



# Gebietsbericht D-AERO-Moore HEM/HRD/HMG-Befliegung 196 Gnarrenburg, Mai 2022

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

## Impressum

**Herausgeberin:**

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
Stilleweg 2  
30655 Hannover

**Autorenkreis:**

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

**Kontakt:**

Bernhard Siemon  
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Stilleweg 2  
30655 Hannover  
bernhard.siemon@bgr.de

Titelbild: © Carsten Plath (BGR)

Layout: yellow too Pasiek Horntrich GbR,  
Satz: Jens Pielawa (BGR)

B2.1 Aerogeophysik

Stand: 1. April 2023

# Gebietsbericht D-AERO-Moore HEM/HRD/HMG-Befliegung 196 Gnarrenburg, Mai 2022

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

BGR-Projekt: D-AERO-Moore

PSP-Element: A-0401010.A



Hannover, April 2023



## Inhaltsverzeichnis

<b>Adresse</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Messgebiet</b> .....	<b>6</b>
<b>4 Befliegungen</b> .....	<b>8</b>
<b>5 Bearbeitung der Messdaten</b> .....	<b>9</b>
5.1 Positionsdaten .....	9
5.2 Daten der Elektromagnetik .....	9
5.2.1 Kalibrierung .....	10
5.2.2 Niveauekorrektur .....	12
5.2.3 Korrektur von anthropogenen Effekten .....	13
5.2.4 1D-Inversion .....	13
5.3 Daten der Magnetik .....	14
5.3.1 Basisstation .....	14
5.3.2 Sensorlage .....	14
5.3.3 Reduktion auf den Pol .....	15
5.3.4 Bandpass-Filterung .....	15
5.4 Daten der Radiometrie .....	16
5.4.1 Geogene und anthropogene Einflüsse .....	16
5.4.2 Bodenfeuchtekorrektur .....	16
<b>6 Ergebnisse</b> .....	<b>17</b>
6.1 Positionsdaten .....	17
6.2 Elektromagnetik .....	17
6.2.1 Generelle Ergebnisse .....	18
6.2.2 Vergleich mit Lithologie und Bodentypen .....	20
6.3 Magnetik .....	24
6.3.1 Anthropogene Strukturen .....	24
6.3.2 Geogene Strukturen .....	24
6.4 Radiometrie .....	25
<b>7 Fazit</b> .....	<b>27</b>
<b>8 Archivierung</b> .....	<b>28</b>
<b>9 Literatur</b> .....	<b>29</b>

<b>Anhang I: Verzeichnisse .....</b>	<b>31</b>
Anhang I.1:  Abbildungsverzeichnis.....	31
Anhang I.2:  Tabellenverzeichnis.....	31
Anhang I.3:  Abkürzungsverzeichnis .....	32
<b>Anhang II:  Flugtabelle.....</b>	<b>34</b>
<b>Anhang III:  Protokolle .....</b>	<b>36</b>
Anhang III.1:  Positionsdatenverarbeitungsparameter .....	36
Anhang III.2:  HEM-Datenverarbeitungsparameter.....	37
Anhang III.3:  HMG-Datenverarbeitungsparameter .....	40
Anhang III.4:  HRD-Datenverarbeitungsparameter .....	41
<b>Anhang IV:  Karten.....</b>	<b>42</b>
Anhang IV.1:  Fluglinien.....	44
Anhang IV.2:  Geländehöhen .....	46
Anhang IV.3:  HEM-Karten .....	47
Anhang IV.4:  HMG-Karten .....	76
Anhang IV.5:  HRD-Karten .....	78
<b>Anhang V:  HEM-Vertikalsektionen .....</b>	<b>83</b>
Anhang V.1:  Vertikalsektionen basierend auf Modellen mit 6 Schichten .....	83
Anhang V.2:  Vertikalsektionen basierend auf Modellen mit 20 Schichten .....	102
<b>Anhang VI:  Inhalt der DVD .....</b>	<b>121</b>
<b>Anlage: .....</b>	<b>DVD</b>

## 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](mailto:heli@bgr.de), [Uwe.Meyer@bgr.de](mailto:Uwe.Meyer@bgr.de), [Bernhard.Siemon@bgr.de](mailto:Bernhard.Siemon@bgr.de)

# 1 Zusammenfassung

Moorböden erfüllen natürliche Bodenfunktionen als Lebensraum und dienen als schützenswerte Speicher für Wasser und Treibhausgas. Die Kenntnis von aktueller Ausdehnung und Mächtigkeit von Mooren sowie deren Änderungen ist die Basis für verlässliche Interpretationen und Prognosen. Aufgrund der Vielzahl von Mooren in Deutschland ist es kaum möglich, alle notwendigen Messungen in-situ vorzunehmen. Alternativen bieten Verfahren der Fernerkundung und der Geophysik. Speziell die Aero-geophysik kann räumliche Informationen für eine schnelle Erkundung von Mooren liefern, jedoch gibt es hierzu bisher kaum detaillierte Untersuchungen.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt seit 05/2021 das Forschungsvorhaben „D-AERO-Moore“ durch, in dem nicht-invasive Verfahren der Fernerkundung und der Geophysik mit in-situ-Verfahren kombiniert werden. Der BGR-Strategie folgend werden interdisziplinäre und skalenübergreifende Untersuchungen an ausgewählten Mooren durchgeführt. In Ergänzung zu Bohrdaten werden großflächig vorhandene Aero-geophysikdaten gezielt durch neue ergänzt und anhand von aktuellen in-situ und bodengeophysikalischen Messungen sowie Fernerkundungsdaten (Bodenbewegungs- und Hyperspektraldaten) analysiert.

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 sieben Messflüge über das etwa 173 km<sup>2</sup> große Messgebiet „Gnarrenburg“, das etwa 30 km nordöstlich von Bremen liegt, fanden Anfang Mai 2022 statt. Als Basis wurde der Flugplatz in Rotenburg an der Wümme genutzt.

Für die Auswertung der aero-geophysikalischen Daten war zunächst eine umfangreiche Aufarbeitung der Positionsdaten notwendig, wobei verfälschte Laserhöhendaten in Bereichen mit Bewuchs und das Pendeln der Flugsonde korrigiert wurden. Die absoluten Höhen der Flugsonde wurden unter Verwendung eines Geländehöhenmodells angepasst.

Aus den mit einer Flugsonde registrierten HEM-Daten zu sechs Messfrequenzen (im Bereich 0,38–133 kHz) wurden nach Bearbeitung bezüglich systemspezifischen (Rauschen, thermische Drift, Kalibrierung) und anthropogenen (Bebauung, Infrastruktur) 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 basieren. Die spezifischen Widerstände wurden als Karten bezüglich der Messfrequenzen bzw. bei ausgewählter Tiefen und als Vertikalschnitte entlang der Fluglinien präsentiert. Die spezifischen Widerstände lieferten Hinweise über die Verbreitung von dominierenden Lithologien (sandige vs. tonige Sedimente), über den Verlauf von quartären Rinnen und über die Torfvorkommen in Moor-gebieten.

Die HMG-Daten wurden mit einem in die Flugsonde integrierten 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. Neben diesen geogenen Ursachen beeinflussten auch anthropogene Effekte die Magnetfeldmessungen, da z. B. Metalle bei ausreichender Größe erkennbare Anomalien hervorgerufen haben. Diese Effekte, die häufig in besiedelten Gebieten und im Bereich anderer Infrastruktur (Eisenbahn, Straßen, Gasleitungen etc.) auftreten, wurden bei der Datenverarbeitung optional beseitigt.

Die HMG-Daten lieferten einerseits die großräumigen, geogen verursachten Anomalien, die eher auf tiefliegende Quellen hinweisen, und andererseits die lokalen, von Menschen verursachten Anomalien.

Die HRD-Daten wurden im Hubschrauber mit einem Gammastrahlenspektrometer erfasst. 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 aus den HRD-Daten gewonnenen Karten weisen für das Untersuchungsgebiet generell auf eine eher geringe Gammastrahlung am Boden hin. 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. Ferner lassen sich Feucht- und Waldgebiete abgrenzen, da Wasser und Biomasse die Gammastrahlung abschwächen. Daraus ließen sich Bereiche mit sehr niedriger Strahlung den Wasser- und Moorflächen zuordnen. Außerhalb der Moore konnten vor allem die Gleye, anzutreffen im Südosten und Nordosten des Gebietes, durch allgemein verringerte Strahlungswerte von den übrigen Bodentypen (Pseudogleye, Podsole, Plaggeneschen, Braunerden) unterschieden werden.

Die Ergebnisse der Befliegung zeigen, dass insbesondere großräumige Informationen über die Verbreitung der Moore im Messgebiet gewonnen werden können. Die laterale Abgrenzung der Torfe in den Mooren zeigt sich vor allem in der scheinbare Tiefe der höchsten Messfrequenz (HEM) sowie in der Ionendosisleistung (HRD). Die vertikale Abgrenzung der Torfe gegenüber dem sedimentären Untergrund (Torfbasis) deutet sich in den 1D-HEM-Inversionsmodellen mit sechs bzw. zwanzig Schichten an. Somit eröffnet eine aerogeophysikalische Erkundung mit dem Messsystem der BGR eine gute Möglichkeit, sowohl die Ausdehnung als auch die mittlere Mächtigkeit und somit das Torfvorkommen in Mooren großräumig abschätzen zu können. Die detaillierte Auswertung hierzu wird in einem separaten Interpretationsbericht beschrieben. Der vorliegende Bericht liefert eine Beschreibung der umfangreichen Prozessierungs- und Auswertungsschritte sowie einen Überblick über die generellen Ergebnisse im Messgebiet Gnarrenburg, die in Form von Karten und Schnitten (nur HEM) im Anhang und auf beiliegenden DVD abgelegt sind.



---

## 2 Einleitung

Die BGR-Strategie sieht den Ausbau der bodenkundlichen Interpretation von Daten der Fernerkundung und Boden- und Aerogeophysik vor. Das Forschungskonzept dieser Methoden ist strategisch ausgelegt und an Fallstudien orientiert. Moorboden ist ein bisher nicht gemeinsam betrachtetes neues Untersuchungsobjekt. Moorböden erfüllen natürliche Bodenfunktionen als Lebensraum und dienen als Speicher für Wasser und Treibhausgase (Joosten et al., 2016). Somit sind Moorböden schützenswert (LABO, 2017). Die Kenntnis von aktueller Ausdehnung und Mächtigkeit von Mooren sowie deren Änderungen ist die Basis für verlässliche Interpretationen und Prognosen. Aufgrund der Vielzahl von Mooren in Deutschland ist es kaum möglich, alle notwendigen Messungen in-situ vorzunehmen, die in der Regel von bzw. in Absprache mit den zuständigen Landesämtern, wie z. B. das Niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), durchgeführt werden. Alternativen bieten Verfahren der Fernerkundung und der Geophysik. Speziell die Aerogeophysik kann räumliche Informationen für eine schnelle Erkundung von Mooren liefern, jedoch gibt es hierzu bisher nur wenige Untersuchungen.

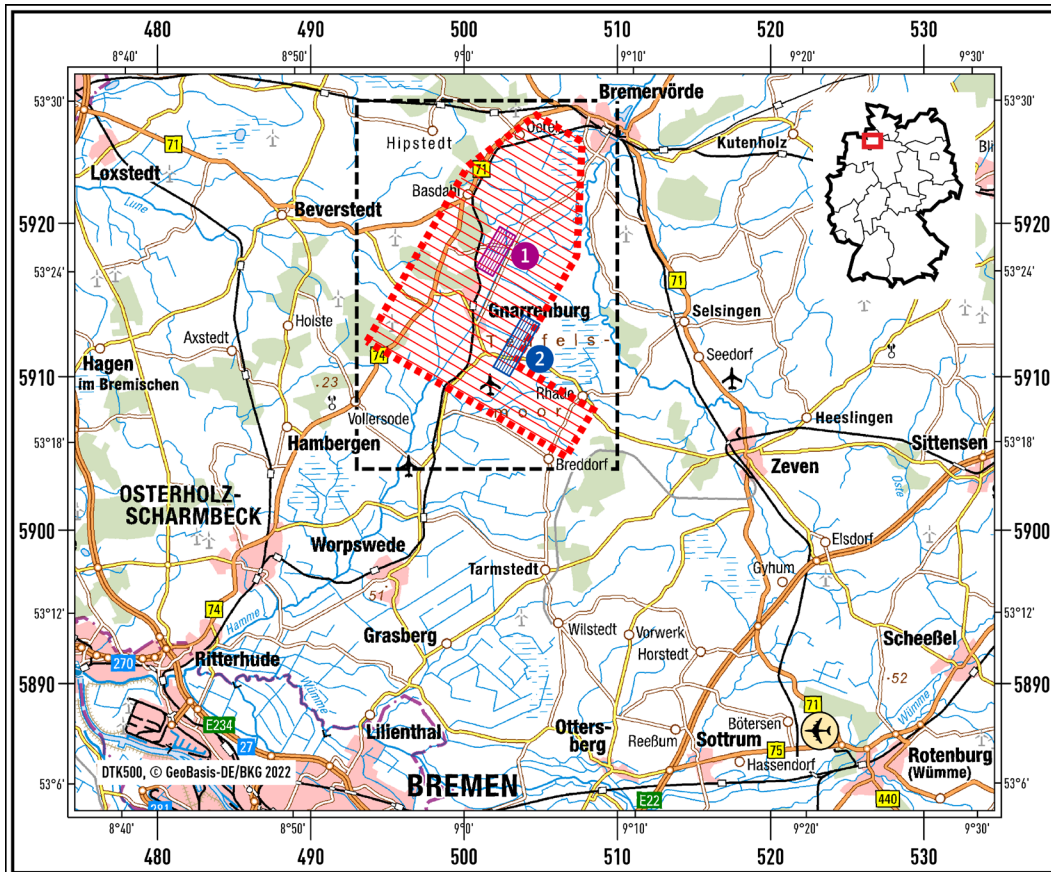
Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führt seit 05/2021 das Kernhaushaltsprojekt [D-AERO-Moore](#) durch, in dem nicht-invasive Verfahren der Fernerkundung und der Geophysik mit in-situ-Verfahren kombiniert werden. Der BGR-Strategie folgend werden interdisziplinäre und skalenübergreifende Untersuchungen an ausgewählten Mooren unter Einbeziehung der gesamten Prozesskette durchgeführt. Sowohl bereits großflächig vorhandene also auch neue Aerogeophysikdaten werden in Ergänzung zu Bohrdaten anhand von aktuellen in-situ und bodengeophysikalischen Messungen sowie Fernerkundungsdaten (Bodenbewegungs- und Hyperspektraldaten) analysiert.

Das Projekt setzt auf einer Studie auf, die in 2019 von BGR und LBEG am Ahlen-Falkenberger Moor mit Aerogeophysikdaten aus 2004 durchgeführte wurde (Siemon et al., 2019a). Diese zeigte bereits, dass sich Ausdehnung und Mächtigkeit eines Hochmoores aus der Kombination von Geländehöhe mit aeromagnetischen und aeroradiometrischen Daten abschätzen ließen, die im Mittel mit Bohrergebnissen des LBEG aus 2007 übereinstimmten (Siemon et al., 2020a). Doch es blieben aufgrund nicht ausreichender in-situ-Daten Fragen zum Prozessverständnis offen und nicht alle Möglichkeiten konnten ausgeschöpft werden. In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Aerogeophysik für ein Mooregebiet bei Gnarrenburg in Niedersachsen beschrieben. Die zugehörige Befliegung mit dem BGR-Hubschrauber fand Anfang Mai 2022 statt (Siemon & Pielawa, 2022).

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 sowie einer Basisstation (CF1) am Boden zur Erfassung der Variation des Magnetfeldes. Im Hubschrauber ist die Steuerungseinheit mit Datenaufzeichnung (HeliDAS SYS34) eingebaut. Die Messinstrumente befinden sich in einer geschleppten Flugsonde (RESOLVE BKS60, Methoden HEM und HMG) bzw. im Hubschrauber (Spektrometer RS-500 mit RX-5, Methode HRD). Die Navigations- und Positionierungsinstrumente sind im Hubschrauber (Satellitennavigationssystem (GNSS) mit NovAtel-Empfänger: OEMV2G-3.03-2T und -Antenne: L1/L2 ANT-532-e) sowie in der Flugsonde (Laserhöhenmesser LD90-3800VHS und GNSS NovAtel PwrPak7-E1 mit Empfänger: OEM7700, Lagesensor: Epson G320 MEMS IMU, Antenne: L1/L2 42G1215A) verbaut. Weitere Details sind in einem Technischen Bericht zu den Mess- und Auswertetechniken der Hubschrauber-geophysik (Siemon et al., 2019b) sowie in dem zugehörigen Befliegungsbericht (Siemon et al., 2022) beschrieben.

### 3 Messgebiet

Das Messgebiet Gnarrenburg (**Abbildung 1, Tabelle 1**) liegt zwischen Bremervörde und Worswede in Niedersachsen, etwa 30 km nordöstlich von Bremen. Die Auswahl des Untersuchungsgebietes erfolgte in Absprache mit den Projektpartnern aus der Geophysik, der Bodenkunde und der Fernerkundung innerhalb der BGR sowie mit dem LBEG.



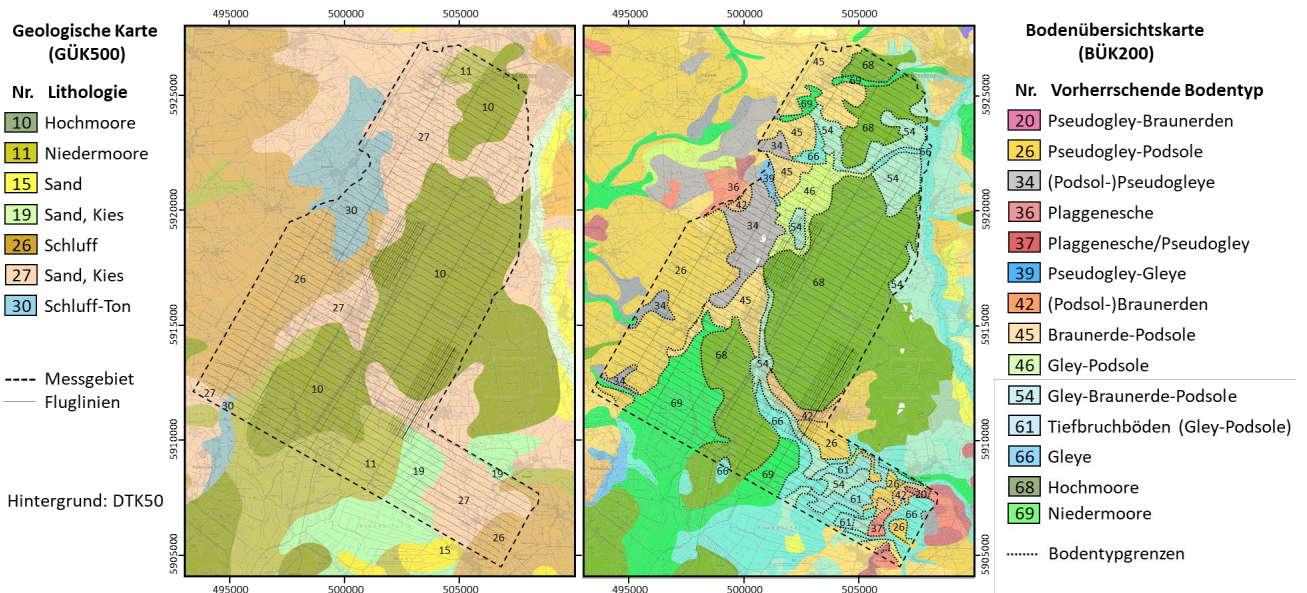
**Abbildung 1.** Lage und Ausdehnung des Gesamtmessgebietes Gnarrenburg bei Bremen mit Lage der beiden Detailgebiete 1 und 2 sowie des Kartenschnittes (gestrichelt).

**Tabelle 1.** Rahmenparameter zur Befliegung Gnarrenburg.

Gebietsbezeichnung	Gnarrenburg
Gebietsnummer	196
Projekt	D-AERO-Moore
Datum	03.-06.05.2022 (7 Messflüge)
Flugplatz	Flugplatz Rotenburg (Wümme) (EDXQ) Flugplatzhöhe: 30 m NHN (98 ft) Koordinaten: 53° 07' 40" N, 09° 20' 55" O
Transferdistanz	ca. 30 km

Die Entstehung der geologischen Strukturen im Messgebiet ist eiszeitlich geprägt. Daher variiert die Quartärbasis von einigen 10er-Metern unter NHN bis auf unter -200 m NHN in den Rinnenstrukturen (Kuster und Meyer, 1995). Die Hochlagen der Geestbereiche im Westen und Südosten sowie die Niederungen mit Mooren und Flussablagerungen prägen die Morphologie. Die Moore im Messgebiet (Rummeldeismoor, Gnarrenburger Moor, Speckenser Moor) stellen die nördlichen Ausläufer des Teufelsmoores dar, das in einem eiszeitlichen Schmelzwassertal liegt und sich über etwa 360 km<sup>2</sup> zwischen Bremen im Südwesten und Bremervörde im Nordosten erstreckt. In den in **Abbildung 2** gezeigten Übersichtskarten, Geologische Karte 1:500.000 (GÜK500, NLFb, 2000) und Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK200, BGR, 2018), erscheinen die Moore in (oliv-)grünen Farben.

Da Mooren schützenswerte Landschaften darstellen, liegen diese oft in Naturschutzgebieten, in denen eine geophysikalische Erkundung nur in Absprache mit den zuständigen Naturschutzbehörden durchgeführt werden kann. Somit wurde das ursprünglich geplante Messgebiet in Abstimmung mit den Landkreisen Rotenburg (Wümme) und Osterholz im Nordosten (Wümmeniederung, Huvenhoopsmoor) und im Süden (Teufelsmoor nördlich von Worpswede) verkleinert, um auf den Vogelschutz zum Zeitpunkt der Befliegung (Mai 2022) Rücksicht zu nehmen.



**Abbildung 2.** Geologische (GÜK500, links) und Bodenübersichtskarte (BÜK200, rechts) mit Fluglinien, Messgebietsgrenze und DTK50 im Hintergrund.

## 4 Befliegungen

Die sieben Messflüge über das Messgebiet „Gnarrenburg“ wurden vom etwa 30 km südöstlich liegenden Flugplatz in Rotenburg an der Wümme (**Abbildung 1**) aus mit dem Hubschraubermesssystem der BGR (Methoden: HEM, HMG, HRD) durchgeführt (Siemon & Pielawa, 2022), wobei ein Messflug wegen GPS-Problemen wiederholt wurde. Die mittlere Messfluggeschwindigkeit lag bei ca. 135 km/h, was zu einem Messpunktabstand von etwa 3,8 m führte. Der planmäßige Abstand der der 62 von WNW nach OSO verlaufenden Fluglinien betrug 300 m. Die 6 Kontrollprofile wurden im Abstand von etwa 1500 m senkrecht hierzu geflogen. Im Messgebiet wurden auch zwei kleine Detailgebiete mit etwa 100 m Linienabstand beflogen (26 Linien von NNO nach SSW, **Abbildung 2**), um einen detaillierteren Vergleich mit Messung am und im Boden zu ermöglichen. **Tabelle 2** listet die Befliegungsparameter auf. Insgesamt sind in dem etwa 173 km<sup>2</sup> großen Messgebiet Daten auf 102 Fluglinien mit einer Gesamtlänge von 778 km erhoben worden (inklusive der im Detailgebiet 2 liegenden Referenzlinien). Die vollständige Flugtabelle befindet sich in **Anhang II**, die Karten mit den Fluglinien in **Anhang VI.1**.

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

Gebiet	Gnarrenburg
<b>Methoden</b>	Hubschrauberelektromagnetik (HEM), Hubschraubermagnetik (HMG) und Hubschrauberradiometrie (HRD)
<b>Anzahl Messflüge</b>	7 (davon einer wiederholt wegen technischer Probleme)
<b>Fläche</b>	Flächenüberdeckung: ca. 173 km <sup>2</sup>
<b>Anzahl Messprofile (L)</b>	Gesamtgebiet: 62 (plus 15 wiederholt)
<b>Anzahl Kontrollprofile (T)</b>	Gesamtgebiet: 6 (davon 1 geteilt) Detailgebiet 1: 15 Detailgebiet 2: 13 Referenzlinien: 5
<b>Profilabstand (L)</b>	Gesamtgebiet: 300 m
<b>Profilabstand (T)</b>	Gesamtgebiet: 1500 m Detailgebiet 1: 100 m Detailgebiet 2: 100 m
<b>Profilkilometer (L/T)</b>	Gesamtgebiet: 550 / 96 km Detailgebiet 1: 49 km Detailgebiet 2: 60 km Referenzlinien: 23 km
<b>Profilrichtung (L/T)</b>	120° / 30° (WNW-OSO / SSW-NNO) und in Gegenrichtung
<b>Flughöhe (Hubschrauber)</b>	80–100 m über Grund (mittlere Höhe der Flugsonde etwa 51 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. (2019b) 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.

### 5.1 Positionsdaten

Die Positionsdatenbearbeitung beinhaltet die Kontrolle und ggf. die Korrektur der Positions- und Abstandsdaten. Dies betrifft in der Regel die GPS-Daten von Hubschrauber (Heli) und Flugsonde (Bird) sowie die Abstandsmessungen (Hubschrauber oder Flugsonde zur Geländeoberfläche) mit einem Laserhöhenmesser. Ein digitales Geländemodell (DEM) dient hierbei zur Kontrolle bzw. Korrektur (DGM25, BKG, 2012). Alle Daten und Darstellungen verwenden das Koordinatensystem ETRS89, Zone 32N, (EPSG Code 25832), im Folgenden auch kurz als UTM32 bezeichnet.

Der im GNSS-System integrierte Lagesensor, der die Neigungswinkel der Flugsonde aufgezeichnete, lieferte Daten, aus denen Korrekturen für die Messwerte der Laserhöhe abgeleitet werden konnten. Diese Korrekturen führten zu einer deutlichen Verbesserung der Abstandsmessung zwischen Flugsonde und Geländeoberfläche (bzw. Bewuchs und Bebauung).

Bei der Befliegung Gnarrenburg wurde auch in der Flugsonde ein GNSS-System verwendet, dessen Rohdaten – wie die des Hubschraubers – über den Web-Dienst *Precise Point Positioning* (PPP) des geologischen Dienstes von Kanada (*Natural Resources Canada*) nachprozessiert werden können. Diese Nachbearbeitung mit *GpsProc* (BGR-eigenes Programm) kann eine deutliche Verbesserung für die Position der Flugsonde liefern, insbesondere für die kritische Vertikalkomponente. Es zeigte sich jedoch, dass die Satellitendaten oft nicht die für die PPP-Korrektur erforderliche Qualität und Stabilität hatten. Dies hatte zur Folge, dass aufwändige, semi-automatische Nachbearbeitungen der Positionsdaten der Flugsonde mit *PosView08* (BGR-eigenes Programm) erforderlich waren. Somit musste die Sensorhöhe unter Zuhilfenahme eines Geländemodells nachjustiert werden. Hierzu wurden zunächst die Geländehöhen näherungsweise aus der Differenz von GPS-Rohdaten und korrigierten Laserhöhen berechnet. Nach Entfernung von Bereichen mit Bewuchs wurde die berechnete Geländehöhe mit dem DEM verglichen und die stark geglättete Differenz aus beiden als Korrektur an die GPS-Höhen angebracht (Siemon et al., 2019b).

### 5.2 Daten der Elektromagnetik

Die Bearbeitung der HEM-Daten (Real- und Imaginärteil des Sekundärfeldes, die üblicherweise als Inphase (I) und Quadrature (Q) bezeichnet werden) hat zum Ziel, bestmöglich die Parameter des Erduntergrundes (spezifische elektrische Widerstände  $[\Omega\text{m}]$  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 konnten schwache Effekte durch geeignete Filter (nicht-lineare (NL) und Tiefpass-Filter) unterdrückt werden, größeren Effekte mussten aber markiert und die betroffenen Datenbereiche entfernt werden. Kleineren Datenlücken konnten anschließend meist durch eine geeignete Interpolation geschlossen

werden. Ferner kann die Neigung des HEM-Systems bezüglich der Erdoberfläche die HEM-Daten beeinflussen. Daher wurde hier erstmalig eine geometrische Neigungskorrektur (Yin & Fraser, 2004) an die HEM-Daten angebracht.

Zur Reduzierung der systembedingten Einflüsse wurden Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt. Hierzu dienen transformierte HEM-Daten, die auf Basis von Halbraummodellen (Luftschicht über elektrisch leitendem Untergrund) gewonnen wurden, wobei an jedem Messpunkt aus den beiden HEM-Daten einer jeden Messfrequenz jeweils der Abstand des Messsystems zu dem leitenden Untergrund sowie dessen scheinbarer spezifischer Widerstand (= Halbraumwiderstand) berechnet werden (Siemon, 2012). Dieser berechnete Abstand kann von der gemessenen Sensorhöhe abweichen, wenn eine in Bezug auf die jeweilige Eindringtiefe dünne Deckschicht existiert. Ist diese Deckschicht im Vergleich zu dem Liegenden schlechter leitend (z. B. bei eher trockenen Sanden), dann erscheint die Luftschicht mächtiger. Im umgekehrten Fall (z. B. bei Tonen oder Torfen) erscheint sie dünner. Die Differenz aus berechnetem Abstand und gemessener Sensorhöhe (scheinbare Tiefe) liefert somit Informationen über die Zu- bzw. Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit mit der Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder in den Erduntergrund. 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. Die Halbraumparameter wurden sowohl für die Beurteilung und Korrektur von Kalibrier- und Niveaufehlern als auch für die Interpolation von Datenlücken verwendet. Darüber hinaus lieferten sie erste Hinweise zu den elektrisch leitenden Strukturen im Messgebiet sowie über deren Tiefenlage. Letztere wurde über einen weiteren Parameter, der sich aus Halbraumwiderstand und scheinbare Tiefe berechnen lässt (Schwerpunktstiefe  $z^*$  [m]), abgeleitet.

Für die bearbeiteten HEM-Daten wurden schließlich mittels 1D-Inversion Schichtmodelle für jeden Datenpunkt berechnet (Details siehe Siemon et al., 2019b). Die 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 werden für die Halbraumparameter jeder Messfrequenz sowie für ausgewählte Tiefenschnitte (abgegriffen aus den spezifischen Widerständen der 1D-Inversionsmodelle) produziert (siehe verwendete Gridparameter in **Anhang III.2**). 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 wurde auch eine eigene Karte erstellt. Die Vertikalsektionen werden für jede Fluglinie produziert. Sie zeigen die nebeneinander gestellten Säulen (Breite knapp 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. (2019b) entnommen werden.

### 5.2.1 Kalibrierung

Die HEM-Daten bei der Befliegung Gnarrenburg wurden mit einem RESOLVE-System (BKS60, SYS34) bei fünf Messfrequenzen in horizontal-koplanarer (HCP) und bei einer Messfrequenz in vertikal-koaxialer (VCX) Spulenanordnung erfasst (**Tabelle 3**). Für die Kontrolle der Kalibrierung der HEM-Daten waren mehrere Maßnahmen erforderlich. In einem ersten Schritt wurden die vom Hersteller der Flugsonde gelieferten Kalibrierfaktoren (ICA-Werte) über relativ gut bekanntem Untergrund überprüft und angepasst. Hierzu wurde am 17.09.2021 entlang der Fahrrinne der Jade nördlich von Wilhelmshaven bei Flut ein Messflug mit dem verwendeten HEM-Messsystem durchgeführt. Dieser Bereich mit großen Wassertiefen (>15 m) stellt einen nahezu homogenen Untergrund dar, wobei ein spezifischer Widerstand

des Meerwassers von  $\rho_w = 0,22 \Omega\text{m}$  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  $\approx \rho_w$ , scheinbare Tiefe  $\approx 0$  m) angenähert wurden. Aufgrund technischer Probleme konnte die Überprüfung der Kalibrierung bei einer Messfrequenz (EM5,  $f = 1,8$  kHz) nicht durchgeführt werden. Größere Korrekturen in der Amplitude ( $>5\%$ ) waren bei den mittleren Messfrequenzen und in der Phase ( $>1^\circ$ ) bei der höchsten und der niedrigsten Messfrequenz erforderlich (**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 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 fehlerbehaftet sein können.

In einem zweiten Schritt wurden flugspezifische Nachkorrekturen bestimmt. Diese sind oft notwendig, wenn die automatische Kalibrierung des HEM-Systems zu Beginn eines Messfluges gestört ist, z. B. durch externe elektromagnetische Felder. Für diese Nachkorrekturen wurden die HEM-Daten einer Referenzlinie im Detailgebiet 2 genutzt, die bei jedem Messflug überflogen wurde. Diese etwa 4,7 km lange Testlinie entspricht der Fluglinie T209.9. Durch Vergleich der Halbraumparameter von verschiedenen Flügen und Messfrequenzen auf Basis der Korrekturwerte aus **Tabelle 3** zeigte sich, dass insbesondere bei der höchsten Messfrequenz (EM4) Nachkorrekturen für jeden Messflug erforderlich waren (Mittelwerte siehe **Tabelle 4**).

**Tabelle 3.** Kalibrierwerte für das HEM-System BKS60 ermittelt über der Jade-Fahrrinne am 17.09.2021.

(\*): Aufgrund des Ausfalls von EM5 wurden zunächst keine Korrekturwerte angesetzt.

	Frequenz [Hz]	Spulenabstand [m]	Spulen-anordnung	ICA-Werte [ppm]	Korrekturwerte	
					Amplitude [ ]	Phase [°]
EM3	380	7,918	HCP	-217	0,96	2,0
EM5	1.770	7,912	HCP	-211	1,00*	0,0*
EM6	5.417	9,042	VCX	80	1,06	0,3
EM2	8.320	7,957	HCP	-210	1,11	-1,0
EM1	40.835	8,020	HCP	-619	1,05	0,3
EM4	133.528	7,906	HCP	-543	0,99	4,5

Im letzten Schritt wurden Inversionsmodelle im gesamten Messgebiet betrachtet, um verbliebene, frequenzspezifische Abweichungen zu erkennen und durch Anpassung der Kalibrierfaktoren zu korrigieren. Hierzu wurden zunächst stark geglättete Inversionsmodelle mit sechs Schichten berechnet. Die zugehörigen Modelldaten wurden mit den für die Inversion verwendeten HEM-Daten verglichen und mittlere Abweichungen bestimmt, die multiplikativ bzw. additiv an Amplitude bzw. Phase der bereits nachkorrigierten Kalibrierwerte angebracht wurden. In diesen finalen Korrekturwerten traten die deutlichsten Abweichungen (der Mittelwerte) sowie die größten Schwankungen von Flug zu Flug (Standardabweichungen) in den Phasenwerten auf (siehe **Tabelle 4** und Korrekturwerte für Kalibrierfaktoren in **Anhang III.2**).

**Tabelle 4.** Angepasste mittlere Kalibrierwerte plus Standardabweichung für das HEM-System BKS60, ermittelt aus Vergleich der Halbraumparameter entlang der Testlinie bzw. über glatte Inversionsmodelle.

	Halbraumparameter Testlinie		Inversionsmodelle Gesamtgebiet	
	Amplitude [ ]	Phase [°]	Amplitude [ ]	Phase [°]
EM3	0,96 ± 0,00	2,00 ± 0,00	0,94 ± 0,03	6,97 ± 0,82
EM5	1,00 ± 0,00	-0,73 ± 0,79	1,00 ± 0,02	-1,59 ± 0,64
EM6	1,06 ± 0,01	0,35 ± 0,38	0,99 ± 0,02	2,23 ± 0,48
EM2	1,13 ± 0,01	-1,15 ± 0,39	1,14 ± 0,01	-0,90 ± 0,39
EM1	1,07 ± 0,01	-0,62 ± 0,12	1,08 ± 0,01	0,02 ± 0,08
EM4	0,99 ± 0,02	-3,65 ± 2,03	0,99 ± 0,01	-2,92 ± 2,08

## 5.2.2 Niveaurektur

Die Niveaurektur 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 (Halbraumwiderstand und scheinbare Tiefe) produziert und die Stützstellen zu auffälligen Linienabschnitten nachjustiert, indem die HEM-Daten der jeweiligen Frequenzen an den Stützstellen so gesetzt wurden, dass die zugehörigen Halbraumparameter in den betroffenen Profil- und Kartenausschnitten besser zur Umgebung passten. Schließlich wurde die statistische Niveaurektur durchgeführt, indem zunächst die Halbraumparameter aneinander angeglichen und die daraus resultierenden synthetischen HEM-Daten (Modelldaten) als Basis für die Niveaurektur der Messdaten verwendet wurden (HSP- und IQ-Levelling, siehe Siemon et al. (2019b) und Prozessierungsparameter in **Anhang III.2**). Hierbei wurden zwei Linien (L35.1 und L36.1) aus der statistischen Niveaurektur (*Microlevelling*) ausgeschlossen und stattdessen wie Kontrollprofile behandelt, da die HEM-Daten zu stark von einem parallel verlaufenden Straßendorf (Augustendorf) beeinflusst waren. Manuelle Nachkorrekturen durch Rücknahmen bzw. Anpassungen der automatischen Korrekturen erfolgten an einigen Stellen, an denen aufgrund von linienparallelen, natürlichen Strukturen zu stark beim HSP-Levelling korrigiert wurde. Den Abschluss der Niveaurektur 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, was hier aber nicht zwingend erforderlich war.

Bei der statistischen Niveaurektur der HEM-Daten der Befliegung Gnarrenburg bestand eine erhöhte Schwierigkeit, da die Messflüge blockweise durchgeführt wurden, d. h. benachbarte Fluglinien gehörten meist zu einem Messflug. Daher waren flugspezifische Kalibrierfehler und linienspezifische Niveaufehler schwerer zu unterscheiden und nicht automatisch zu korrigieren. Folglich mussten die flugspezifischen Korrekturen manuell (siehe **Kapitel 5.2.2**) vor der statistischen Niveaurektur vorgenommen werden.



### 5.2.3 Korrektur von anthropogenen Effekten

Kleine anthropogene Effekte, die sich in der Größenordnung des Datenrauschen befinden, wurden durch eine Filterung der Daten unterdrückt, 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 den Prozessierungsparametern in **Anhang III.2** aufgelistet. Diese stellen einen Kompromiss zwischen der Unterdrückung von ungewünschten (Rauschen, anthropogene Effekten) und dem Erhalt von gewünschten (geogenen) Signalen in den HEM-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., 2019b).

### 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 Ansätze verwendet, um die HEM-Daten zu fünf Messfrequenzen, die alle in HCP-Spulenordnung erfasst wurden, zu invertieren: 1) L6-HEM-Inversion: Modelle mit wenigen (6) Schichten, keine zusätzliche Glättung und freie Modellparameter, 2) L20-HEM-Inversion: Modelle mit vielen (20) Schichten, zusätzliche Glättung 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 erfassen kann, liefert Variante 2 ruhigere Inversionsmodelle, nicht nur vertikal, sondern meist auch lateral. Daher wurden beide Varianten verwendet (Details in Siemon et al. (2019b) und Tabelle mit den Inversionsparametern in **Anhang III.2**).

Im Unterschied zu den in Siemon et al. (2019b) beschriebenen Ansätzen wurden Startmodelle ohne Deckschicht verwendet. Dies lieferte einen glatteren Verlauf der oberen Schichtparameter, d. h. die Unterschiede der ersten zu den nachfolgenden Schichten sind moderater als bei einem Ansatz mit Deckschicht. Als oberste Schichtgrenze wurden im Startmodell Tiefen angesetzt, die auch eine Erkennung der dünnen Torfschichten ermöglichen sollte (50 % bzw. 1 % der Schwerpunktstiefe der höchsten Messfrequenz bei der L6- bzw. L20-HEM-Inversion, aber mindestens 0,2 m). Ferner wurde bei der L20-HEM-Inversion die Glättung verstärkt (Faktor 3,0 statt sonst 2,7–2,8) und die Abbruchschranke auf 5% (statt 10 %) gesetzt. Einige Beispiele zeigen die Abbildungen in **Kapitel 6.2.2**.

**Anhang V.1** und **Anhang V.2** zeigen eine Übersicht der L6- und L20-HEM-Inversionsergebnisse für alle Fluglinien. Darunter ist auch eine Zusammenstellung der Inversionsergebnisse auf den Testlinien im Detailgebiet 2. Diese zeigt, dass sich die Inversionsmodelle zu den bearbeiteten HEM-Daten kaum von Flug zu Flug unterscheiden und somit die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse belegen. Auf der beiliegenden DVD (siehe **Anhang VI**) befinden sich alle Vertikalsektionen.

## 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  $\Delta T$  flächenhaft zu erfassen und darzustellen. Die Quellen der Anomalien können sowohl geogener als auch anthropogener Natur sein.

Die Bearbeitung der Daten mit HmgView08 (BGR-eigenes Programm) erfolgte im Wesentlichen nach einem Standard, der in Siemon et al. (2019b) dokumentiert ist. Die dabei verwendeten Parameter sind in **Anhang III.3** aufgelistet. Die auf die HMG-Daten angewendeten Prozessierungsschritte umfassten: 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, Entfernen anthropogener Anomalien zur Erzeugung einer bereinigten Anomalienkarte und Bandpassfilterung.

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

### 5.3.1 Basisstation

Die auch als Bodenstation bezeichnete Basisstation zur Aufzeichnung des magnetischen Tagesganges befand sich während der Messkampagne am Flugplatz Rotenburg an der Wümme. Während der Datenprozessierung erwies sich die Qualität der Aufzeichnungen der Station als unzureichend. Vermutlich ist dies durch einen magnetisch unruhigen Aufstellungsort bedingt. Es wurden daher die Aufzeichnungen des vom Messgebiet nur etwa 40 km entfernten erdmagnetischen Observatoriums Wingst zur Korrektur des Tagesganges verwendet. Da sich das Observatorium auf der gleichen geografischen Länge wie das Messgebiet befindet, musste keine zeitliche Verschiebung an die Daten angebracht werden. Eine Filterung der Observatoriumsdaten war ebenfalls nicht erforderlich.

### 5.3.2 Sensorlage

Bedingt durch vielfältige magnetische Quellen in der Nähe des Magnetikensors hat die Lage der Flugsonde einen Einfluss auf die registrierten Magnetfelddaten. Ein zweistufiges Verfahren zur Korrektur dieser Einflüsse ist in Siemon et al. (2022) beschrieben. Das gemessene Feld  $T_{\text{mess}}$  lässt sich darstellen als die Summe aus dem unbeeinflussten Feld  $T$  und den beeinflussenden Feldern  $T_1$  und  $T_2$ :

$$T_{\text{mess}} = T + T_1 + T_2$$

$T_1$  beschreibt den Einfluss des Rollwinkels  $R$  (Roll,  $-90...90^\circ$ ) und  $T_2$  den der Flugrichtung  $Y$  (Yaw,  $0...360^\circ$ ) der Flugsonde.  $T_1$  ergibt sich aus der Multiplikation des Rollwinkel  $R$  mit einem Faktor  $R_f$  [ $\text{nT}/^\circ$ ].  $R_f$  ist wiederum vom Yaw-Winkel abhängig:

$$T_1 = R \cdot R_f \quad \text{mit} \quad R_f = \cos(Y + Y_{R0}) \cdot R_{f0} + R_{fa}$$

$Y_{R0}$  [ $^\circ$ ],  $R_{f0}$  [ $\text{nT}/^\circ$ ] und  $R_{fa}$  [ $\text{nT}/^\circ$ ] sind dabei empirisch zu ermittelnde Werte, mit denen die korrigierte Werte der Stufe 1  $T = T_{\text{mess}} - T_1$  am wenigsten durch Rollbewegungen des Birds beeinflusst scheinen.  $T_2$  ergibt sich aus der Flugrichtung  $Y$  [ $^\circ$ ] und den wiederum empirisch ermittelten Größen  $Y_{Y0}$ , [ $^\circ$ ],  $Y_f$  [ $\text{nT}$ ] und  $Y_a$  [ $\text{nT}$ ]:

$$T_2 = \cos(Y + Y_{Y0}) \cdot Y_f + Y_a$$

Die empirische Ermittlung der oben genannten Werte erfolgte über spektrale Vergleiche der Magnetik- und Lagedaten sowie über eine statistische Minimierung von Artefakten in der Anomalienkarte. Weiterhin wurde ein zeitlicher Versatz in den Aufzeichnungen der Magnetik- und Lagedaten (Lag) beobachtet und bei den Auswertungen entsprechend berücksichtigt. Die finalen Werte für T ergaben sich aus  $T = T_{\text{mess}} - T_1 - T_2$ . Die verwendeten Parameter für die Flugsonde BKS60 sind in **Tabelle 5** aufgelistet.

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

**Tabelle 5.** Parameter der Sensorlagekorrektur (BKS60).

Parameter	Wert
Lag	-17
$Y_{R0}$	45°
$R_{f0}$	-0,02 nT/°
$R_{fa}$	-0,05 nT/°
$Y_{Y0}$	-90°
$Y_f$	1 nT
$Y_a$	-1 nT

### 5.3.3 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 wurde im Anschluss wieder entlang der Fluglinien abgetastet und die folgende Auswertung an der resultierenden RTP-Spur vorgenommen.

### 5.3.4 Bandpass-Filterung

In einem weiteren Schritt wurden anthropogene Anomalien so gut wie möglich aus den  $\Delta T$ -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 (siehe **Kapitel 6.3**).

## 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 mit HrdView123 (BGR-eigenes Programm) erfolgte nach einem Standard, der in Siemon et al. (2019b) 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 wurden Karten der (Äquivalent-)Gehalte von Kalium, Uran und Thorium sowie der Ionendosisleistung im Boden und der Gesamtstrahlung erstellt (siehe **Anhang IV.5**). Darauf wurden die Datenpunkte auf den Fluglinien (schwarz) dargestellt. Details können der jeweiligen Legende sowie Siemon et al. (2019b) entnommen werden.

### 5.4.1 Geogene und anthropogene Einflüsse

Innerhalb des Messgebietes Gnarrenburg befinden sich einige Waldstücke, deren Biomasse die gemessene Strahlungsintensität verringert. Eine Korrektur dieses Effektes wurde wie in Siemon et al. (2019b) beschrieben vorgenommen. Die dabei verwendeten Abschwächungskoeffizienten wurden empirisch ermittelt (siehe Tabelle in **Anhang III.4**).

Ferner ist das Messgebiet von zahlreichen Infrastrukturelementen (Straßen, Siedlungen) durchzogen, deren gammaspektrometrisches Signal die Information über den geologischen Untergrund überdecken kann. Neben der Ortschaft Gnarrenburg treten insbesondere Straßen, die durch das Moorgebiet verlaufen, als deutliche positive Anomalien im ansonsten strahlungsarmen Moor hervor. Um einen Eindruck von der Verteilung der Strahlungswerte unter Auslassung der anthropogenen Quellen zu erhalten, wurde ein Satz korrigierter Strahlungsdaten erstellt. Dazu wurden die Fluglinienabschnitte, die durch die anthropogenen Quellen beeinflusst sind markiert, die zugehörigen Datenbereiche gelöscht und neue Gitter erstellt, bei denen gelöschte Datenbereiche durch Interpolation weitgehend geschlossen wurden (siehe **Kapitel 6.4**).

### 5.4.2 Bodenfeuchtekorrektur

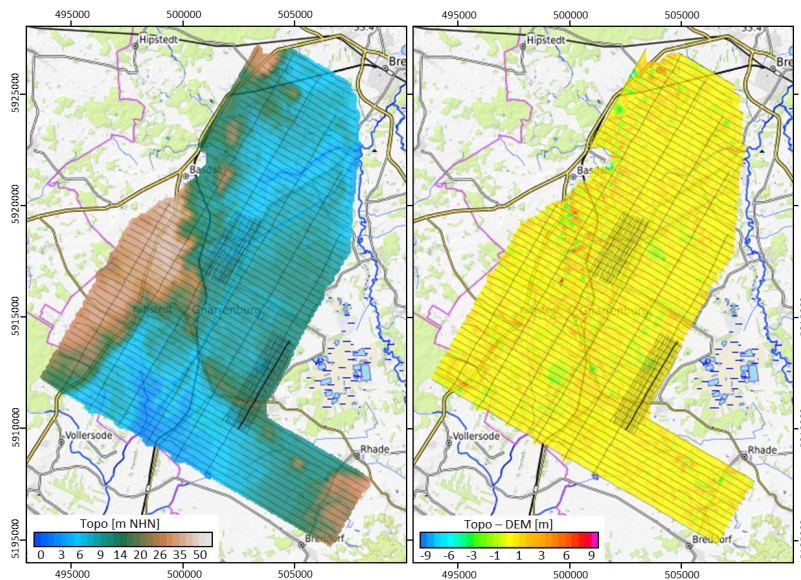
Zur Untersuchung dieses Aspektes wurde ein in Siemon et al. (2019b) beschriebenes statistisches Verfahren (Tieline-Levelling) durchgeführt. Im Ergebnis zeigten sich keine statistisch signifikanten Niveauunterschiede in den Strahlungsintensitäten der verschiedenen Flüge. Es brauchte daher keine Bodenfeuchtekorrektur durchgeführt zu werden.

## 6 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der prozessierten Positionsdaten sowie der Daten der eingesetzten drei aerogeophysikalischen Methoden zunächst vorgestellt und später mit externen Daten verglichen. Ergebniskarten und -schnitte befinden sich in verkleinerter Form im **Anhang IV–V** sowie im Originalmaßstab auf der beiliegenden DVD (Inhalt siehe **Kapitel 7** sowie **Anhang VI**).

### 6.1 Positionsdaten

Die Anbringung der Korrekturen an die Positionsdaten ermöglichte eine genauere Ableitung der Geländehöhe aus den Flugdaten (Topo, **Abbildung 3, links**), sodass die Unterschiede zu dem verwendeten DEM (Topo - DEM) meist unterhalb von  $\pm 1$  m liegen (**Abbildung 3, rechts**), sofern keine verbliebenen Einflüsse von Bewuchs bzw. Bebauung oder nachträgliche (bezogen auf die letzte Aktualisierung des verwendeten DEM) Geländeänderungen vorliegen. Die größten negativen Abweichungen zwischen der abgeleiteten Geländehöhe und dem verwendeten DEM treten im Bereich von Abbaufächen (Steinbrüche, Torfabbaugebiete im Moor) auf. Erhöhte Werte korrelieren oft mit bebauten Gebieten bzw. Aufschüttungen. Anzumerken ist, dass größere Unterschiede ( $> \pm 1$  m) auch zwischen den Fluglinien existieren, wo die Topo-Werte interpoliert worden sind. Die verwendeten Bearbeitungsparameter sind in **Anhang III.1** aufgelistet.



**Abbildung 3.** Karten der Geländehöhen (Topo) abgeleitet aus den Flugsondendaten (links) und Abweichungen der Topo-Werte zum verwendeten Geländehöhenmodell DEM (rechts). Hintergrund: OpenTopoMap.

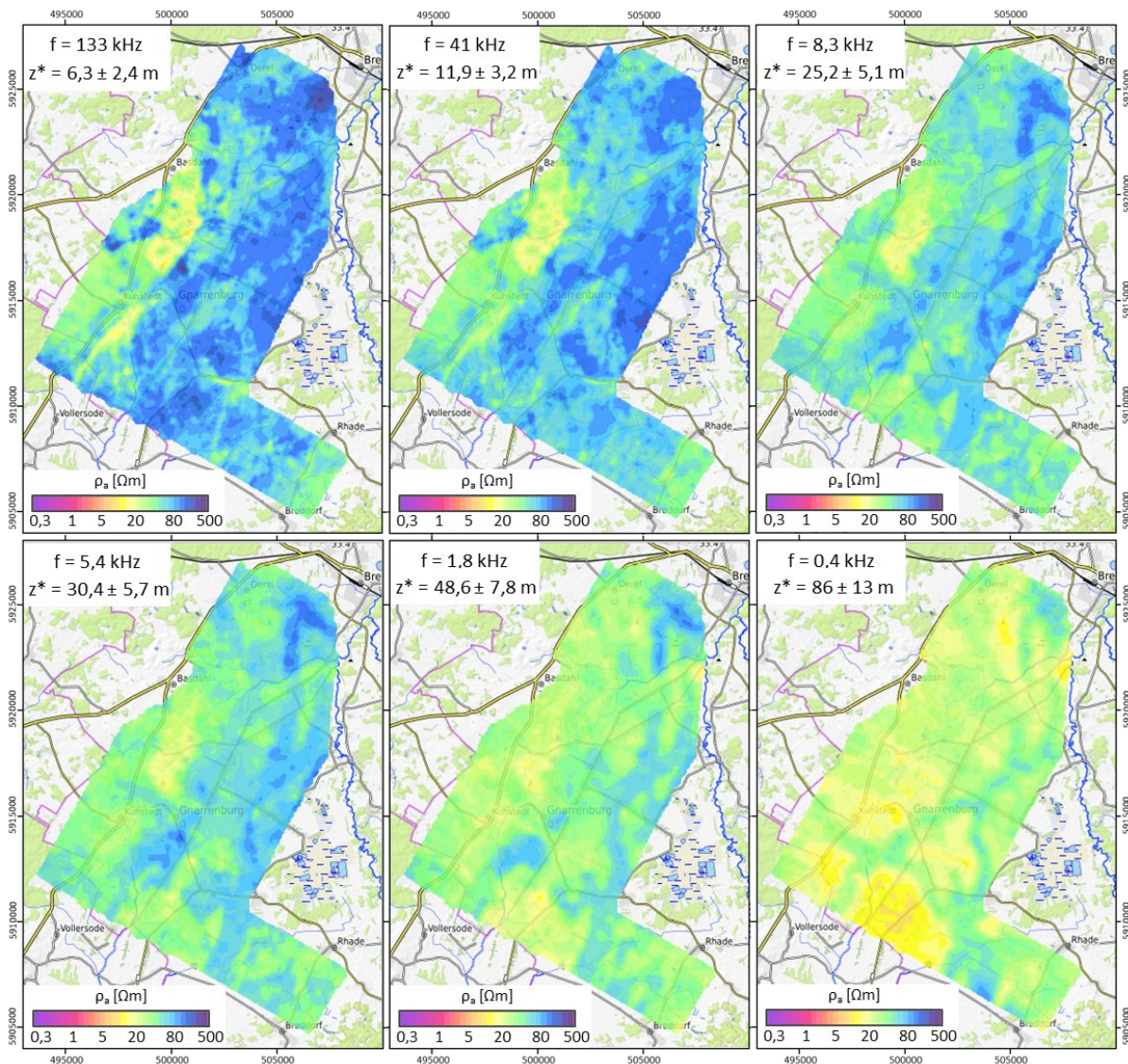
### 6.2 Elektromagnetik

Mit der Elektromagnetik sollten vor allem Ergebnisse für eine regionale Moorerkundung erzielt werden. Darüber hinaus liefern diese Daten aber auch Informationen über größere Tiefen (bis etwa 100 m). Hierzu können die Erfassung des aktuellen Grundwasserstandes, die Mineralisation des Grundwassers, die Ausweisung der Grundwasserleiter und -stauer sowie die Kartierung von quartären Rinnensystemen zählen.

Die Ergebniskarten der Elektromagnetik, die die Halbraumparameter zu jeder Messfrequenz sowie die spezifischen Widerstände in ausgewählten Tiefen zeigen, befinden sich in **Anhang IV.3**. Die auf den 1D-Inversionsmodellen mit sechs bzw. zwanzig Schichten basierenden Vertikalschnitte entlang aller Fluglinien an mit insgesamt 206.972 Datenpunkten sind in **Anhang V.1-2** zusammengefasst.

## 6.2.1 Generelle Ergebnisse

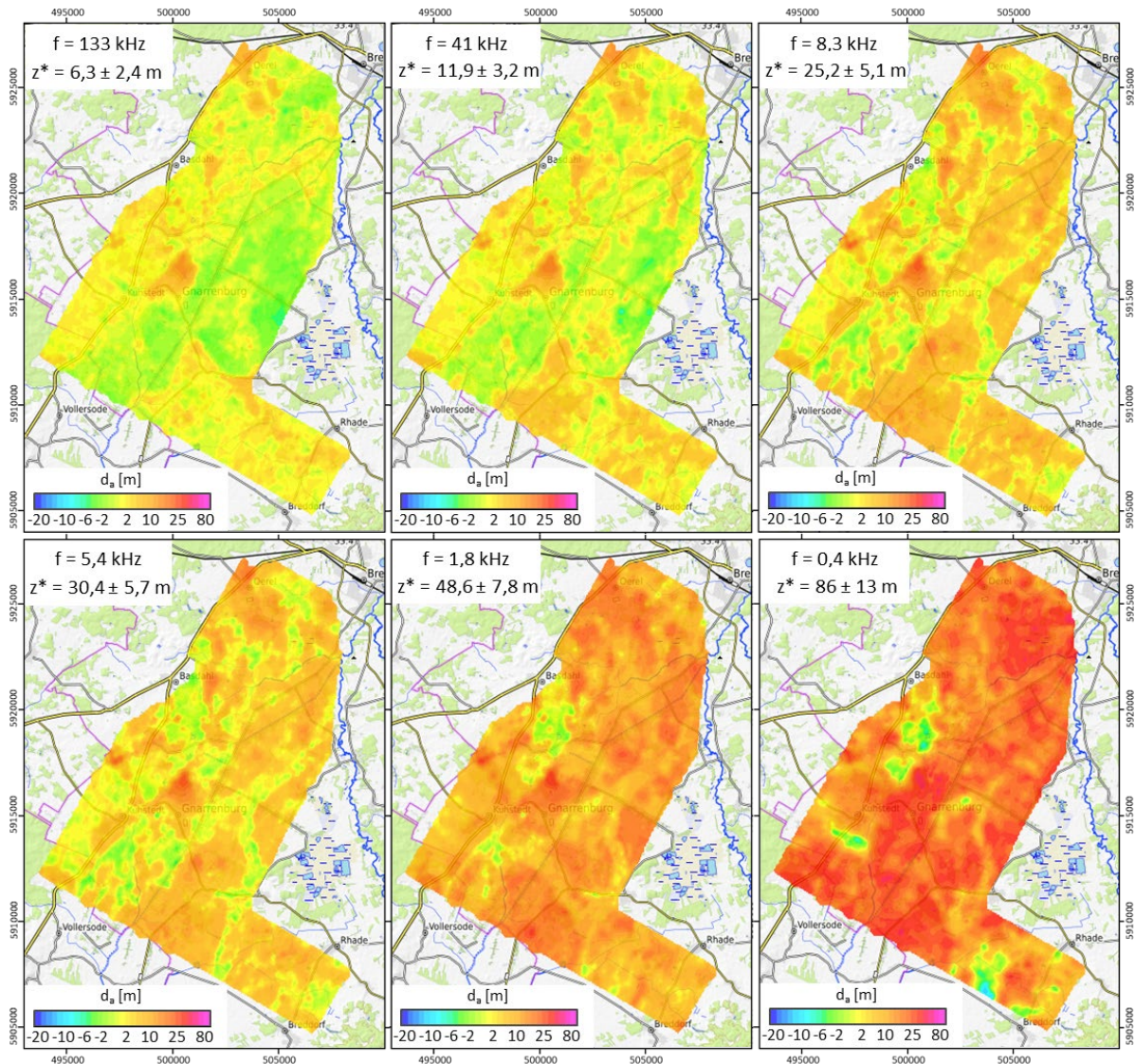
Die Darstellung der Halbraumparameter ermöglicht einen ersten Überblick über die Leitfähigkeitsstrukturen im Messgebiet. Die **Abbildungen 4-5** zeigen für alle Messfrequenzen ( $f = 133\text{--}0,4\text{ kHz}$ ) die Karten der scheinbaren spezifischen Widerstände (Halbraumwiderstände) sowie der scheinbaren Tiefen. Mit abnehmender Frequenz werden Strukturen in zunehmender Tiefe abgebildet.



**Abbildung 4.** Karten der Halbraumwiderstände  $\rho_a$  bei den Messfrequenzen  $f$  mit Angaben der Mittelwerte und Standardabweichungen der Schwerpunktstiefen  $z^*$  (Hintergrund: OpenTopoMap).

Die zugehörigen Schwerpunktstiefen sind abhängig von der Messfrequenz und den jeweiligen Halbraumwiderständen. Die Mittelwerte ( $\pm$  Standardabweichungen) liegen etwa bei 4–9 m ( $f = 133\text{ kHz}$ ), 9–15 m ( $f = 41\text{ kHz}$ ), 20–30 m ( $f = 8,4\text{ kHz}$ ), 25–36 m ( $f = 5,4\text{ kHz}$ ), 41–56 m ( $f = 1,8\text{ kHz}$ ) und 73–99 m

( $f = 0,4 \text{ kHz}$ ). Erfahrungsgemäß (Siemon et al., 2020b) zeigen sich hohe Halbraumwiderstände in vorwiegend sandigen Gebieten mit schwach mineralisiertem Grundwasser (blaue Farben,  $\rho_a > 50 \Omega\text{m}$ ). Bei tonhaltigen Sedimenten oder torfhaltigen Böden treten meist geringere Halbraumwiderstände auf (orange bis grüne Farben,  $\rho_a = 10\text{--}50 \Omega\text{m}$ ). Generell nehmen die Halbraumwiderstände mit der Tiefe ab, während die scheinbaren Tiefen zunehmen.



**Abbildung 5.** Karten der scheinbaren Tiefen  $d_a$  bei den Messfrequenzen  $f$  mit Angaben der Mittelwerte und Standardabweichungen der Schwerpunkstiefen  $z^*$  (Hintergrund: OpenTopoMap).

Bei den niedrigeren Messfrequenzen zeichnen sich etliche langgezogene Strukturen mit erhöhten Halbraumwiderständen bzw. verringerten scheinbaren Tiefen ab, insbesondere in der östlichen Hälfte des Messgebietes. Diese Strukturen könnten Hinweise auf ehemalige Flussläufe (quartäre Rinnen) sein.

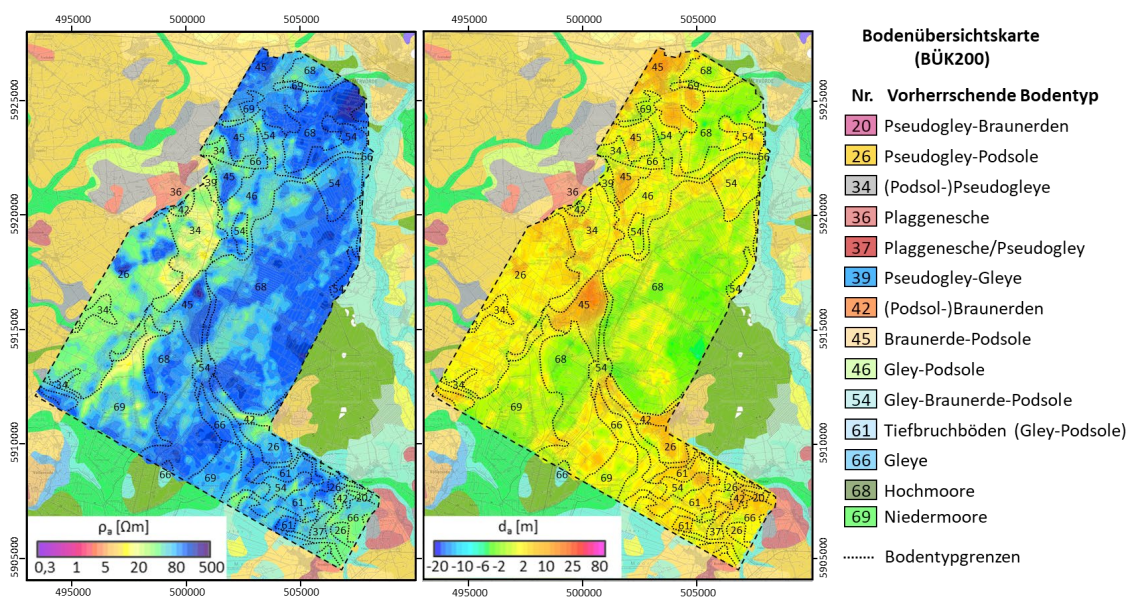
Die scheinbaren Tiefen sind bei den hohen Frequenzen großflächig negativ, was auf eine besser leitende Deckschicht (z. B. Torf) hindeutet, sowie stellenweise deutlich positiv, was typisch für sandige Deckschichten ist.

Eine hohe Mineralisierung des Grundwassers, das in den Niederungen oberflächennah ansteht, ist nicht zu erkennen, da sich diese in **Abbildung 4** durch eher rötliche Farben ( $\rho_a < 5 \Omega\text{m}$ ) abzeichnen würde. Die bei der niedrigsten Messfrequenz in orange erscheinenden niedrigen Halbraumwiderstände ( $\rho_a = 5\text{--}20 \Omega\text{m}$ ) sind wohl eher auf tonhaltige Sedimente zurückzuführen. Dies ist in Übereinstimmung mit Daten zur Grundwasserbeschaffenheit des LBEG, die erhöhte Mineralisation des Grundwassers im Messgebiet Gnarrenburg erst unterhalb von 100 m Tiefe anzeigen (NIBIS Kartenserver, Grundwasserbeschaffenheit).

## 6.2.2 Vergleich mit Lithologie und Bodentypen

Die Deutung der generellen HEM-Ergebnisse basierte auf Erfahrungen aus anderen Messgebieten. Hier erfolgt nun ein Vergleich mit weiteren geowissenschaftlichen Informationen aus dem Messgebiet. Hierzu werden geologische und bodenkundliche Karten sowie Bohrungsinformationen des LBEG (NIBIS Kartenserver) hinzugezogen. Für erste Vergleiche mit den aerogeophysikalischen Ergebnissen werden die Übersichtskarten GÜK500 (NLfB, 2000) und die BÜK200 (BGR, 2018) verwendet, da diese die generellen Strukturen im Messgebiet übersichtlich in nicht zu großer Detailfülle anzeigen (**Abbildung 2**).

Die Karten (GÜK500, BÜK200) bilden den oberflächennahen Erduntergrund ab. Daher werden zunächst die HEM-Ergebnisse der höchsten Messfrequenz ( $f = 133 \text{ kHz}$ ) betrachtet und der Bodenübersichtskarte (BÜK200) gegenübergestellt (**Abbildung 6**).



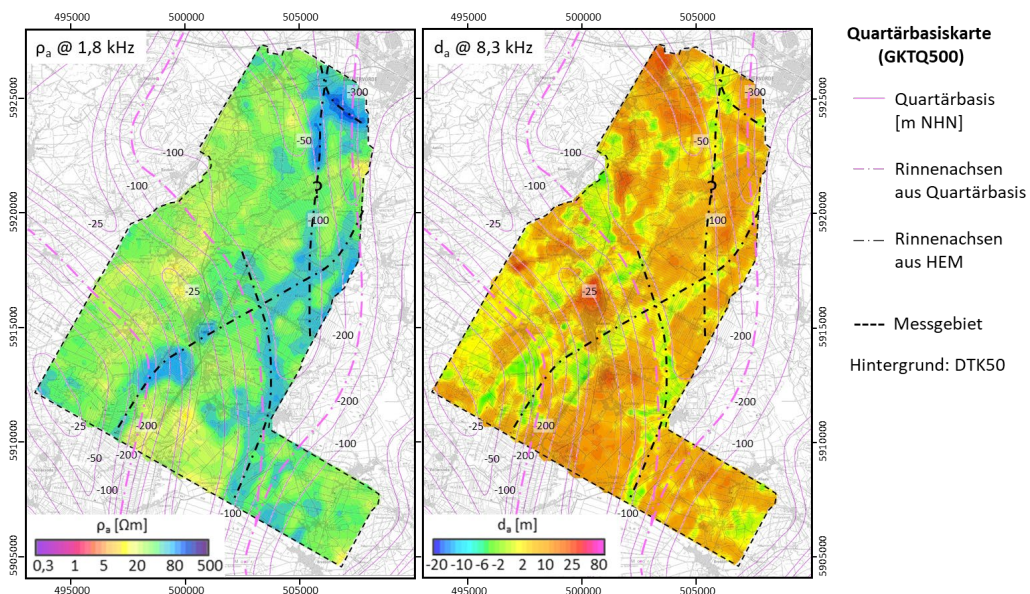
**Abbildung 6.** Karten der Halbraumwiderstände  $\rho_a$  (links) und scheinbare Tiefen  $d_a$  (rechts) bei der höchsten Messfrequenz ( $f = 133 \text{ kHz}$ ) über BÜK200 (Hintergrund: DTK50).

Die Halbraumwiderstände erscheinen in Gebieten mit Pseudogleyen gegenüber den anderen Gebieten verringert zu sein, was vermutlich mit den darunterliegenden Schluffen (auch Geschiebelehm) und Tone (Lauenburger Ton) in Zusammenhang steht (siehe BÜK500 in **Abbildung 2**, links). Jedoch heben sich die Moorbereiche nicht klar von den sie umgebenden Sedimenten ab. Anders sieht es bei den scheinbaren Tiefen aus. Dort unterscheiden sich die Moorgebiete häufig deutlich durch kleinere (negative) Werte von den anderen Gebieten (insbesondere denen mit Podsol-Braunerden), die sich teilweise sogar scharf abgrenzen lassen. Dies ist plausibel, da die Halbraumwiderstände den Raum unterhalb einer Deckschicht (Torf) widerspiegeln, während die scheinbaren Tiefen eher die Veränderungen anzeigen ( $d_a < 0$ : gutleitende Deckschicht, z. B. Torf oder tonige Sedimente über Sand,  $d_a > 0$ : schlechtleitende Deckschicht, z. B.



Sand über Schluff/Ton, trockene über feuchten Sedimenten). Entscheidend ist die Lage der Schwerpunkstiefe bezüglich der Schichtungen im Erduntergrund. Selbst bei der höchsten Messfrequenz liegt diese im Messgebiet generell unterhalb der in den geologischen und bodenkundlichen Karten betrachteten Tiefen sowie auch unterhalb der Moorbasis. Daher hat nicht nur der in den genannten Karten abgebildete Bereich an der Erdoberfläche Einfluss auf die HEM-Daten, sondern auch der darunterliegende Bereich, bis zu etwa der doppelten Schwerpunkstiefe.

In den **Abbildungen 4–5** ist bereits zu sehen gewesen, dass in größerer Tiefe Linearstrukturen existieren. **Abbildung 7** zeigt nun Karten des scheinbaren spezifischen Widerstandes und der scheinbaren Tiefe im Vergleich zur Quartärbasis (Kuster & Meyer, 1995; LBEG, 2010). Ausgewählt ist jeweils eine Karte, bei der die Strukturen am besten zu sehen sind. Auch wenn die Übereinstimmung mit der Quartärbasiskarte nicht überall offensichtlich ist, scheinen die meist S–N verlaufenden Linearstrukturen auf alte Flussläufe hinzuweisen, die sich auch kreuzen können. Hier ist zu beachten, dass die Quartärbasiskarte im Wesentlichen auf Bohrungen beruht, die teilweise weit auseinanderliegen.



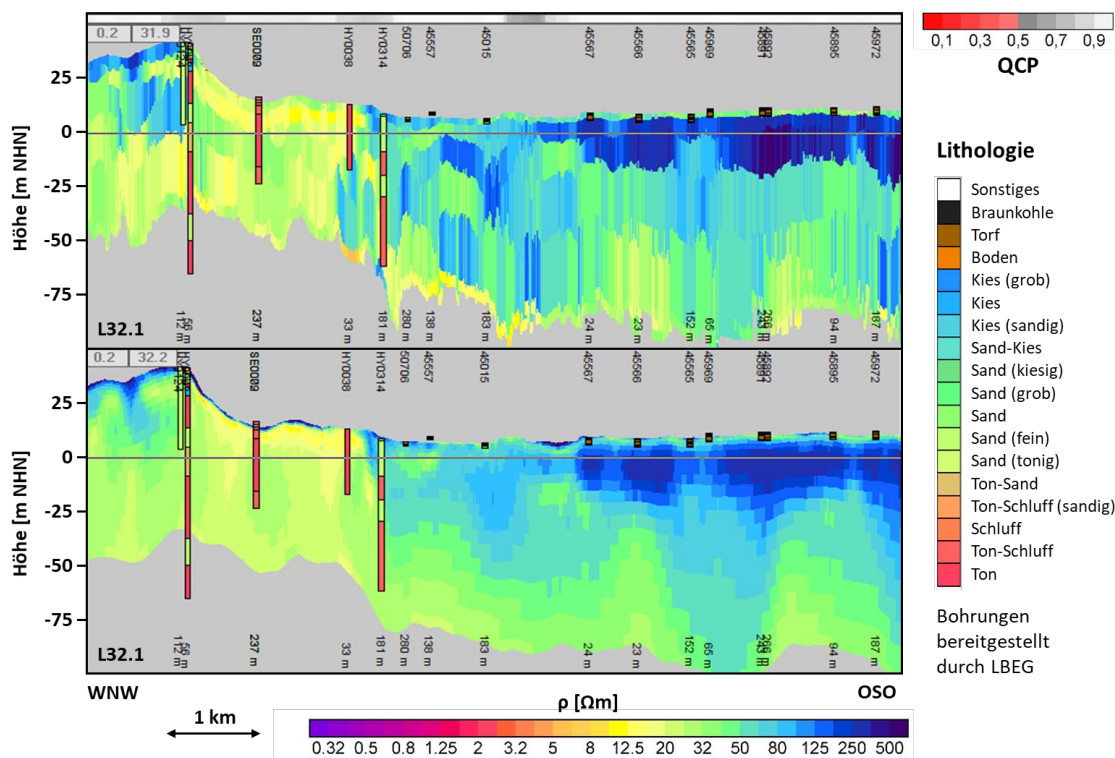
**Abbildung 7.** Karten der Halbraumwiderstände  $\rho_a$  (links) bei Messfrequenz von 1,8 kHz und scheinbare Tiefen  $d_a$  (rechts) bei 8,3 kHz mit Quartärbasiskarte (Kuster und Meyer, 1995) auf DTK50.

Für die den **Abbildungen 4–5** dargestellten Halbraumparameter sowie für die Schwerpunkstiefe sind in **Anhang IV.3** Karten in einem speziellen Blattschnitt und mit einer ausführlichen Legende abgelegt. Ferner liegt dort auch eine Karte, die einen Parameter für die HEM-Datenqualität (QCP) darstellt.

Für die weitere Beurteilung der HEM-Signaturen bezüglich der auch tiefer liegenden Lithologie werden in den folgenden Abbildungen HEM-Inversionsmodelle zusammen mit einigen Bohrungen des LBEG betrachtet. Jedoch gibt es im Messgebiet nicht viele Bohrungen, die den vollen Tiefenbereich der HEM-Modelle abdecken. Ferner liegt ein erheblicher Teil dieser Bohrungen in oder in der Nähe von Ortschaften, wo die HEM-Daten aufgrund der anthropogenen Effekte meist interpoliert werden mussten. Somit war eine statistische Untersuchung der Korrelation von spezifischen Widerständen und Lithologie nicht möglich. Stattdessen wurde längs von etwa 9 km langen WNW–OSO-Fluglinien (mit je ca. 2200 Modellen) eine exemplarische Betrachtung durchgeführt. Die Linie L32.1 (**Abbildung 8**) verläuft von östlich von Volkmarst bis südlich von Heinrichsdorf und die Linie L48.2 (**Abbildung 9**) von westlich von Kuhstedt bis nach Glinstedt. Die Abbildungen zeigen sowohl die Inversionsergebnisse mit wenigen (6) als auch vielen (20) Modellschichten sowie die vom LBEG bereitgestellten Bohrungen, deren Abstand von der

Fluglinie weniger als 300 m beträgt. Da die Bohrsäulen auf die Fluglinie projiziert wurden, kann die Bohransatzhöhe bei bewegter Topografie auch ober- oder unterhalb der dargestellten Geländeoberfläche längs der Fluglinie liegen.

Beide Inversionsansätze lieferten ähnliche Ergebnisse, wobei die L6-Inversion häufig stufiger und lateral unruhiger erscheint. Die Vergleiche bestätigen, dass im Westen nicht nur nahe der Erdoberfläche, sondern auch in größeren Tiefen tonige Sedimente die niedrigen spezifischen Widerstände verursachen könnten. Im Zentrum und im Osten dominieren im oberen Bereich (bis etwa -10 m NHN) hohe spezifische Widerstände, die offensichtlich durch überwiegend sandige Sedimente hervorgerufen werden. Jedoch sind ober- und stellenweise auch unterhalb davon niedrigere spezifische Widerstände zu beobachten. An der Oberfläche korrelieren diese mit Torf, in größere Tiefe mit tonigen Sedimenten, die jedoch nur auf benachbarten Linien durch Bohrungen nachgewiesen werden konnten. Bemerkenswert ist zudem, dass die Tiefenlage des Übergangs von sandigen zu tonigen Sedimenten variiert und – wie in den Karten (**Abbildung 7**) bereits zu sehen war – auf Rinnenstrukturen hinweist.



**Abbildung 8.** Beispiel für Vertikalsektionen (etwa 20-fach überhöht) der L6- (oben) und L20-HEM-Inversionen entlang der Fluglinie L32.1 mit Datenqualitätsparameter (QCP) und Lithologie (Bohrsäulen). Die Darstellung der Mächtigkeit der letzten Schicht (Halbraum) ist willkürlich (hier: 5 m).

Auf Basis der L20-HEM-Inversionsmodelle sind zehn Tiefenschnitte für die spezifischen Widerstände bei 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60 und 80 m unter Geländeoberkante (GOK) erstellt und in **Anhang IV.3** abgelegt worden. Die Beispiele für 1 und 40 m unter GOK sind in **Abbildung 10** dargestellt, zusammen mit Grenzen der Bodentypen (siehe **Abbildung 6**) bzw. den Rinnenachsen (siehe **Abbildung 7**). Die Bereiche mit geringeren spezifischen Widerständen nahe der Erdoberfläche korrelieren gut mit den Mooregebieten sowie mit tonhaltigen Sedimenten im zentralen Westen des Messgebietes (siehe GÜK500 in **Abbildung 2**, links). Auffällig ist, dass im Bereich der Moore auch höhere spezifische Widerstände zu beobachten sind, die bei bebauten Gebieten bzw. in Torfabbauegebieten auftreten. Die Karte für 40 m unter GOK zeigt generell eine Abnahme der spezifischen Widerstände an, was durch einen höheren Tonanteil zu erklären wäre. Die

meist länglichen Strukturen mit erhöhten spezifischen Widerständen weisen auf Rinnenstrukturen hin. Deren Verlauf passt zu der generellen Richtung der Rinnenachsen der Quartärbasiskarte, jedoch unterscheiden sich beide Rinnensignaturen in der Lage teilweise voneinander.

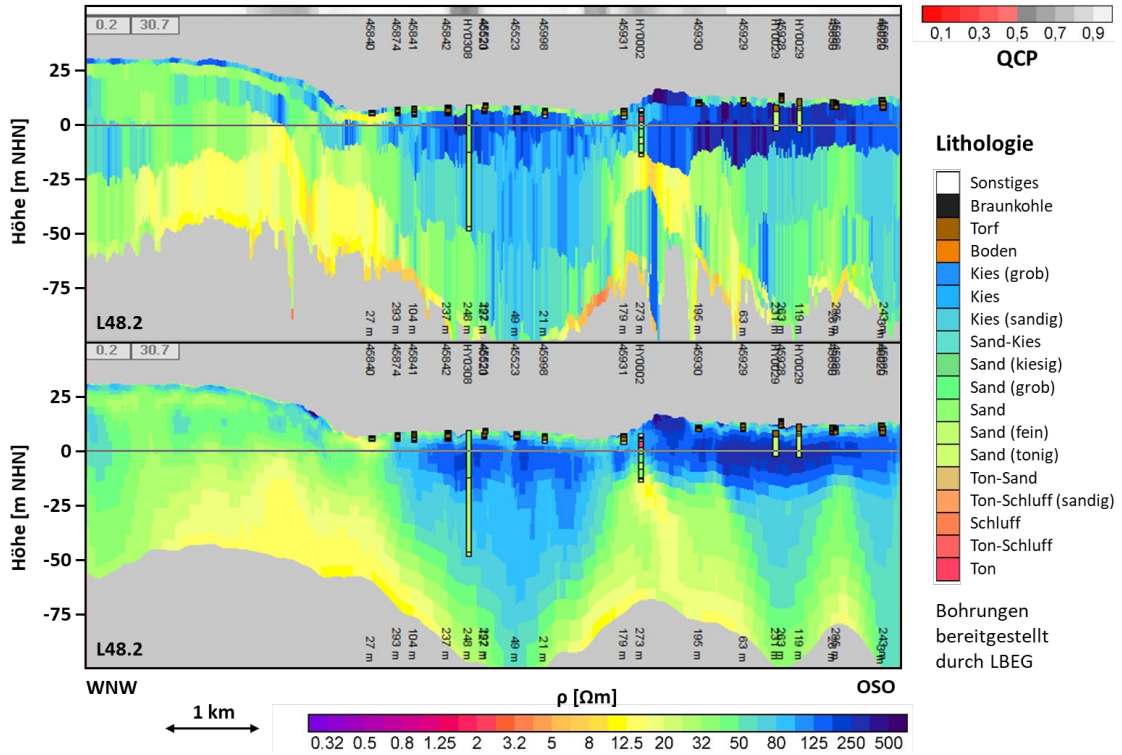


Abbildung 9. Beispiel für Vertikalsektionen (etwa 20-fach überhöht) der L6- (oben) und L20-HEM-Inversionen (unten) entlang der Fluglinie L48.2 mit Datenqualitätsparameter (QCP) und Lithologie (Bohrsäulen). Die Darstellung der Mächtigkeit der letzten Schicht (Halbraum) ist willkürlich (hier: 5 m).

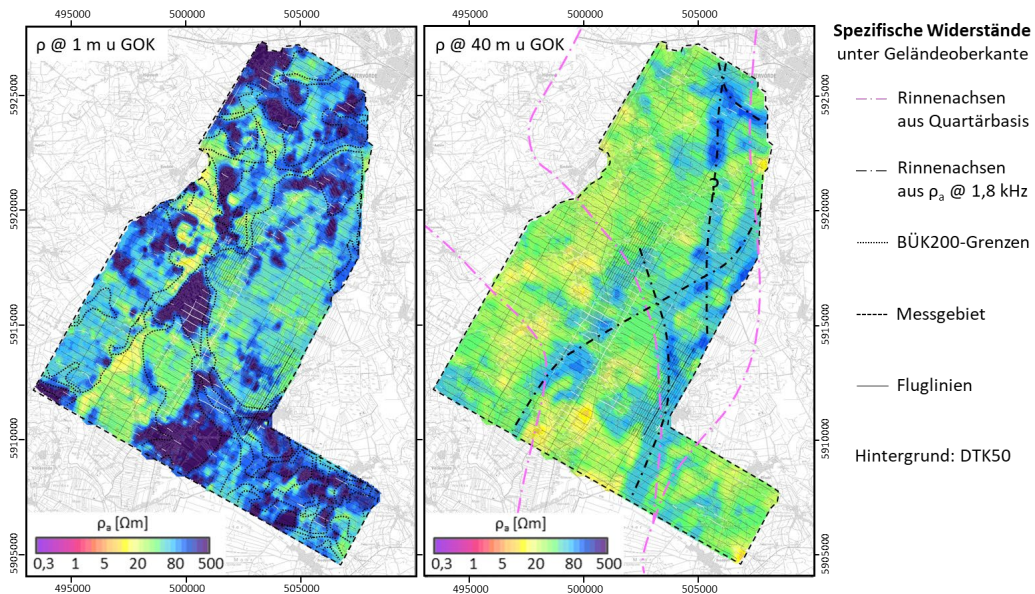


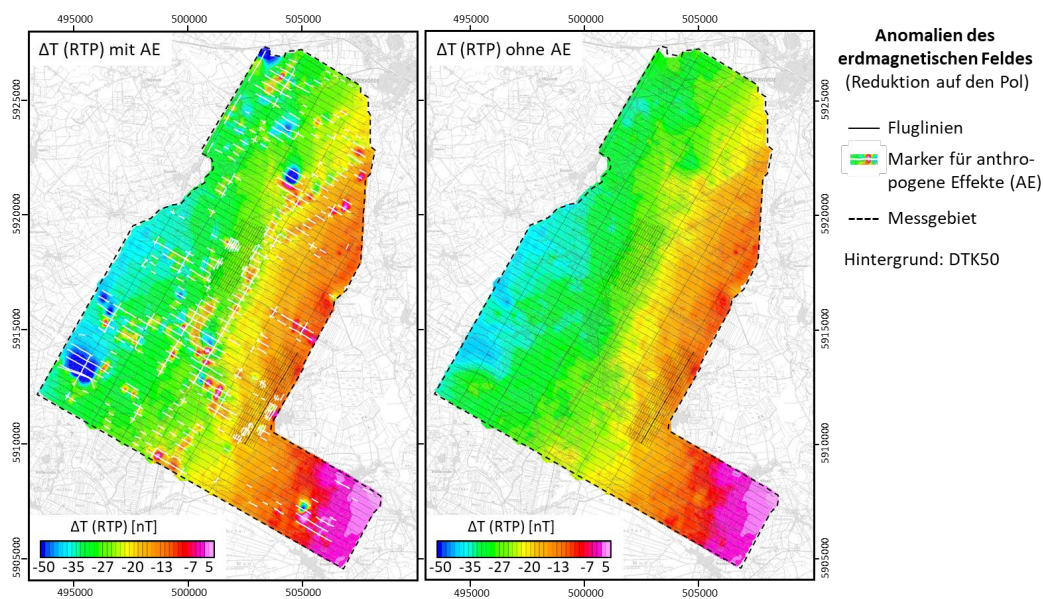
Abbildung 10. Karten der spezifischen Widerstände  $\rho$  in 1 m unter GOK zusammen mit den Grenzen der BÜK200 (links) und in 40 m GOK zusammen mit den Rinnenachsen (rechts) auf DTK50. Überlagert sind die Fluglinien (schwarz), die an Stellen mit schlechter Datenqualität weiß gefärbt sind.

## 6.3 Magnetik

Der Einsatz der Magnetik im Untersuchungsgebiet hatte zum Ziel, etwaige magnetische Signaturen im Einflussbereich des Moores als auch durch Quellen in größeren Tiefen nachzuweisen. Während der erste Punkt bisher nicht beobachtet wurde, 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). Die Ergebnisse der Magnetik befinden sich in Form von Karten der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes (Anomalien- bzw.  $\Delta T$ -Karten) in **Anhang IV.4**. Im Folgenden werden einige Erklärungen und Interpretationshilfen zu diesen Anomalienkarten gegeben.

### 6.3.1 Anthropogene Strukturen

**Abbildung 11** (links) zeigt eine  $\Delta T$ -Karte nach dem Microlevelling und der Reduktion auf den Pol. In der Karte sind solche Fluglinienabschnitte markiert, die in Bereichen größtenteils automatisch identifizierter anthropogener Störquellen am Boden liegen (weiße Markierungen). Hierzu zählen Straßen, Siedlungen und Windparks. Man erkennt, dass sämtliche der deutlich sichtbaren magnetischen Anomalien in die Bereiche der anthropogenen Störquellen fallen.



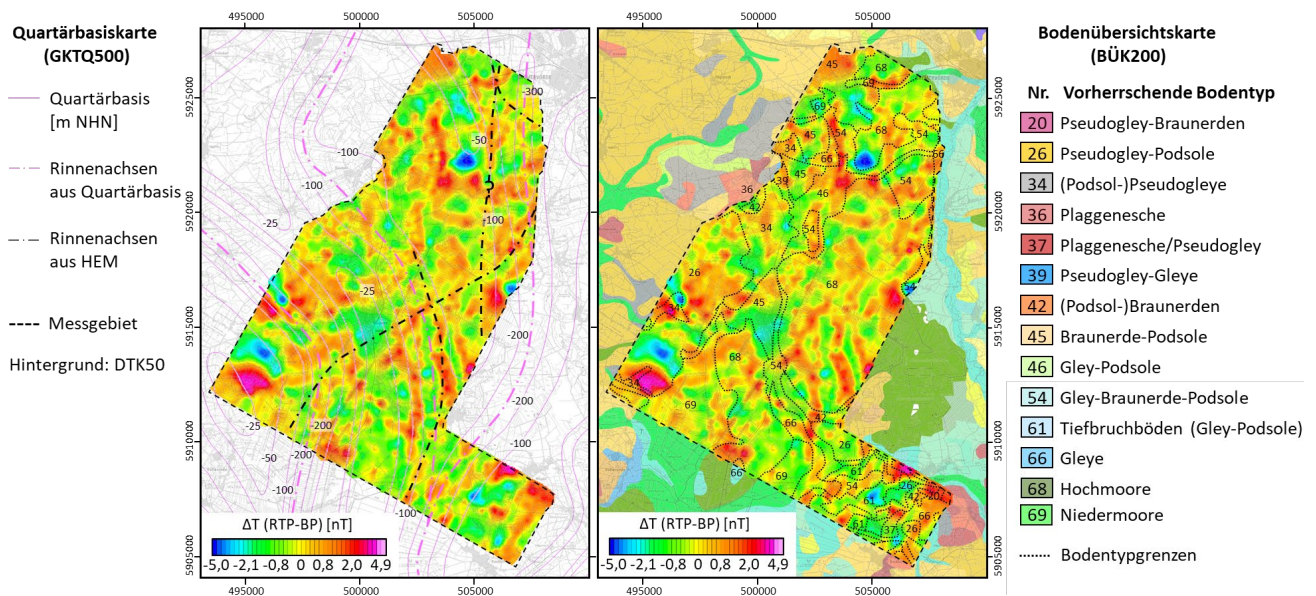
**Abbildung 11.**  $\Delta T$ -Karten (RTP) des Messgebietes mit Fluglinien (schwarz) und Fluglinienabschnitte über anthropogenen Störquellen (weiß). Links mit und rechts ohne anthropogene Effekte (AE). Hintergrund: DTK50.

### 6.3.2 Geogene Strukturen

Um einen Eindruck vom geogen bedingten Anomalienmuster in der  $\Delta T$ -Karte zu erhalten, wurde ein bereinigter Datensatz erzeugt. Dazu wurden alle bekannten anthropogen beeinflussten Abschnitte (weiß markiert in **Abbildung 11**, links) aus den Daten entfernt und die Lücken durch Interpolation geschlossen. Das Ergebnis (**Abbildung 11**, rechts) zeigt einen durch tiefe magnetische Quellen hervorgerufenen allgemein ansteigenden Trend des Feldes in Richtung Südosten.

In einer Bandpass-gefilterten (BP, Wellenlänge 0,5 bis 5 km) Version des Magnetfeldes (**Abbildung 12**) werden dagegen einige signifikante Strukturen sichtbar. Allerdings ist davon auszugehen, dass die bereinigte und Bandpass-gefilterte Karte noch immer magnetische Anomalien enthält, die nicht geogenen Ursprungs sind und eine Interpretation des Anomalienbildes entsprechend erschweren. Dieses folgt teilweise den N-S-streichenden Signaturen in der Tiefenlage der Quartärbasiskarte (Kuster und Meyer, 1995). Wie beispielweise im südlichen Zentrum des Messgebietes, wo eine Rinnenachse der Quartärbasiskarte nahe einer aus den HEM-Ergebnissen abgeleiteten Rinnenachse liegt (**Abbildung 12**, links). Jedoch sind die Korrelationen unklar und somit können keine eindeutigen Hinweise auf Rinnenstrukturen im Untergrund geliefert werden.

Ein Vergleich mit der Bodenkarte BÜK200 (BGR, 2018) liefert erwartungsgemäß keinen Hinweis auf eine Beeinflussung des Magnetfeldes durch die verschiedenen Bodentypen. Auch die oberflächennahe Geologie (siehe **Abbildung 2**) bildet sich nicht ab. Somit erscheint eine Interpretation der magnetischen Anomalien hinsichtlich der geogenen Strukturen im Boden und der Lithologie an der Erdoberfläche nicht möglich zu sein.



**Abbildung 12.** Bereinigte und Bandpass-gefilterte  $\Delta T$ -Karten (RTP) im Vergleich mit Quartärbasis (links) und BÜK200 (rechts). Hintergrund: DTK50.

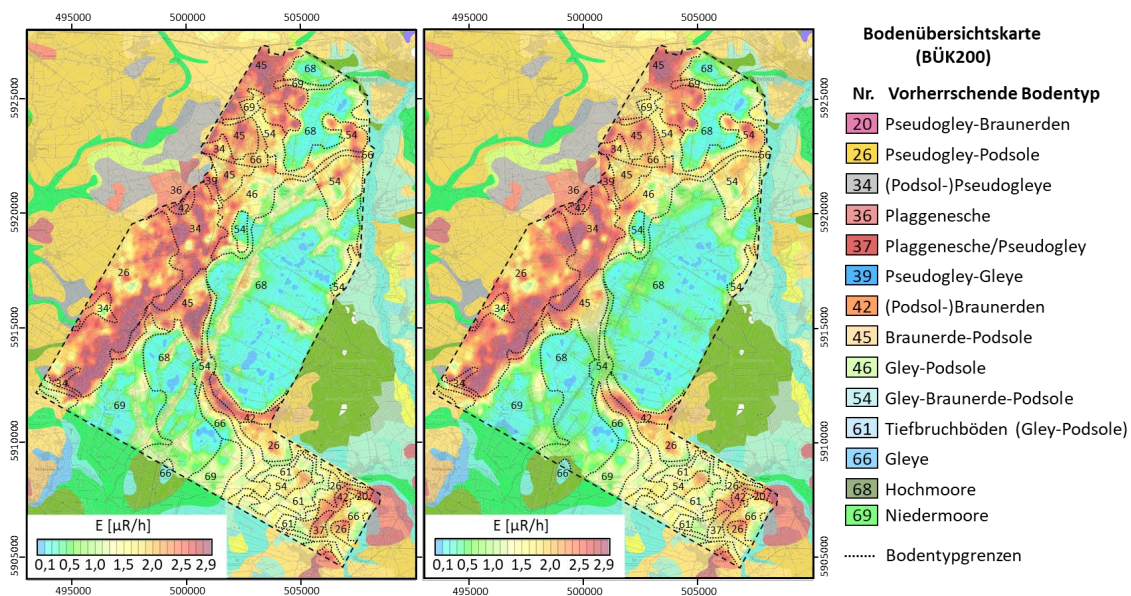
## 6.4 Radiometrie

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 Mooregebiete 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 13** zeigt exemplarisch Karten der Ionendosisleistung in Mikroröntgen pro Stunde ( $\mu R/h$ ). In den nicht durch Moor beeinflussten Gebieten liegen die Werte bei maximal  $3,5 \mu R/h$  und sprechen für eine tonarme Lithologie des Bodens. Im Bereich des Moores sind die Werte mit maximal  $1,0 \mu R/h$  stark erniedrigt. Ursache hierfür ist zum einen die Durchnässung des Moores, welche eine abschwächende Wirkung auf die Strahlung besitzt. Zum anderen enthalten die Torfablagerungen selbst vermutlich nur

wenig strahlende Tonminerale. Die im Moor liegenden Ortschaften und Straßen heben sich als lineare Strukturen in der Karte (**Abbildung 13**, links) deutlich ab. In einer weiteren Karte (**Abbildung 13**, rechts) wurden daher anthropogen beeinflusste Abschnitte entfernt und die entstandenen Lücken interpoliert. Ähnlich wie in der Magnetik ist auch hier davon auszugehen, dass sich noch anthropogen beeinflusste Anomalien in der Karte befinden. Es könnten aber auch geogene Strukturen mit entfernt worden sein.

Außerhalb der Moore weisen vor allem die Gleye, anzutreffen im Südosten und Nordosten des Gebietes, allgemein verringerte Strahlungswerte im Vergleich zu den übrigen Bodentypen (Pseudogleye, Podsole, Plaggeneschen, Braunerden) auf. Weitere Unterscheidungen hinsichtlich der Bodentypen können aus den Daten der Radiometrie auf dieser Skala nicht getroffen werden. In den Karten der Radioelementkonzentrationen (**Anhang IV.5**) werden kaum signifikanten Unterschiede in der lateralen Verbreitung der drei Radioelemente Kalium, Uran und Thorium untereinander sichtbar.



**Abbildung 13.** Karten der Ionendosisleistungen  $E$  [ $\mu\text{R}/\text{h}$ ], links mit anthropogen beeinflussten Bereichen, rechts anthropogen korrigiert und BÜK200 mit DTK50 als Hintergrund.

## 7 Fazit

Mit dem Hubschraubermesssystem der BGR konnten in dem etwa 173 km<sup>2</sup> großen Messgebiet „Gnarrenburg“ aerogeophysikalische Daten entlang von 102 Fluglinien mit einer Gesamtlänge von 778 km erhoben werden. Dies lieferte einen Überblick über großräumige Strukturen im Messgebiet.

Dank des Einsatzes eines Positionierungssystems, mit dem auch die räumliche Lage der Flugsonde erfasst wurde, war eine verbesserte Bestimmung der Sensorhöhe und somit auch eine genauere Ableitung der aktuellen Geländehöhe aus den Flugdaten zum Zeitpunkt der Befliegung möglich. Die Lage der Flugsonde wurde erstmalig auch bei der Korrektur der HEM-Daten berücksichtigt.

Mit den aus den HEM-Daten abgeleiteten spezifischen Widerständen, deren Verteilung sowohl lateral (Karten) als auch vertikal (Schnitte) visualisiert wurde, konnten Hinweise sowohl über die Verbreitung von dominierenden Lithologien (sandige vs. tonige Sedimente) als auch über die Torfvorkommen geliefert werden.

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.

Die aus den HRD-Daten gewonnenen Karten weisen generell auf eine eher geringe Gammastrahlung am Boden hin. Da im Messgebiet einige Waldgebiete vorkommen, ist ein Teil der radiometrischen Messungen davon beeinflusst (abgeschwächt), was eine verlässliche Angabe von Strahlungswerten am Boden beeinflusst. Bereiche mit sehr niedriger Strahlung sind aber klar den Wasser- und Moorflächen zuzuordnen. Außerhalb der Moore weisen vor allem die Gleye, anzutreffen im Südosten und Nordosten des Gebietes, allgemein verringerte Strahlungswerte im Vergleich zu den übrigen Bodentypen (Pseudogleye, Podsole, Plaggeneschen, Braunerden) auf.

Die laterale Abgrenzung der Torfe in den Mooren aus HEM-Parametern (scheinbare Tiefe der höchsten Messfrequenz) und HRD-Daten (Ionendosisleistung) bzw. einer Kombination daraus erscheint möglich. Die vertikale Abgrenzung der Torfe gegenüber dem sedimentären Untergrund (Torfbasis) benötigt darüber hinaus auch die Modelle der 1D-HEM-Inversion, da diese im Gegensatz zu den HEM- und HRD-Parametern konkrete Tiefeninformationen liefern können. Diese spezielle Auswertung wird aufgrund des damit verbundenen Umfangs in einem separaten Bericht beschrieben.

Somit eröffnet eine aerogeophysikalische Erkundung mit dem Messsystem der BGR eine Möglichkeit, sowohl die Ausdehnung als auch die mittlere Mächtigkeit und somit das Torfvorkommen in Mooren großräumig zu bestimmen. Unsicherheiten bestehen vor allem in Bereichen mit wenig Torf, Überdeckungen bzw. Einlagerungen von mineralischen Böden innerhalb der Torfsequenzen und nahe von Infrastrukturobjekten.

## 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 6, 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-GRIDFLOAT-Format (\*.flt) beigefügt. Die Ergebnisse der Befliegungen werden nach Projektende in die BGR-Geodateninfrastruktur eingestellt (abrufbar über das [Geoportal](#) der BGR) und dem zuständigen Landesamt (LBEG) übergeben.

**Tabelle 6.** Inhalt der DVD

Verzeichnis		Inhaltsbeschreibung
\Berichte		Allgemeiner Technischer Bericht (PDF) Befliegungsbericht (PDF) Gebietsbericht (PDF)
\Daten...	\HEM	Datei (ASCII) aller gemessenen Daten (HEM196_DAT.xyz) Datei (ASCII) aller abgeleiteten Parameter (HEM196_APP.xyz) Dateien (ASCII) der Ergebnisse nach 1D-Inversion (HEM196_INV_L6.xyz, HEM196_INV_L20.xyz) Datei (ASCII) der Qualitätskontrollparameter (HEM196_QCP.xyz)
	\HMG	Datei (ASCII) der magnetischen Totalintensität, der Anomalien des magnetischen Feldes, der Basisstationsdaten etc. (HMG196.xyz)
	\HRD	Datei (ASCII) der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Totalstrahlung und die Ionendosisleistung etc. (HRD196.xyz)
\Karten...	\Fluglinien	Karten (PDF) des Flugweges mit Topografie
	\DEM	Karte (PDF) der Geländehöhen
	\HEM	Karten (PDF) der Halbraumwiderstände und der Schwerpunktstiefen für alle Messfrequenzen Karten (PDF) der spezifischen Widerstände bei ausgewählten Tiefen: 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60 und 80 m unter Gelände (entnommen aus den 1D-Inversionsmodellen mit 20 Schichten)
	\HMG	Karten (PDF) der Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes mit und ohne anthropogenen Effekten
	\HRD	Karten (PDF) der Gehalte bzw. Äquivalentgehalte für die Radioelemente Kalium, Uran und Thorium sowie für die Ionendosisleistung und die Gesamtstrahlung
	\ArcGIS	Zugehörige Grids im ArcGIS GRIDFLOAT-Format (flt)
\VRS\L6 \VRS\L20	Vertikalschnitte (PDF) des spezifischen Widerstandes basierend auf 1D-Inversionsergebnissen mit 6- bzw. 20 Schichten für jede Fluglinie	



## 9 Literatur

- BKG, 2012. Digitales Geländemodell (DGM25). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt a. M., Germany, <https://www.geodatenzentrum.de> (Abgerufen am 01.02.2012).
- BGR, 2018. Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK200) - CC3118 Hamburg-West. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Joosten, H., Couwenberg, J., von Unger, M. & Emmer, I., 2016. Peatlands, Forests and the Climate Architecture: Setting Incentives through Markets and Enhanced Accounting. Umweltbundesamt – Reihe: Climate Change 14/2016, Dessau-Roßlau, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_14\\_2016\\_peatlands\\_forests\\_and\\_the\\_climate\\_architecture.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_14_2016_peatlands_forests_and_the_climate_architecture.pdf).
- Kuster, H. & Meyer, K.-D., 1995. Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen 1:500000; Hannover.
- LBEG, 2010. Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen 1:500.000. Nibis-Kartenserver, Hannover
- LABO, 2017. Bedeutung und Schutz von Moorböden. Positionspapier der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. [https://www.labo-deutschland.de/documents/171222\\_LABO\\_Positionspapier\\_Moorbodenschutz.pdf](https://www.labo-deutschland.de/documents/171222_LABO_Positionspapier_Moorbodenschutz.pdf)
- NLFB, 2000. Geologische Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen 1:500.000 (GÜK500), Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLFB), Nibis-Kartenserver, Hannover.
- Petersen, H., Siemon, B. & Pielawa, J., 2022. Befliegungsbericht Kalibrierflüge HEM über Nordsee und Ahlenmoor, September 2021. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0136958, Hannover.
- Siemon, B., 2012. Accurate 1D forward and inverse modeling of high-frequency helicopter-borne electromagnetic data. *Geophysics*, 77 (4), WB71-WB87, doi: [10.1190/geo2011-0371.1](https://doi.org/10.1190/geo2011-0371.1).
- 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](https://doi.org/10.3390/rs12020203).
- Siemon, B., Frank, S., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J., 2019a. Fallstudie zur Abschätzung von Ausdehnung und Mächtigkeit des Ahlen-Falkenberger Moores mittels Aero-geophysik. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0135656, Hannover.
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J., 2022. Gebietsbericht D-AERO-Finsterwalde HEM/HMG/HRD-Befliegung 191 Finsterwalde Mai/Juli 2021. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0137050, Hannover.
- 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: [10.3390/rs12101629](https://doi.org/10.3390/rs12101629).
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Steuer, A., Petersen, H., Pielawa, J., Balzer, H.-U. & Plath, C., 2019b. Datenverarbeitung in der Hubschrauber-geophysik, Teil 1: Grundlagen: Mess- und Auswertetechniken. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0136007, Hannover.
- Siemon, B. & Pielawa, J., 2022. Befliegungsbericht D-AERO-Moore, HEM/HMG/HRD-Befliegung, 196 Gnarrenburg, Mai 2022. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0136957, Hannover.
- Yin, C. & Fraser, D., 2004. Attitude corrections of helicopter EM data using a superposed dipole model. *Geophysics*, 69, 431–439, doi: [10.1190/1.1707063](https://doi.org/10.1190/1.1707063).

---

## Danksagung

Ein herzlicher Dank gebührt der BGR-Hubschrauber-Crew (Hauke Petersen, Hans-Ulrich Balzer und Carsten Plath) sowie Bernhard Stooß (Piloten, Air Lloyd Aerotechnics GmbH) für die gute Durchführung der Befliegung.

---

## **Anhang I: Verzeichnisse**

### **Anhang I.1: Abbildungsverzeichnis**

1. Lage und Ausdehnung des Gesamtmessgebietes Gnarrenburg.
2. Geologische (GÜK500) und Bodenübersichtskarte (BÜK200).
3. Karten der Geländehöhen aus den Flugsondendaten und Abweichung zum Geländehöhenmodell.
4. Karten der Halbraumwiderstände bei allen Messfrequenzen.
5. Karten der scheinbare Tiefen dabei allen Messfrequenzen.
6. Karten der Halbraumwiderstände und scheinbare Tiefen bei 133 kHz über BÜK200.
7. Karten der Halbraumwiderstände bei 1,8 kHz und scheinbare Tiefen bei 8,3 kHz mit Quartärbasiskarte.
8. Beispiel für Vertikalsektionen der L6- und L20-HEM-Inversionen entlang der Fluglinie L32.1.
9. Beispiel für Vertikalsektionen der L6- und L20-HEM-Inversionen entlang der Fluglinie L48.2.
10. Karten der spezifischen Widerstände  $\rho$  in 1 m und 40 m unter GOK.
11.  $\Delta T$ -Karten (RTP) des Messgebietes mit und ohne anthropogene Effekte.
12. Bereinigte und Bandpass-gefiltert  $\Delta T$ -Karten (RTP) im Vergleich mit Quartärbasis und BÜK200.
13. Karten der Ionendosisleistungen mit anthropogen beeinflussten und korrigierten Bereichen über BÜK200.

### **Anhang I.2: Tabellenverzeichnis**

1. Rahmenparameter zur Befliegung Gnarrenburg.
2. Befliegungsparameter für das Messgebiet Gnarrenburg.
3. Kalibrierwerte für das HEM-System BKS60a ermittelt über der Jade-Fahrinne am 19.09.2021.
4. Angepasste Kalibrierwerte plus Standardabweichung für das HEM-System BKS60.
5. Parameter der Sensorlagekorrektur (BKS60).
6. 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]
$\Delta T$	Anomalien des erdmagnetischen Feldes [in nT, Nanotesla]
$d_a$	Scheinbare Tiefe (der Halbraumoberkante) [in m]
D-AERO	Oberbegriff für BGR-Projekte der Aero-geophysik 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 $\mu\text{R/h}$ , Mikroröntgen pro Stunde]
EDQX	Kennung des Flugplatzes Rotenburg an der Wümme
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
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 %]
LBEG	Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
L	Messprofil (plus Nummer) von Nordwesten nach Südosten (NW-SO) oder umgekehrt
LIN	Landinanspruchnahme (durch Bergbau ehemals beanspruchten Flächen)
MESZ	Mitteleuropäische Standardzeit
NASVD	Unterdrückung von Datenrauschen in Gammaskpektren (Noise-Adjusted Singular Value Decomposition)
NL	Nicht-linear
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]
$\rho_a$	Scheinbarer spezifischer Widerstand (Halbraumwiderstand) [in $\Omega$ m]
RTP	Reduktion auf den Pol
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 32N)
$z^*$	Schwerpunktstiefe [in m]

## Anhang II: Flugtabelle

Flug- nummer	Datum	Zeit (MESZ) Start-Ende	Mess- und Kontroll- profile	Sonstiges
19601	03.05.22	10:22 – 12:33	L51.1, L54.1, L57.1, L60.1, L53.1, L56.1, L59.1, L62.1, L61.1, L58.1,  TL301.9	<b>Profilflug SYS34_FLT00001</b>  Daten OK  Wetter: Bewölkt, 11°C, kaum Wind, QNH (ROW): 1020 hPa
19602	03.05.2022	14:38 – 16:44	L55.1,  T101.9, T104.9, T107.9, T110.9, T112.9, T106.9, T103.9, T102.9, T105.9, T108.9, T111.9, <b>T113.9</b> , <b>T110.8</b> , T113.8,  T202.9, T205.9, T208.9, T211.9, T212.9,  TL302.9,  T206.9, T203.9,  L52.1	<b>Profilflug SYS34_FLT00002 mit Detailgebieten</b>  Daten OK  T109.9 fehlt, T110 und T113 doppelt?  T112.9 und T113.9 in umge- kehrter Richtung geflogen  TL309.2 = T209.9  Wetter: Bedeckt, 13°C, kaum Wind, QNH (ROW): 1020 hPa
19603	04.05.22	10:17 – 12:10	T6.9, T5.9, T4.9, T3.9, T2.9, T1.9,  T201.9, T204.9, T207.9, T210.9, T213.9,  TL303.9	<b>Kontrollprofilflug mit Detail- gebiet SYS34_FLT00003</b>  Daten OK  T1.9 bei Auswertung unterteilt  Wetter: Sonnig mit Wolken, 11°C, kaum Wind, QNH (ROW): 1020 hPa
19604	04.05.22	14:03 – 16:01	<b>L50.1, L49.1, L48.1, L47.1,</b> <b>L46.1, L45.1, L44.1, L43.1,</b> <b>L42.1, L41.1, L40.1, L39.1,</b> <b>L38.1</b>	<b>Profilflug SYS34_FLT00004</b>  <b>Kein Bird-GPS!</b>  Wetter: Sonnig mit Wolken, 15°C, kaum Wind, QNH (ROW): 1019 hPa

19605	05.05.22	10:21 – 12:28	L50.2, L49.2, L48.2, L47.2, L46.2, L45.2, L44.2, L43.2, L42.2, L41.2, L40.2, L39.2, L38.2, L37.1, L36.1,  TL305.9,  T109.9	<b>Profilflug SYS34_FLT00005</b>  Daten OK,  T109.9 in umgekehrter Rich- tung geflogen  Wetter: Sonnig, leichte Bewölkung, 11°C, kaum Wind, QNH (ROW): 1022 hPa
19606	05.05.22	14:53 – 17:09	L35.1, L34.1, L33.1, L32.1, L31.1, L30.1, L29.1, L28.1, L27.1, L26.1, L25.1, L24.1, L23.1, L22.1, L21.1, L20.1, L19.1, L18.1,  TL306.9	<b>Profilflug SYS34_FLT00006</b>  Daten OK  Wetter: Sonnig, 18°C, kaum Wind, QNH (ROW): 1022 hPa
19607	06.05.22	10:16 – 12:11	L17.1, L16.1, L15.1, L14.1, L13.1, L12.1, L11.1, L10.1, L9.1, L8.1, L7.1, L6.1, L5.1, L4.1, L3.1, L2.1, L1.1,  TL307.9	<b>Profilflug SYS34_FLT00007</b>  Probleme beim Starten der EM  Daten OK  Wetter: Sonnig, 18°C, kaum Wind, QNH (ROW): 1026

**Anmerkung:**

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

Befliegung Gnarrenburg: \*.1 (L), \*.9 (T), \*.8 (T, nach Teilung), Profilnummern <100,  
Befliegung Detailgebiet 1: \*.9 (T), \*.8 (T, Wiederholung), Profilnummer 101–113,  
Befliegung Detailgebiet 2, \*.9 (T), \*.8 (T, Wiederholung), Profilnummer 201–213,  
Referenzlinien: \*.9 (T), Profilnummern 301-307 (= T209.9).

## Anhang III: Protokolle

### Anhang III.1: Positionsdatenverarbeitungsparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	Heli	Bird
<b>Defaults</b>			
Programmversion	PosView06.exe		
System	Sys	1	
Projektion	Proj	UTM zone 33N	
Dem-Grid	DemFile	DEM_BKG_UTM32_Geosoft.grd	
Kanäle	LonChan	LON_HELI_RAW	-
	LatChan	LAT_HELI_RAW	-
	ZhgChan	ZHG_HELI_RAW	-
	LonPppChan	LON_HELI_PPP	-
	LatPppChan	LAT_HELI_PPP	-
	ZhgPppChan	ZHG_HELI_PPP	-
	RollChan	-	-
	PitchChan	-	-
	YawChan	-	-
KpaChan	KPA	-	
<b>Prozessierung</b>			
Verschiebungen	LagBirdGps [rec]		0
	LagLaser [rec]		0
	LagKpa [rec]	0	
	LagBirdImu [rec]		0
Gps-Sprung	JumpMedWin [rec]	25	
	JumpThresh [m]	0.2	
Kpa	KpaDriftSplSmth	1	
	KpaDriftSplTau	0.5	
	KpaCopyZhg	0	



## Anhang III.2: HEM-Datenverarbeitungsparameter

### Prozessierungsparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	EM6	
<b>Defaults</b>								
Programmversion	HemView20g.exe							
Birdnummer	NB	BKS60 (63)						
Frequenzen	Freq [Hz]	40835 HCP	8320 HCP	380 HCP	133528 HCP	1770 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 Stützstellensetzung	AutoZeroAlt [m]	300	300	300	300	300	300	
	AutoZeroFiltRad [rec]	8	8	8	8	8	8	
Automatische Datenauswahl	AltLimHsp [m]	170	170	170	170	170	170	
	SignalWid [rec]	75	75	75	75	75	75	
	NoiseWid [rec]	15	15	25	15	25	20	
	ThreshI [ppm]	0.25	0.25	0.3	0.25	0.3	0.3	
Filter	ThreshQ [ppm]	0.25	0.25	0.3	0.5	0.3	0.3	
	MedFiltRad [rec]	0	0	0	0	0	0	
	NI FiltWid [rec]	12	15	30	10	20	15	
	NI FiltTol [ppm]	1	1	1	1	1	1	
HSP-Levelling	LpFiltCut [rec]	25	30	30	20	30	30	
	Linegrid	LineGrd_EdgClp [cell]		5				
		GridGap_EdgClp [cell]		10				
	Errorgrid	ErrGrd_BtwLen [m]	500					
ErrGrd_BtwOrd		8						
ErrGrd_DcosDir [°]		30						
ErrGrd_DcosDeg		1						
Errorfilter	ErrFlt_SpSmthR	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	
	ErrFlt_SpSmthD	0.85	0.85	0.9	0.85	0.85	0.85	
	Errf_SpTau	0.5						
Skip Lines	Hsp_Tlt	35.1, 36.1						
Tieline Levelling	TieLev_SpSmthR	0.85	0.85	0.90	0.85	0.85	0.85	
	TieLev_SpSmthD	0.85	0.85	0.90	0.85	0.85	0.85	
	TieLev_SpTau	0.5						
	TieLev_ThrR [ppm]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
IQ-Levelling	TieLev_ThrD [ppm]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
	Drift	Drift_NIWid [rec]	50					
		Drift_NITol [ppm]	10					
		Drift_AltLim [m]	300					
Noise	Drift_ThrIQ [ppm]	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	
	Drift_SpSmth	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	
	Drift_SpTau	0.2						
Levelling Filter	Lev_AltLim [m]	80						
	Noise_Wid [rec]	30						
	Lev_ThrI [ppm]	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	
	Lev_ThrQ [ppm]	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	
Levelling Filter	Lev_NITol [ppm]	1	1	1	1	1	1	
	Lev_SpSmth	0.55	0.6	0.7	0.55	0.65	0.65	
	Lev_NIWid [rec]	12	15	30	10	20	15	
	Lev_SpTau	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	

### Korrekturwerte für Kalibrierfaktoren

EM1				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19601	0	72300	1.09	-0.1
19602	0	71570	1.07	0.1
19603	0	66560	1.10	0.0
19605	0	70130	1.07	0.1
19606	0	74460	1.06	0.0
19607	0	62640	1.08	0.1

EM2				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19601	0	72300	1.15	-0.9
19602	0	71570	1.13	-0.8
19603	0	66560	1.15	-0.7
19605	0	70130	1.14	-1.1
19606	0	74460	1.13	-1.0
19607	0	62640	1.15	-0.9

EM3				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19601	0	72300	0.98	6.3
19602	0	71570	0.93	7.5
19603	0	66560	0.97	7.4
19605	0	70130	0.94	7.2
19606	0	74460	0.91	5.7
19607	0	62640	0.92	7.8

EM4				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19601	0	72300	0.99	2.7
19602	0	71570	0.98	3.4
19603	0	66560	1.00	2.9
19605	0	70130	0.98	4.5
19606	0	74460	1.00	-0.9
19607	0	62640	0.97	4.9

EM5				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19601	0	72300	1.03	-1.8
19602	0	71570	1.00	-2.2
19603	0	66560	1.01	-1.2
19605	0	70130	1.01	-2.0
19606	0	74460	0.98	-0.5
19607	0	62640	0.99	-2.0

EM6				
Flight	Rec1	Rec2	Amp	Pha
19601	0	72300	1.01	2.2
19602	0	71570	0.96	2.2
19603	0	66560	0.98	3.0
19605	0	70130	1.00	1.8
19606	0	74460	1.02	1.7
19607	0	62640	0.98	2.6

### Fehler- und Qualitätsparameter

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

### Gridparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	Rhoa	Da	Zst	Topo	Rho@Z
Gridding	Cellsize [m]	50	50	50	50	50
	Edgeclip [cell]	4	4	4	4	4
	BlankDist [m]	500	500	500	500	500
	Tension	0	0	0	0	0
	SearchRad [m]	200	200	200	200	200
	LogOpt	-1	0	0	0	-1
	ZonFile	rhofract_196.zon	dafract_196.zon	zstfract_196.zon	DEM_196.zon	rhofract_196.zon

### Inversionsparameter

Funktion	Parameter [Einheit]	Inv_320_oDS_SM3.conf	Inv_36_oDS_SM1.conf
<b>Ein-/Ausgabe</b>			
Prefix für Daten- und Modellausgabe	Prefix	LEV_L320_30_5_O001_DM02_oDS	LEV_L36_10_10_O05_DM02_oDS
Dezimierung	nDec	1	1
Auswahlcode niedrigste Frequenz	useEM3	1	1
Druckparameter	nPri	1	1
<b>Startmodell</b>			
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]	0	0
Deckschichtdicke	dSchDick [m]	0	0
Halbraumwiderstand	rHspace [Ωm]	0	0
Mindestschichtdicke	minSchDick [m]	0.2	0.2
Verschiebungsfaktor unterste Grenze	tFaktU	1	1
Verschiebungsfaktor oberste Grenze	tFaktO	0.01	0.5
<b>Inversion</b>			
Abbruchschranke	Stop [%]	5	10
Vorwärtscode	cCode	0	0
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	3	1
minimale Iterationszahl	minIt	1	1
maximale Iterationszahl	maxIt	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
<b>Defaults</b>		
Programmversion	HmgView08.exe	
Kanäle	LonChan	POS_LON_BIRD
	LatChan	POS_LAT_BIRD
	ZhgChan	POS_ZHG_BIRD
	XChan	POS_X_BIRD
	YChan	POS_Y_BIRD
	MagChan	MAG1U
<b>Prozessierungsschritte</b>		
1. Bereinigung Basis	LpWid [rec]	0
2. Verschiebungen	Lag [rec]	17
	Offset [nT]	0
3. Tieline-Levelling	RefFlight	19601
	excluded flights	19602
4. Vorbereitung Microlevelling	AsThresh	0.07
	Shrink [cell]	2
	Grow [cell]	1
	delShort [rec]	20
	GridGap [cell]	20
	TaperWid [rec]	10
5. Microlevelling	BtwLen [m]	2000
	BtwDeg	8
	DcosAng [°]	30
	DcosDeg	1.0
	SpISmth	0.95
	SpITau	0.9
	SpISmthTie	0.95
	SpITauTie	0.5
nLev	1	
6. Bereinigung anthropogen	AsThresh	0.07
	Shrink [cell]	2
	Grow [cell]	1
	delShort [rec]	20
	GridGap [cell]	20
	TaperWid [rec]	10
7. Grid-Filter	GfLong [m]	5000
	GfShort [m]	250
8. RTP und Xa	Inclination [°]	68.68
	Declination [°]	3.41
	Field [nT]	49958.9
	Depth [m]	-100
<b>Gridding</b>		
Gridding	Cellsize [m]	50
	Edgeclip [cell]	4
	BlankDist [m]	400
	Tension	0.5
	SearchRadius [m]	auto
	ZonFile	MAG.zon

## Anhang III.4: HRD-Datenverarbeitungsparameter

Beschreibung	Parameter [Einheit]	DOWN				UP
		K	U	Th	TC	U_UP
Defaults						
Programmversion	ProgVer	HrdView123.exe				
System	Device	RS-500 RSX-5				
Kanäle	LonChan LatChan ZhgChan XChan YChan HagChan	POS_LON_HELI POS_LAT_HELI POS_ZHG_HELI POS_X_HELI POS_Y_HELI POS_HAG_HELI_DEM				
	SpecChan	GR820_DOWN				GR820_UP
	CompChan	GR820_K_DOWN	GR820_U_DOWN	GR820_TH_DOWN	GR820_TC_DOWN	GR820_U_UP
<b>Prozessierungsschritte</b>						
1. Gain	GainFiltWid [rec]	257				257
2. NASVD	AltMax [m]	120				120
	ChanRange nComp	35-240 6				110-160 6
3. Hintergrund	backA [cps] backB [cps/cps]	5.08 0.0703	0.27 0.0554	-0.5 0.0692	29.77 1.1488	-0.05 0.0154
4. Radon	a1	0.05				
	a2	0.026				
	aU	0.28				
	aTh	0.1				
	aK	0.6				
	aTC	14				
5a. Compton	RadFiltWid [rec]	120				
	alpha	0.27				
	beta	0.4				
	gamma	0.772				
	a	0.052				
5b. Attenuation	att [1/m]	0.00939	0.00646	0.00729	0.00676	
5c. Sensitivity	sens [cps/% ppm]	39.46	4.56	2.37		
5d. Faktor	fact	1	1	1	1	
6. Filter	MathFiltWid [rec]	3	3	3	3	
	MathReffiltWid [rec]	10	10	10	10	
7. Tieline Levelling		nicht erfolgt				
8. Biokorrektur	Koeffizient	0.011	0.010	0.010	0.010	
9. Microlevelling		nicht erfolgt				
10. Gridfilter	Gauss [sigma]	0.5	1	0.5	0.1	
<b>Gridding</b>		<b>K</b>	<b>U</b>	<b>Th</b>	<b>TC</b>	<b>Expo</b>
Gridding	Cellsize [m] Edgeclip [cell] BlankDist [m] Tension SearchRad [m]	50 4 500 0 auto				
	Zonfile	POT_COR.zon	URA_COR.zon	THO_COR.zon	TOT_COR.zon	Expo.zon

---

## Anhang IV: Karten

### Kartenverzeichnis

#### **Anhang IV.1: Fluglinien**

1. Fluglinien Hauptgebiet.
2. Fluglinien Detailgebiete.

#### **Anhang IV.2: Geländehöhen**

3. Geländehöhen.

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

4. Qualitätskontrollparameter.
5. Halbraumwiderstand für die Frequenz 380 Hz.
6. Halbraumwiderstand für die Frequenz 1770 Hz.
7. Halbraumwiderstand für die Frequenz 5417 Hz.
8. Halbraumwiderstand für die Frequenz 8320 Hz.
9. Halbraumwiderstand für die Frequenz 40835 Hz.
10. Halbraumwiderstand für die Frequenz 133528 Hz.
11. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 380 Hz.
12. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 1770 Hz.
13. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 5417 Hz.
14. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 8320 Hz.
15. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 40835 Hz.
16. Scheinbare Tiefe für die Frequenz 133528 Hz.
17. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 380 Hz.
18. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 1770 Hz.
19. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 5417 Hz.
20. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 8320 Hz.
21. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 40835 Hz.
22. Schwerpunktstiefe für die Frequenz 133528 Hz.
23. Spezifischer Widerstand bei 1 m unter GOK.
24. Spezifischer Widerstand bei 3 m unter GOK.
25. Spezifischer Widerstand bei 5 m unter GOK.
26. Spezifischer Widerstand bei 10 m unter GOK.
27. Spezifischer Widerstand bei 15 m unter GOK.

- 28. Spezifischer Widerstand bei 20 m unter GOK.
- 29. Spezifischer Widerstand bei 30 m unter GOK.
- 30. Spezifischer Widerstand bei 40 m unter GOK.
- 31. Spezifischer Widerstand bei 60 m unter GOK.
- 32. Spezifischer Widerstand bei 80 m unter GOK.

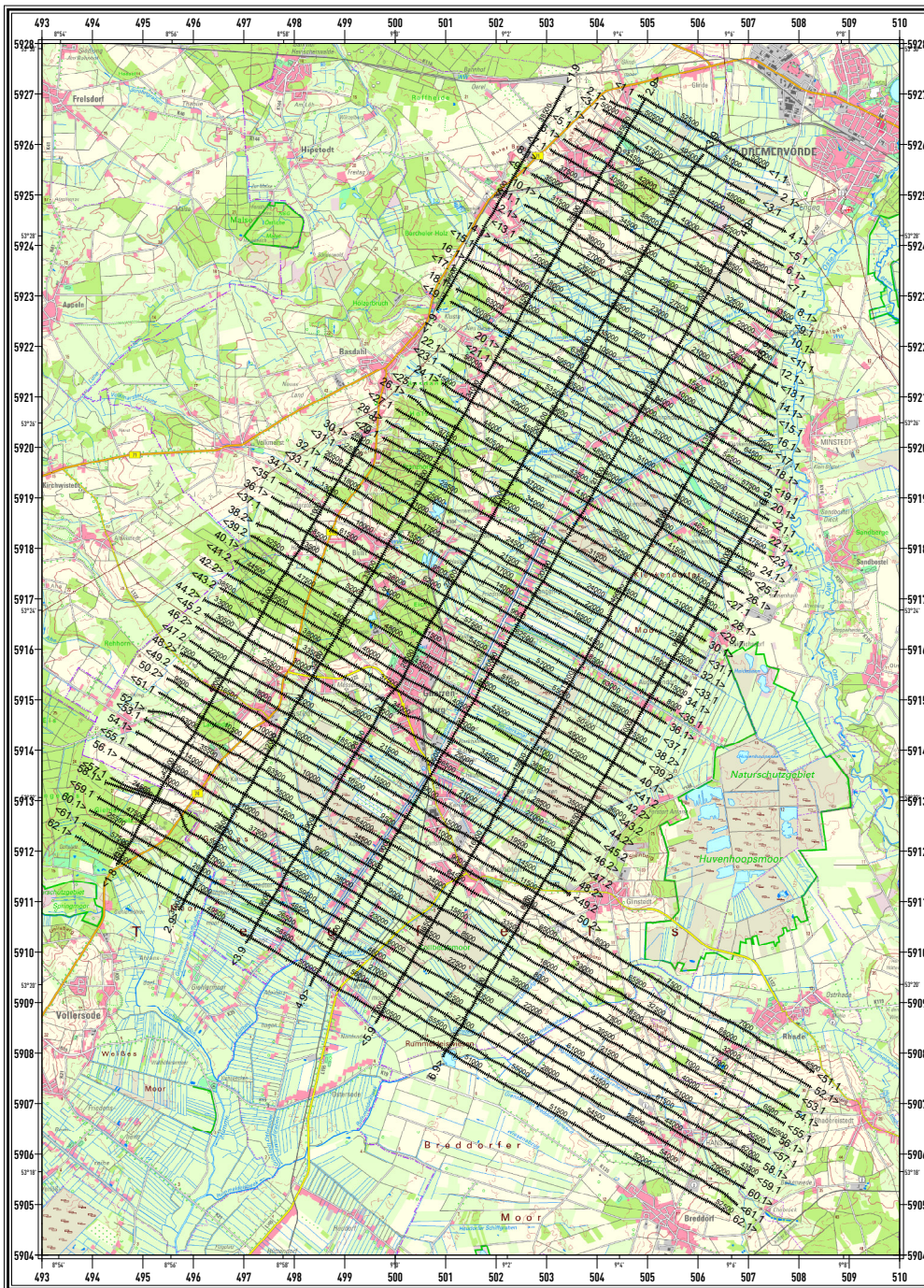
**Anhang IV.4: HMG-Karten**

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

**Anhang IV.5: HRD-Karten**

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

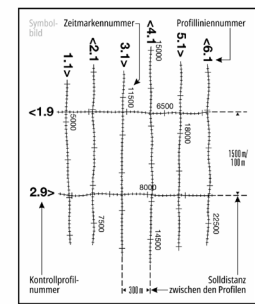
# Anhang IV.1: Fluglinien



## AEROGEOPHYSIKALISCHE MESSUNGEN IM GEBIET GNARRENBURG

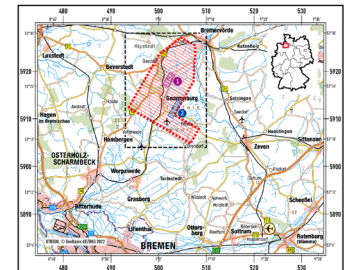


### FLUGLINIEN Hauptgebiet



Mittlerer Fluglinienabstand: 300m  
Mittlerer Kontrollprofilabstand: 1500m (Hauptgebiet, 100m in Detailgebieten)

Die Koordinaten im Kartenrahmen sind ETRS89/UTM-Koordinat. (Ellipsoid GRS80, Datum ETRS89, Zone 32N).  
Kartengrundlage: Bundesdaten Topographische Karten 1:50.000 (DTK50):  
disk50\_32480\_5900\_20\_col.tif, disk50\_32480\_5920\_20\_col.tif,  
disk50\_32500\_5900\_20\_col.tif, disk50\_32500\_5920\_20\_col.tif  
Herausgeber: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a. M.



**Maßstab 1:50 000 (2 cm ≙ 1 km)**

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 30655 Hannover, Bundesrepublik Deutschland	
Gebiet:	<b>Gnarrenburg</b>
Parameter:	<b>Fluglinien und Topografie Hauptgebiet</b>
Befliegung und Bearbeitung:	02.-06.05.2022; Hans-Ulrich Balzer, Malke Ibs-von Seht, Hauke Petersen, Jens Pieltaw, Carsten Plath, Bernhard Siemon, Bernhard Stöckl (Air Lloyd Aeronautics GmbH)
	<b>B 2.1 - Geophysikalische Erkundung - Technische Mineralogie - Aerogeophysik</b> Hannover 2023 · www.bgr.bund.de · heli@bgr.de

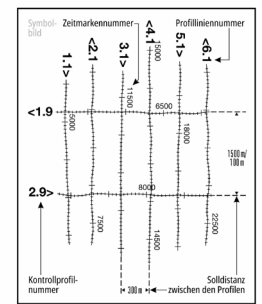




**AEROGEOPHYSIKALISCHE  
MESSUNGEN IM GEBIET  
GNARRENBURG**

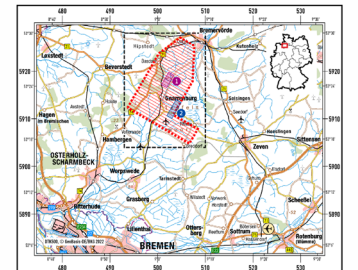


**FLUGLINIEN Detailgebiete**



Mittlerer Fluglinienabstand: 300m  
Mittlerer Kontrollprofilabstand: 1500m (Hauptgebiet, 100m in Detailgebieten)

Die Koordinaten im Kartenrahmen sind ETRS89/UTM-Koordinaten (Ellipsoid GRS80, Datum ETRS89, Zone 32N).  
Kartengrundlage: Bundesdaten Topographische Karten 1:50.000 (DTK50):  
dtk50\_32480\_5900\_20\_col.tif, dtk50\_32480\_5920\_20\_col.tif,  
dtk50\_32500\_5900\_20\_col.tif, dtk50\_32500\_5920\_20\_col.tif  
Herausgeber: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a. M.



**Maßstab 1:50 000 (2 cm ≙ 1 km)**

**BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
30655 Hannover, Bundesrepublik Deutschland

Gebiet: **Gnarrenburg**  
Parameter: **Fluglinien und Topografie Detailgebiete**

Befliegung und Bearbeitung: 02.-06.05.2022; Hans-Ulrich Balzer, Malte Ibs-von Seht, Hauke Petersen, Jens Pielawa, Carsten Plath, Bernhard Siemon, Bernhard Stöckl (Air Lloyd Aeronautisches GmbH)

B 2.1 - Geophysikalische Erkundung - Technische Mineralogie - Aerogeophysik  
Hannover 2023 - www.bgr.bund.de - hell@bgr.de

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

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