhängigkeit des Roll-Faktors vom Yaw-Winkel.
- 8. Abhängigkeit des Heading-Errors vom Yaw-Winkel.
- 9. ΔT-Karte vor und nach Korrekturen bezüglich der Sensorlage.
- 10. Halbraumwiderstände bei allen Messfrequenzen.
- 11. Halbraumwiderstände bei der höchsten Messfrequenz im Vergleich zu elektrischen Leitfähigkeiten von Wasser an Messstellen in Seen.
- 12. Halbraumwiderstände der höchsten Messfrequenz im Vergleich mit spezifischen Widerständen von Seewasser.
- 13. Spezifische Widerstände bei 90 m NHN im Vergleich zu elektrischen Leitfähigkeiten des Grundwassers an Messstellen.
- 14. Vertikalsektionen der spezifischen Widerstände in der Umgebung von Grundwassermessstellen.
- 15. Spezifische Widerstände bei 90 m NHN der HEM-Modelle im Vergleich zu spezifischen Widerständen von Grundwasser.
- 16. Ausschnitt einer Vertikalsektion im nördlichen Bereich der Fluglinie L11.1 im Vergleich zu Bohrungen.
- 17. Ausschnitt einer Vertikalsektion im mittleren Bereich der Fluglinie L59.2 im Vergleich zu Bohrungen.
- 18. Ausschnitt einer Vertikalsektion im südlichen Bereich der Fluglinie L71.2 im Vergleich zu Bohrungen.
- 19. ΔT-Karte (RTP) des Messgebietes.
- 20. Anomalien aufgetragen von Nord nach Süd mit Tiefenabschätzung.
- 21. ΔT-Karte (RTP) des Detailgebiets bei Anomalienbereich D und magnetisches Profil entlang der Fluglinie T171.9.
- 22. Bereinigte und Bandpass-gefilterte ΔT-Karte (RTP).
- 23. Karte der Ionendosisleistung (exposure rate).
- 24. Karte der Ionendosisleistung mit Markierung der Fluglinienabschnitte mit Waldgebieten, Wasserflächen und Infrastruktur.

#### Anhang I.2: Tabellenverzeichnis

- 1. Rahmenparameter zur Befliegung Finsterwalde.
- 2. Befliegungsparameter für das Messgebiet Finsterwalde.
- 3. Kalibrierwerte für das HEM-System BKS36a ermittelt über der Jade-Fahrrinne am 20.09.2021.
- 4. Angepasste Kalibrierwerte plus Standardabweichung für das HEM-System BKS36a.
- 5. Elektrische Leitfähigkeiten an Messstellen in Seen im Vergleich zu HEM-Ergebnissen.
- 6. Elektrische Leitfähigkeiten an Grundwassermessstellen im Vergleich zu spezifischen Widerständen.
- 7. Inhalt der DVD.



#### Anhang I.3: Abkürzungsverzeichnis

1D, 2D, 3D Ein-, zwei, dreidimensional

ASCII Datenaustauschformat (American Standard Code for Information Interchange)

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

BKG Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

BKS Bezeichnung einer Flugsonde (plus Nummer), z. B. vom Typ RESOLVE

BMWK Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

CF1 Kennung der Basisstation am Boden

 $\Delta$  Abstand [in m]

44

ΔT Anomalien des erdmagnetischen Feldes [in nT, Nanotesla]

da Scheinbare Tiefe (der Halbraumoberkante) [in m]

D-AERO Oberbegriff für BGR-Projekte der Aerogeophysik in Deutschland
DEM, DGM Digitale Geländehöhenmodelle [in m NHN, Normalhöhennull]
D-HBGR Kennung des BGR-Hubschraubers vom Typ Sikorsky S-76B

DTK Deutsche Topografische Karte

E, Expo Ionendosisleistung (exposure rate) [in μR/h, Mikroröntgen pro Stunde]

EDCY Kennung des Verkehrslandeplatzes Welzow

EM Elektromagnetik

EPSG Code Schlüsselnummern für Koordinatenreferenzsysteme

eTh Äquivalentgehalt von Thorium am Boden [in ppm, parts per million]

ETRS89 Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 eU Äquivalentgehalt von Uran am Boden [in ppm]

f Frequenz [in Hz oder kHz]

FF Formationsfaktor

FEZB Forschungs- und Entwicklungszentrum Bergbaufolgen

FINA BGR/FEZB-Projekt "Finsterwalder Restlochkette – Interpretation Aerogeophysik"

GIS Geografisches Informations-System

GNSS, GPS Satellitennavigationssysteme, z. B. mit Empfängern von Novatel (PwrPak7-E1)

GpsProc BGR-eigenes Programm für die Bearbeitung von GNSS/GPS-Daten

HEM Hubschrauber-Elektromagnetik

HemView BGR-eigenes Programm (plus Versionsnummer) für die Bearbeitung von HEM-Daten

HeliDAS Hubschrauber-Datenerfassungs- und Steuerungssystem, z. B. SYS14

HMG Hubschrauber-Magnetik

HmgView BGR-eigenes Programm (plus Versionsnummer) für die Bearbeitung von HMG-Daten

HSP Halbraumparameter für HEM HRD Hubschrauber-Radiometrie

HrdView BGR-eigenes Programm (plus Versionsnummer) für die Bearbeitung von HRD-Daten ICA Kalibrierfaktoren (Internal Calibration Amplitude) für HEM-Messsysteme [in ppm/mV]

I, Q Amplitude und Phase der HEM-Daten [in ppm]

K Gehalt von Uran am Boden [in %]

LBGR Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg

LMBV Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

L Messprofil (plus Nummer) von Nordwesten nach Südosten (NW-SO) oder umgekehrt

LIN Landinanspruchnahme (durch Bergbau ehemalig beanspruchten Flächen)

MESZ Mitteleuropäische Standardzeit

NASVD Unterdrückung von Datenrauschen in Gammaspektren

(Noise-Adjusted Singular Value Decomposition)

NL Nicht-linear

45



#### D-AERO-Finsterwalde, Befliegungen Mai/Juli 2021

PosView BGR-eigenes Programm (plus Versionsnummer) für die Bearbeitung von Positionsdaten

PPP Precise Point Positioning, Web-Dienst des geologischen Dienstes von Kanada

QCP Qualitätskontrollparameter für HEM-Daten  $\rho$  Spezifischer Widerstand [in  $\Omega$ m, Ohm-Meter]

 $ho_a$  Scheinbarer spezifischer Widerstand (Halbraumwiderstand) [in  $\Omega$ m]  $ho_b$  Spezifischer Widerstand von Wasser und Gesteinsmatrix [in  $\Omega$ m]

 $ho_w$  Spezifischer Widerstand von Wasser [in  $\Omega$ m]  $R^2$  Bestimmtheitsmaß bei lineares Regression

RTP Reduktion auf den Pol

σ Elektrische Leitfähigkeit [in S/m, Siemens pro Meter]

σ<sub>w</sub> Elektrische Leitfähigkeit von Wasser [μS/cm]

T Kontroll- bzw. Querprofil (plus Nummer) von Nordosten nach Südwesten (NO-SW)

oder umgekehrt

T Totalintensität des erdmagnetischen Feldes [in nT]

TC Gesamtstrahlung [in cps, counts per second]
Topo Geländehöhen aus Flugdaten [in m NHN]

UTM Globales Koordinatensystem (Universal Transverse Mercator)

X, Y Koordinaten (ERTS89, UTM-Zone 33N)

z\* Schwerpunktstiefe [in m]



# Anhang II: Flugtabelle

Flug- nummer	Datum	Zeit (MESZ) Start-Ende	Mess- und Kontroll- profile	Sonstiges
19101	10.05.2021	15:17-17:25	T1.9, T4.9, T7.9, T10.9, T13.9, T16.9, T19.9, T22.9, T23.9, T20.9, T17.9, T14.9, T11.9, T8.9	<b>Kontrollprofilflug</b> Wetter: Sonnig 28°C Daten: OK
19102	11.05.2021	11:20-13:30	T5.9, T2.9, T3.9, T6.9, T9.9, T12.9, T15.9, T18.9, T21.9, L3.3, L14.3, L25.3, L36.3, L47.3, L58.3, L69.3, L80.3, L85.3, T12.8, L1.3	Kontroll-/Messprofilflug Wetter: Sonnig 30°C Daten: OK 3 zusätzliche Profile geflogen
19103	13.07.2021	11:27-13:51	T3.8, T8.8, T13.8, T18.8, L1.2, L4.1, L7.1, Sonderlinie T311.9, L10.1, L13.1, L16.1, Sonderlinie L33.2, L19.1, L22.1, L25.2, Referenzlinie L903.1	Kontroll-/Messprofilflug L1.2 bis L7.1 in umgekehrter Richtung geflogen, T2 kurz aus während Abschlusskalibrierung Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Sonnig 26°C
19104	13.07.2021	15:46-15:49		Messung abgebrochen
19105	13.07.2021	15:50-18:15	L28.1, L31.1, L34.1, L37.1, L40.1, L43.1, L46.1, L49.1, L52.1, L55.1, L58.2, L61.1, L64.1, L67.1, L70.1, T1.8, Referenzlinie L905.1	Messprofilflug Abflug über Kontrollprofil Alle Linien in umgekehrter Richtung geflogen Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Sonnig 30°C
19106	14.07.2021	10:30-12:50	L2.1, L5.1, L8.1, L11.1, L14.2, L17.1, L20.1, L23.1, L26.1, L29.1, L32.1, L35.1, L38.1, L41.1, L44.1, L47.1, L50.1, Referenzlinie L906.1	Messprofilflug Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Bedeckt 21°C
19107	14.07.2021	14:29–16:54	L3.2, L6.1, L9.1, L12.1, L15.1, L18.1, L21.1, L24.1, L27.1, L30.1, L33.1, L36.2, L39.1, L42.1, L45.1, 48.1, 51.1, T2.8, Referenzlinie L907.1	Messprofilflug Abflug über Kontrollprofil Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Wolkig 24°C
19108	15.07.2021	10:36-10:46		Messung abgebrochen



19109	15.07.2021	10:47-12:54	T23.8, L53.1, L54.1, L57.1, L60.1, L63.1, L66.1, L69.2, L72.1, L75.1, L78.1, L81.1, L84.1, L85.2, T10.8, Referenzlinie L909.1	Messprofilflug An-/Abflug über Kontrollprofile Neustart im Fluge wegen GPS- Bird-Ausfall bei Autocal Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Wolkig 22°C
19110	15.07.2021	14:18-16:27	T21.8, L56.1, L59.1, L62.1, L65.1, L68.1, L71.1, L74.1, L77.1, L83.1, L82.1, L79.1, L76.1, L73.1, L80.2, T16.8, Referenzlinie L910.1	Messprofilflug An-/Abflug über Kontrollprofile T21.8, L56.1 bis L77.1 in umge- kehrter Richtung geflogen. HMG-Registrierung erst ab Rec 49600 (beginnend bei L76.1) Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Wolkig 25°C
19111	16.07.2021	09:36-11:43	T19.8, L83.2, L82.2, L79.2, L74.2, L77.2, L68.2, L71.2, L62.2, L65.2, L56.2, L59.2, T300.9, T301.9, T303.9, T304.9, T305,9. T306.9, T307.9, T309.9, T310.9, Referenzlinie L911.1	Mess-/Querprofilflug Anflug über Kontrollprofil, Wiederholung aus 19110 (ohne T21.8), Detailgebiet 3 (T) Neustart im Fluge wegen GPS- Bird-Ausfall bei Autocal Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Sonnig 23°C
19112	16.07.2021	13:36-15:17	T150.9, T153.9, T156.9, T159.9, T162.9, T165.9, T168.9, T171.9, T174.9, T177.9, T180.9, T183.9, T186.9, T189.9, L200.1, L202.1, L204.1, L206.1, L208.1, L210.1, L212.1, L214.1, L216.1, L218.1, Referenzlinie L912.1	Quer-/Messprofilflug Detailgebiete 1 (T) und 2 (L) Daten: OK, aber Frequenzanzeige mit Sprüngen Wetter: Bewölkt 27°C

#### **Anmerkung:**

Gegenüber den Befliegungsberichten sind die Profilnummern an die Erfordernisse der Auswertungangepasst worden. Generell gilt:

Befliegung Finsterwalde-1: \*.3 (L), \*.9 (T), \*.8 (T Wiederholung), Profilnummern <100. Befliegung Finsterwalde-2: \*.1 (L), \*.2 (L Wiederholungen), \*.8 (T), Profilnummern <100 (Übersicht), 150-189 (Detailgebiet 1), 200-218 (Detailgebiet 2), 300-311 (Detailgebiet 3), 903-912 (Referenzlinien).



**Anhang III: Protokolle** 

# Anhang III.1: Positionsdatenverarbeitungsparameter

Vorerkundung (Finsterwalde-1)

Beschreibung	Parameter [Einheit]	Heli	Bird
Defaults	-		•
Programmversion		PosView06.exe	
System	Sys		1
Projektion	Proj	UTM zo	one 33N
Dem-Grid	DemFile	DEM_BKG_UTN	//32_Geosoft.grd
Kanäle	LonChan LatChan ZhgChan LonPppChan LatPppChan ZhgPppChan RollChan PitchChan YawChan	LON_HELI_RAW LAT_HELI_RAW ZHG_HELI_RAW LON_HELI_PPP LAT_HELI_PPP ZHG_HELI_PPP	- - - - - - -
Prozessierung			
LagBirdGps [rec] Verschiebungen LagKpa [rec] LagBirdImu [rec]		0	0 0
Gps-Sprung  JumpMedWin [rec]  JumpThresh [m]		25 0.2	
KpaDriftSplSmth Kpa KpaDriftSplTau KpaCopyZhg		1 0.5 0	



# Haupterkundung (Finsterwalde-2)

Beschreibung	Parameter [Einheit]	Heli	Bird		
Defaults					
Programmversion		PosView07.exe			
System	Sys	(	)		
Projektion	Proj	UTM zo	one 33N		
Dem-Grid	DemFile	*			
Kanäle	LonChan LatChan ZhgChan LonPppChan LatPppChan ZhgPppChan RollChan PitchChan YawChan KpaChan	LON_HELI_RAW LAT_HELI_RAW ZHG_HELI_RAW LON_HELI_PPP LAT_HELI_PPP ZHG_HELI_PPP	LON_BIRD_RAW LAT_BIRD_RAW ZHG_BIRD_RAW LON_BIRD_PPP LAT_BIRD_PPP ZHG_BIRD_PPP IMU_ROLL IMU_PICH IMU_YAW		
KpaChan KPA - Prozessierung					
Verschiebungen	LagBirdGps [rec] LagLaser [rec] LagKpa [rec] LagBirdImu [rec]	0	0 0		
Gps-Sprung	JumpMedWin [rec] JumpThresh [m]	25 0.2	25 0.2		
TopoLaser	useAng LpTau		Tau 10		
Gps-Drift	GpsDriftAltlim [m] GpsDriftVarWid [rec] GpsDriftThresh [m] GpsDriftSplSmth GpsDriftSplTau GpsDriftLaserLp [rec]		60 350 1.0 1.0 1.0		
Baumbereinigung	ClTreeVarwid [rec] ClTreeThresh [m] ClTreeDelshort [rec]		7 0.5 8		
Кра	KpaDriftSplSmth KpaDriftSplTau KpaCopyZhg	1 0.5 0			



# Anhang III.2: HEM-Datenverarbeitungsparameter

# Prozessierungsparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	EM6
Defaults	•			•			
Programmversion			HemViev	w20g.exe			
Birdnummer	NB			BK	S36a (62)		
Frequenzen	Freq [Hz]	41358 HCP	8393 HCP	378 HCP	128362 HCP	1821 HCP	5417 VCX
Verschiebung	Lag [rec]			_	8		
Kanäle	X/YChan Lon/Lat/ZhgChan AltChan TopoChan RadarChan BaroChan AttChan	POS_X_BIRD / POS_Y_BIRD POS_LON_BIRD / POS_LAT_BIRD / POS_ZHG_BIRD POS_HAG_BIRD_LASER POS_TOPO_LASER_BIRD POS_HAG_BIRD_DEM ALTB POS_TAU					
	IChan QChan	EM1I EM1Q	EM2I EM2Q	EM3I EM3Q	EM4I EM4Q	EM5I EM5Q	EM6I EM6Q
Automatische	AutoZeroAlt [m]	300	300	300	300	300	300
Stützstellensetzung	AutoZeroFiltRad [rec]	8	8	8	8	8	8
Automatische Datenauswahl	AltLimHsp [m] SignalWid [rec] NoiseWid [rec] Threshl [ppm] ThreshQ [ppm]	170 75 15 0.25 0.25	170 75 15 0.25 0.25	170 75 25 0.3 0.3	170 75 15 0.25 0.5	170 75 25 0.3 0.3	170 75 20 0.3 0.3
Filter	MedFiltRad [rec] NIFiltWid [rec] NIFiltTol [ppm] LpFiltCut [rec]	0 15 1 30	0 15 1 30	0 30 1 30	0 10 1 20	0 20 1 30	0 15 1 30
HSP-Levelling							
Linegrid	LineGrd_EdgClp [cell] GridGap EdgClp [cell] ErrGrd BtwLen [m]	5 10 600					
Errorgrid	ErrGrd_BtwOrd ErrGrd_DcosDir [°] ErrGrd_DcosDeg			-1	8 35 1		
Errorfilter	ErrFlt_SpSmthR ErrFlt_SpSmthD Errf_SpTau	0.85 0.85	0.85 0.85	0.85 0.85	0.85 0.85	0.85 0.85	0.85 0.85
Skip Lines	Hsp_Tlt				.5		
	TieLev_SpSmthR TieLev_SpSmthD	0.8 0.8	0.8 0.8	0.8 0.8	0.8 0.8	0.8 0.8	0.8 0.8
Tieline Levelling	TieLev_SpTau TieLev_ThrR [ppm] TieLev_ThrD [ppm]	0.03 0.03	0.03 0.03	0.03 0.03	.5 0.03 0.03	0.03 0.03	0.03 0.03
IQ-Levelling							•
Drift	Drift_NIWid [rec] Drift_NITol [ppm] Drift_AltLim [m]	50 10 300					
	Drift_ThrIQ [ppm] Drift_SpSmth Drift_SpTau	0.01 0.85	0.01 0.85	0.02 0.85	0.01 0.85	0.01 0.85	0.03 0.85
Noise	Lev_AltLim [m] Noise_Wid [rec]			8	80 80		Γ
	Lev_ThrI [ppm] Lev_ThrQ [ppm]	0.02 0.02	0.03 0.03	0.04 0.04 1	0.02 0.02 1	0.03 0.03	0.03 0.03
Levelling Filter	Lev_NITol [ppm] Lev_SpSmth Lev_NIWid [rec] Lev_SpTau	1 0.55 15 0.5	1 0.55 15 0.5	0.55 30 0.5	0.55 10 0.5	1 0.55 20 0.5	1 0.55 15 0.5



# Korrekturwerte für Kalibrierfaktoren

EM1				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19103	0	83710	1.05	1.2
19105	0	84720	1.03	0.8
19106	0	75470	1.07	1.3
19107	0	82330	1.06	1.6
19109	0	69500	1.04	1.5
19110	0	71860	1.03	1.0
19111	0	73670	1.04	1.4
19112	0	57220	1.03	0.8

EM2				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19103	0	83710	1.29	-0.2
19105	0	84720	1.25	-0.9
19106	0	75470	1.30	-0.9
19107	0	82330	1.28	-0.9
19109	0	69500	1.28	-1.2
19110	0	71860	1.28	-0.9
19111	0	73670	1.28	-0.2
19112	0	57220	1.28	-1.2

EM3				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19103	0	83710	1.03	0.5
19105	0	84720	1.00	0.0
19106	0	75470	1.01	0.3
19107	0	82330	1.01	0.3
19109	0	69500	1.01	0.3
19110	0	71860	1.01	0.3
19111	0	73670	1.02	1.0
19112	0	57220	1.02	-0.2

EM4				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19103	0	83710	0.59	-14.9
19105	0	84720	0.53	-9.7
19106	0	75470	0.69	-24.3
19107	0	82330	0.59	-18.6
19109	0	69500	0.64	-22.6
19110	0	71860	0.57	-18.3
19111	0	73670	0.60	-19.5
19112	0	57220	0.57	-16.0

EM5				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19103	0	83710	1.02	0.2
19105	0	84720	1.00	0.0
19106	0	75470	1.01	0.2
19107	0	82330	1.02	0.2
19109	0	69500	1.00	1.0
19110	0	71860	1.01	-0.3
19111	0	73670	1.02	0.8
19112	0	57220	1.02	0.2

EM6				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19103	0	83710	1.06	-0.2
19105	0	84720	1.16	-2.5
19106	0	75470	1.10	0.2
19107	0	82330	1.07	0.8
19109	0	69500	1.10	-0.2
19110	0	71860	1.06	-1.0
19111	0	73670	1.10	0.2
19112	0	57220	1.05	-1.0



# D-AERO-Finsterwalde, Befliegungen Mai/Juli 2021

# Fehler- und Qualitätsparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	Wert	
	Std_AltLim [m]	300	
Datenfehler	Std_NIWid [rec]	50	
	Std_NITol	3	
	Std_LpCut [rec]	100	
	Std_StdWid [rec]	50	
	Qcp_MaxStd	0.8	
Datenqualität	Qcp_Thrsh	0.5	
	Qcp_ModWid [rec]	50	
	Qcp_GrdMax	1.0	
	Qcp_GrdEdgClp [cell]	4	

### Gridparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	Rhoa	Da	Zst	Торо	Rho@Z
Gridding	Cellsize [m]	50	50	50	50	50
	Edgeclip [cell]	5	5	5	5	5
	BlankDist [m]	200	200	200	200	200
	Tension	0	0	0	0	0
	SearchRad [m]	200	200	200	100	200
	LogOpt	-1	0	0	0	-1
	ZonFile	rhofract_191.zon	dafract_191.zon	zstfract_191.zon	DEM_191.zon	rhofract_191.zon

### Inversionsparameter

Funktion	Parameter [Einheit]	Inv_Final_320.conf	Inv_Final_36.conf	
Ein-/Ausgabe				
Prefix für Daten- und Modellausgabe	Prefix	Final_320	Final_36	
Dezimierung	nDec	1	1	
Auswahlcode niedrigste Frequenz	useEM3	1	1	
Druckparameter	nPri	1	1	
Startmodell				
Code	sCode	3	3	
Schichtungscode	schCode	1	1	
Anzahl Schichten	nLay	20	6	
Halbraumparametercode	rCode	1	1	
Glättung Sondierungskurve	glFak	5	5	
Deckschichtwiderstand	rCover [Ωm]	1000	1000	
Deckschichtdicke	dSchDick [m]	0	0	
Halbraumwiderstand	rHspace [Ωm]	0	0	
Mindestschichtdicke	minSchDick [m]	0.1	0.1	
Verschiebungsfaktor unterste Grenze	tFaktU	1	1	
Verschiebungsfaktor oberste Grenze	tFaktO	1	1	
Inversion				
Abbruchschranke	Stop [%]	10	10	
Vorwärtscode	cCode	2	2	
minimaler Schichtwiderstand	rhoMin [Ωm]	0.2	0.2	
maximaler Schichtwiderstand	rhoMax [Ωm]	2000	2000	
minimale Schichtdicke	dMin [m]	0.1	0.1	
maximale Schichtdicke	dMax [m]	100	100	
Fortsetzungscode	iStop	5	5	
Schrittweite vorwärts	reduct1	3.162	3.162	
Schrittweite rückwärts	reduct2	0.75	0.75	
Glättungsparameter	damp	2.7	1	
minimale Iterationszahl	minIt	1	1	
maximale Iterationszahl	maxlt	99	99	
Ableitung nach Logarithmen	ablLog	J	J	
Modellaufwahlcode	modAuswCode	1	1	
Schichtunterdrückungscode	schUntDrk	0	0	



### Anhang III.3: HMG-Datenverarbeitungsparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	Wert		
Defaults				
Programmversion	HmgView07.exe			
Kanäle	LonChan LatChan ZhgChan	POS_LON_BIRD POS_LAT_BIRD POS_ZHG_BIRD		
Kanale	XChan YChan MagChan	POS_X_BIRD POS_Y_BIRD MAG1U		
Prozessierungsschritte				
1. Bereinigung Basis	LpWid [rec]	1800		
2. Verschiebungen	Lag [rec] Offset [nT]	17 0		
3. Tieline-Levelling	nich	t erfolgt		
4. Vorbereitung Microlevelling	AsThresh Shrink [cell] Grow [cell] delShort [rec] GridGap [cell] TaperWid [rec]	0.06 2 1 20 45 10		
5. Microlevelling	BtwLen [m] BtwDeg DcosAng [°] DcosDeg SplSmth SplTau SplSmthTie SplTauTie nLev	1000 8 -135 1.0 1.0 0.5 1 0.5 1		
6. Bereinigung anthropogen	AsThresh Shrink [cell] Grow [cell] delShort [rec] GridGap [cell] TaperWid [rec]	0.12 5 2 20 12 10		
7. Grid-Filter	GfLong [m] GfShort [m]	20000 500		
8. RTP und Xa	Inclination [°] Declination [°] Field [nT] Depth [m]	67.31 4.61 49667.5 -100		
Gridding				
Gridding	Cellsize [m] Edgeclip [cell] BlankDist [m] Tension SearchRadius [m] ZonFile	50 5 200 0 <i>auto</i> MAG.zon		



# Anhang III.4: HRD-Datenverarbeitungsparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	DOWN			UP	
Defaults	'	K U Th TC				U_UP
Programmversion	ProgVer			HrdView122.exe	•	
System	Device			RS-500 RSX-5		
	LonChan	POS_LON_HELI				
	LatChan	POS_LAT_HELI				
	ZhgChan	POS_ZHG_HELI				
Kanäle	XChan	POS_X_HELI				
Kariaic	YChan HagChan	POS_Y_HELI POS_HAG_HELI_DEM				
					ı	GR820 UP
	SpecChan	GR820_DOWN  GR820_K_DOWN   GR820_U_DOWN   GR820_TH_DOWN   GR820_TC_DOWN				
Duanassianumassahuit	CompChan	GR820_K_DOWN	GR820_0_DOWN	GR820_TH_DOWN	GR820_TC_DOWN	GR820_U_UP
Prozessierungsschrit	1			025		1025
1. Gain	GainFiltWid [rec]			.025		1025
2. NASVD	AltMax [m] ChanRange			120		120 110-160
2. NA3VD	nComp	110-240 7				5
	backA [cnt]	5.08	0.27	-0.5	29.77	-0.05
3. Hintergrund	backB [cnt/cnt]	0.0703	0.0554	0.0692	1.1488	0.0154
	a1		(	0.05		
	a2	0.026				
	aU			0.28		
4. Radon	aTh	0.1				
	aK aTC	0.6				
	RadFiltWid [rec]			14 120		
	alpha			0.27		
·	beta			0.4		
5a. Compton	gamma	0.772				
	a	0.052				
5b. Attenuation	att [1/m]	0.00939	0.00646	0.00729	0.00676	
5c. Sensitivity	sens [cnt/% ppm]	39.46	4.56	2.37		
5d. Faktor	fact	1	1	1	1	
	MathFiltWid [rec]	3	3	3	3	
6. Filter	MathRefFiltWid	10	10	10	10	
	[rec]					
7. Tieline Levelling			nicht erfolgt			
8. Biokorrektur		nicht erfolgt				
9. Microlevelling		nicht erfolgt				
10. Gridfilter	ConvHag [m]			10		_
Gridding	0.11. 1.1	К	U	Th 50	тс	Expo
	Cellsize [m] Edgeclip [cell]			50 5		
	BlankDist [m]	200				
Gridding	Tension	0				
	SearchRad [m]			auto		
	Zonfile	le POT_COR.zon URA_COR.zon THO_COR.zon TOT_COR.zon				Expo.zon



### **Anhang IV: Karten**

#### Kartenverzeichnis

#### Anhang IV.1: Fluglinien

- 1. Fluglinien HRD Mai 2021.
- 2. Fluglinien Übersicht Juli 2021.
- 3. Fluglinien Detailgebiete Juli 2021.

#### Anhang IV.2: Geländehöhen

4. Geländehöhen.

#### Anhang IV.3: HEM-Karten

- 5. Qualitätskontrollparameter.
- 6. Halbraumwiderstand für die Frequenz 378 Hz.
- 7. Halbraumwiderstand für die Frequenz 1821 Hz.
- 8. Halbraumwiderstand für die Frequenz 5417 Hz.
- 9. Halbraumwiderstand für die Frequenz 8393 Hz.
- 10. Halbraumwiderstand für die Frequenz 41358 Hz.
- 11. Halbraumwiderstand für die Frequenz 128362 Hz.
- 12. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 378 Hz.
- 13. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 1821 Hz.
- 14. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 5417 Hz.
- 15. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 8393 Hz.
- 16. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 41358 Hz.
- 17. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 128362 Hz.
- 18. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 378 Hz.
- 19. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 1821 Hz.
- 20. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 5417 Hz.
- 21. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 8393 Hz.
- 22. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 41358 Hz.
- 23. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 128362 Hz.
- 24. Spezifischer Widerstand bei 45 m NHN.
- 25. Spezifischer Widerstand bei 55 m NHN.
- 26. Spezifischer Widerstand bei 65 m NHN.
- 27. Spezifischer Widerstand bei 75 m NHN.
- 28. Spezifischer Widerstand bei 85 m NHN.
- 29. Spezifischer Widerstand bei 90 m NHN.
- 30. Spezifischer Widerstand bei 95 m NHN.
- 31. Spezifischer Widerstand bei 105 m NHN.
- 32. Spezifischer Widerstand bei 115 m NHN.
- 33. Spezifischer Widerstand bei 125 m NHN.

### Anhang IV.4: HMG-Karten

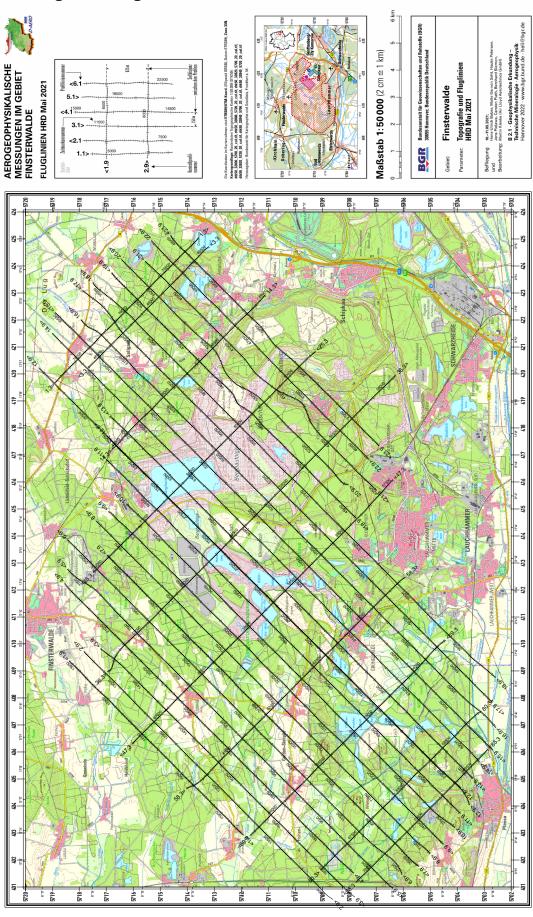
- 34. Anomalien des erdmagnetischen Feldes (reduziert auf den Pol).
- 35. Anomalien des erdmagnetischen Feldes (reduziert auf den Pol, bereinigt).

### Anhang IV.5: HRD-Karten

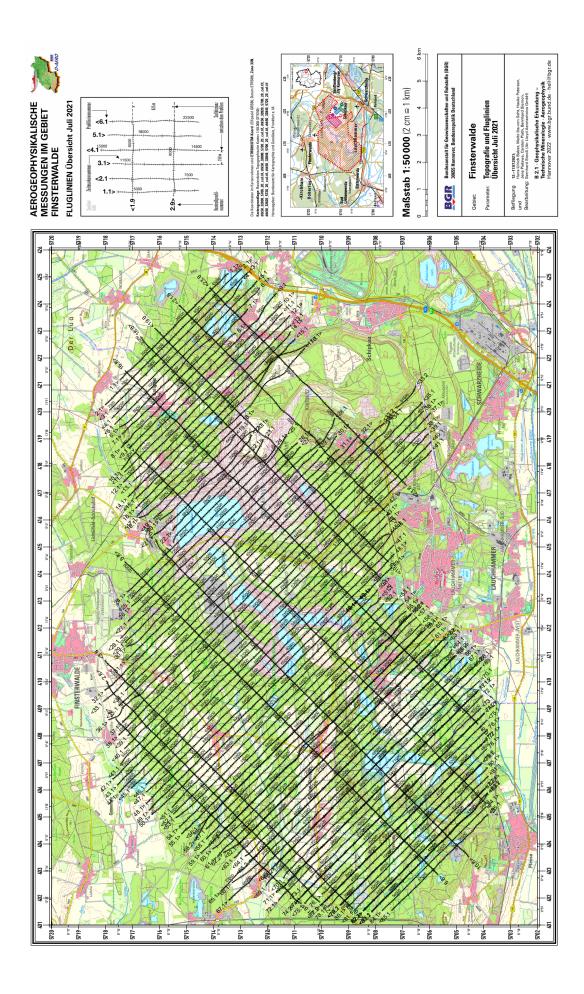
- 36. Gesamtstrahlung.
- 37. Gehalte von Kalium am Boden.
- 38. Äquivalentgehalte von Uran am Boden.
- 39. Äquivalentgehalte von Thorium am Boden.
- 40. Ionendosisleistung am Boden.



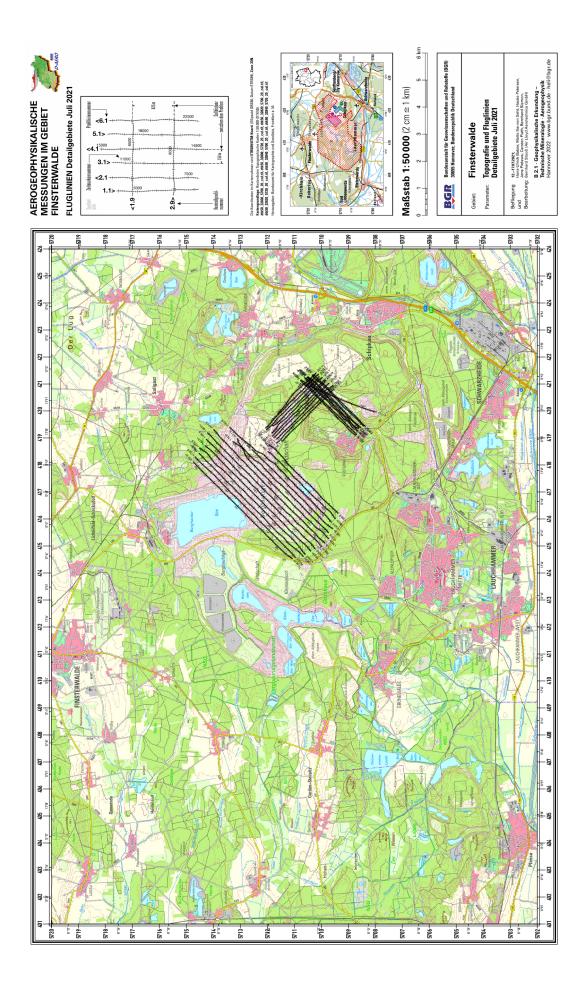
# Anhang IV.1: Fluglinien











Alle anderen Karten und Vertikalsektionen 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.