

Leistungsempfänger

**Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, Brandenburg**

Art des Dokuments

**Bericht**

Datum

**Juni 2025**

# Bericht

Geophysikalische Untersuchung und  
Geologisches 3D-Modell, Cottbus,  
Land Brandenburg



**RAMBOLL**

Bright ideas.  
Sustainable change.

## Bericht

### Geophysikalische Untersuchung und Geologisches 3D-Modell, Cottbus, Land Brandenburg

Projektbezeichnung **tTEM nahe Cottbus, Brandenburg**  
Projektnummer **1100059829**  
Empfänger **Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, Brandenburg**  
Art des Dokuments **Bericht**  
Version **1.0**  
Datum **26.06.2025**  
Erstellt durch **JOAW**  
Geprüft durch **MTDL**  
Genehmigt durch **JOAW**  
Beschreibung **Ergebnisse der TEM-Vermessung (tTEM und FloaTEM) im  
Schleppverfahren und geologischen 3D-Modellierung  
nahe Cottbus, Land Brandenburg**

Ramboll  
Olof Palmes Allé 22  
DK-8200 Aarhus N  
Dänemark

T +45 5161 1000  
<https://ramboll.com>

Ramboll Danmark A/S  
DK reg.no. 35128417

## Inhalt

1.	Einführung	3
2.	Geophysikalische Untersuchung und Ergebnisse	5
2.1	tTEM-/FloaTEM-Verfahren	5
2.1.1	tTEM-Instrumentenaufbau	5
2.1.2	FloaTEM-Instrumentenaufbau	6
2.2	Felduntersuchung	7
2.3	Datenerhebung	8
2.4	Instrumentenprobleme	8
2.5	Datenqualitätskontrolle	8
2.6	Datenverarbeitung und -inversion	9
2.7	Geophysikalische Ergebnisse	10
2.7.1	Untersuchungstiefe	10
2.7.2	Übersichtskarten der mittleren Resistivität	10
2.7.3	Querschnitte	11
2.7.4	Zaundiagramme	12
3.	Geologisches 3D-Modell	13
3.1	Digitalisierung der Bohrungsdaten	13
3.2	3D-Modellierungsverfahren	14
3.3	Geologisches 3D-Modell – Ergebnisse	16
4.	Mitzuliefernde Daten	19
5.	Schlussfolgerungen	20
6.	Literaturverweise	21

## Anhänge

**Anhang 1** Theorie der TEM

**Anhang 2** Instrumentenaufbau und Einstellungen für Datenverarbeitung und -inversion

**Anhang 3** Übersichtskarte

**Anhang 4** Karten der mittleren Resistivität in Tiefenintervallen

Anhang 4.1	Tiefenintervall von 0 bis 3 m ü. NHN
Anhang 4.2	Tiefenintervall von 3 bis 6 m ü. NHN
Anhang 4.3	Tiefenintervall von 6 bis 10 m ü. NHN
Anhang 4.4	Tiefenintervall von 10 bis 15 m ü. NHN
Anhang 4.5	Tiefenintervall von 15 bis 20 m ü. NHN
Anhang 4.6	Tiefenintervall von 20 bis 25 m ü. NHN
Anhang 4.7	Tiefenintervall von 25 bis 30 m ü. NHN
Anhang 4.8	Tiefenintervall von 30 bis 40 m ü. NHN
Anhang 4.9	Tiefenintervall von 40 bis 50 m ü. NHN

Anhang 4.10	Tiefenintervall von 50 bis 60 m ü. NHN
Anhang 4.11	Tiefenintervall von 60 bis 70 m ü. NHN
Anhang 4.12	Tiefenintervall von 70 bis 80 m ü. NHN
Anhang 4.13	Tiefenintervall von 80 bis 90 m ü. NHN
Anhang 4.14	Tiefenintervall von 90 bis 100 m ü. NHN
Anhang 4.15	Tiefenintervall von 100 bis 110 m ü. NHN
Anhang 4.16	Tiefenintervall von 110 bis 120 m ü. NHN
Anhang 4.17	Tiefenintervall von 120 bis 130 m ü. NHN
Anhang 4.18	Tiefenintervall von 130 bis 140 m ü. NHN
Anhang 4.19	Tiefenintervall von 140 bis 150 m ü. NHN

**Anhang 5** Karten der mittleren Resistivität in Elevationsintervallen

Anhang 5.1	Elevationsintervall 80 bis 70 m
Anhang 5.2	Elevationsintervall 70 bis 60 m
Anhang 5.3	Elevationsintervall 60 bis 50 m
Anhang 5.4	Elevationsintervall 50 bis 40 m
Anhang 5.5	Elevationsintervall 40 bis 30 m
Anhang 5.6	Elevationsintervall 30 bis 20 m
Anhang 5.7	Elevationsintervall 20 bis 10 m
Anhang 5.8	Elevationsintervall 10 bis 0 m
Anhang 5.9	Elevationsintervall 0 bis -10 m
Anhang 5.10	Elevationsintervall -10 bis -20 m
Anhang 5.11	Elevationsintervall -20 bis -30 m
Anhang 5.12	Elevationsintervall -30 bis -40 m
Anhang 5.13	Elevationsintervall -40 bis -50 m
Anhang 5.14	Elevationsintervall -50 bis -60 m
Anhang 5.15	Elevationsintervall -60 bis -70 m
Anhang 5.16	Elevationsintervall -70 bis -90 m
Anhang 5.17	Elevationsintervall -80 bis -90 m
Anhang 5.18	Elevationsintervall -90 bis -100 m

**Anhang 6** Untersuchungstiefe (DOI)

Anhang 6.1	Untersuchungstiefe, Tiefe
Anhang 6.2	Untersuchungstiefe, Elevation

**Anhang 7** Profile des Geologischen 3D-Modells

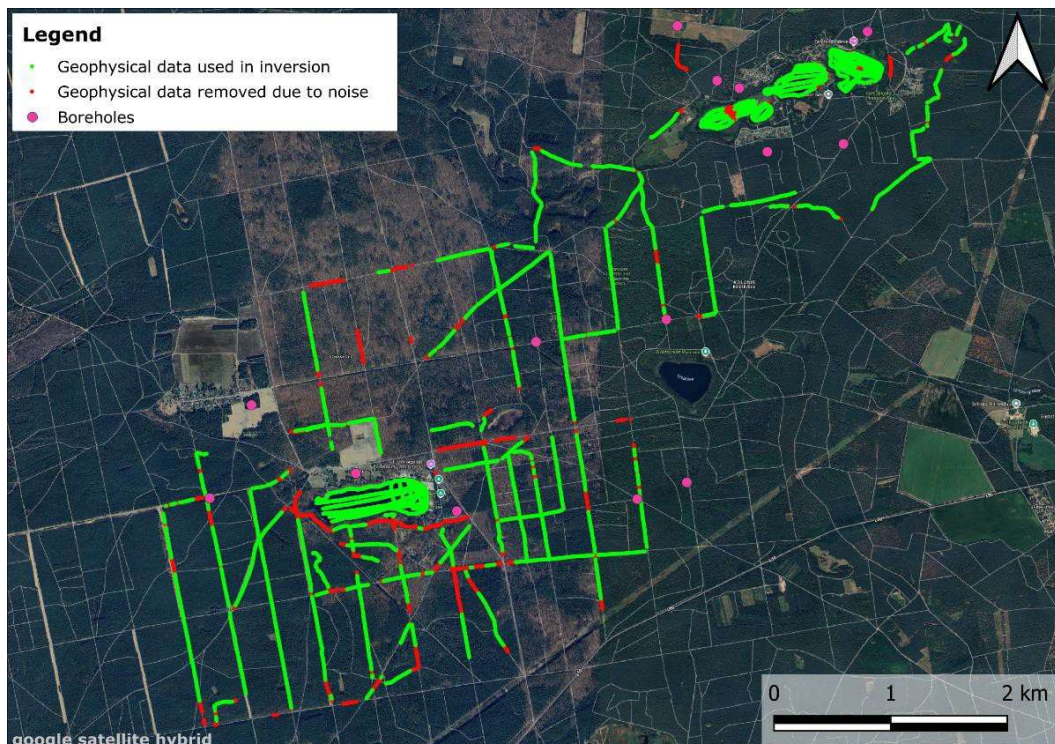
Anhang 7.1	Übersichtskarte
Anhang 7.2	Profil 1
Anhang 7.3	Profil 1 mit tTEM
Anhang 7.4	Profil 2
Anhang 7.5	Profil 2 mit tTEM
Anhang 7.6	Profil 3
Anhang 7.7	Profil 3 mit tTEM
Anhang 7.8	Profil 4
Anhang 7.9	Profil 4 mit tTEM
Anhang 7.10	Profil 5
Anhang 7.11	Profil 5 mit tTEM
Anhang 7.12	Profil 6
Anhang 7.13	Profil 6 mit tTEM
Anhang 7.14	Profil Großsee
Anhang 7.15	Großsee Profil mit tTEM
Anhang 7.16	Profil Pinnower See
Anhang 7.17	Profil Pinnower See mit tTEM

## 1. Einführung

Das beschriebene Projekt wurde auf Ersuchen des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, Brandenburg (im Folgenden LBGR genannt) nach geophysikalischen Dienstleistungen und geologischer 3D-Modellierung in einem Gebiet im Umkreis von Pinnower See und Großsee nordöstlich von Cottbus im Land Brandenburg durchgeführt. Der Pinnower See besteht aus drei von WNW nach OSO ausgerichtet ineinander übergehenden Teilseen. Der Übersichtlichkeit halber werden diese Seeabschnitte im vorliegenden Bericht als Pinnower See Ost, Pinnower See Mitte und Pinnower See West bezeichnet.

Das Untersuchungsgebiet umfasst etwa 19 km<sup>2</sup>, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die geophysikalischen Vermessungsarbeiten erfolgten über einen Zeitraum von vier Tagen in einer Kombination aus zwei elektromagnetischen Messmethoden im Zeitbereich, die jeweils im Schleppverfahren durchgeführt wurden, und zwar mittels tTEM-Methode, bei der die Instrumente mit einem Quad über Wald- und Feldwege gezogen wurden, und mit dem FloaTEM-System, angeordnet auf zwei Schlauchbooten hinter einem kleinen motorbetriebenen Boot. Beide Systeme erfassen kontinuierliche Messungen während der Bewegung und liefern hochauflösende Daten über den elektrischen Widerstand unter der Oberfläche entlang ihrer jeweiligen Vermessungspfade. Die tTEM-Daten wurden mithilfe einer High-Moment-Konfiguration aufgezeichnet, die eine Untersuchungstiefe (DOI) von etwa 100 bis 150 m unter der Geländeoberfläche ermöglicht. Insgesamt wurden auf ca. 46 km tTEM-Daten und auf 19 km FloaTEM-Daten gesammelt.

Die geophysikalischen Daten wurden mittels geophysikalischer Inversion so interpretiert, dass homogene mehrschichtige elektrische Widerstandsmodelle entstanden. Modelle dieser Art stellen eine Quasi-3D-Ansicht des Unterbodens dar, wobei die laterale Auflösung entlang der Wege hoch ist, während sie zwischen benachbarten Vermessungsspuren durch deren Abstand voneinander bestimmt wird, das heißt typischerweise durch den Abstand zwischen zugänglichen Waldwegen.



**Bild 1: Kartenansicht des Erkundungsgebiets mit tTEM- und FloaTEM-Vermessungslinien und Bohrlöchern**

Basierend auf den geophysikalischen Daten wurde in Kombination mit Daten von im Untersuchungsgebiet bereits erfolgten Bohrungen und unter Verwendung der GeoScene3D Software (<https://i-gis.dk/geoscene3d/>) ein Geologisches 3D-Modell mit einer Rastergröße von 100 m erstellt.

Vor Erstellung des Modells wurden mithilfe des Ramboll-Programms GeoGIS insgesamt 14 vom LBGR bereitgestellte Bohrungsberichte digitalisiert. Daraus konnte eine Datenbank exportiert und in die Modellierungssoftware eingepflegt werden.

Das daraus entstandene Modell umfasst 10 überwiegend präquartäre Schichten. Die präquartäre Grenzfläche ist in den tTEM-Modellen eindeutig als Übergang von höheren Widerständen im quartären Teil zu niedrigeren Widerständen im präquartären Teil auszumachen. Bohrungsdaten bestätigen, dass diese Widerstandsverschiebung mit einem Übergang von quartärem Sand zu präquartären feinkörnigen Sedimenten wie Schluff, Braunkohle und Ton einhergeht. Es ist zwar bekannt, dass noch tiefere präquartäre Sandschichten existieren, doch sind diese in den tTEM-Modellen nicht zu sehen.

In den Hauptabschnitten dieses Berichts werden die im Untersuchungsgebiet durchgeführten geophysikalischen Kartierungen beschrieben, einschließlich der Feldarbeiten, der Datenverarbeitungsverfahren und der geophysikalischen Ergebnisse. Es folgen die Beschreibung des Geologischen 3D-Modells, eine Übersicht der bereitgestellten Daten sowie abschließend die Schlussfolgerungen.

Anhang 1 bietet eine allgemeine Einführung in die verwendeten geophysikalischen Methoden. Anhang 2 enthält eine ausführliche Dokumentation der geophysikalischen Systeme, einschließlich Kalibrierung der Instrumente, umfassender Konfigurationsdetails und Informationen über die Datenverarbeitung und Inversionsparameter. Anhang 3 beinhaltet eine Übersichtskarte der erhobenen Daten. Anhang 4 und Anhang 5 enthalten Karten des mittleren Widerstands in ausgewählten Tiefen- bzw. Höhenniveauintervallen. Anhang 6 enthält Angaben zur maximalen Untersuchungstiefe (Depth of Investigation = DOI) der Ergebnisse. Anhang 7 zeigt Profilschnitte aus dem Geologischen 3D-Modell.

## 2. Geophysikalische Untersuchung und Ergebnisse

Die geophysikalische Untersuchung wurde mit einer Kombination aus zwei einschlägigen Sondierungsverfahren durchgeführt, wobei zum einen die tTEM-Methode zur Anwendung kam, bei der die Messinstrumente mit einem Quad über Wald- und Feldwege gezogen werden, und zum anderen das FloaTEM-Instrumentensystem genutzt wurde, das auf zwei Schlauchbooten von einem kleinen Motorboot über Gewässer gezogen wird. Dabei basieren beide Verfahren im Kern auf ein und derselben tTEM-Plattform. Abgesehen von Unterschieden in der Schleppeinrichtung gibt es nur geringfügige Änderungen, die beide Systeme voneinander unterscheiden, so etwa der Abstand zwischen Sender und Empfänger, das Aufzeichnungsintervall der Messungen und ähnliches. Aus diesem Grund wird sich der folgende Abschnitt auf die Beschreibung der tTEM-Methode konzentrieren und nur, wo dies relevant ist, einige der Unterschiede bei der Verwendung eines FloaTEM-Setups erläutern.

### 2.1 tTEM-/FloaTEM-Verfahren

Das tTEM-Instrument ist ein speziell für hydrogeophysikalische und Umweltuntersuchungen konzipiertes elektromagnetisches Zeitbereichs-(TDEM) Messsystem, das nach langjähriger Forschungsarbeit an der Universität Aarhus in Dänemark entwickelt wurde. Das System geht zurück auf das Pulled-Array TEM-System (PATEM), ein Transienten-Elektromagnetik-Messsystem im Schleppverfahren, das später auch zur Entwicklung des luftgestützten SkyTEM-Systems beitrug. Die FloaTEM-Methode ist die auf Gewässern nutzbare Variante der „tTEM-Verfahrensfamilie“, die noch weitere spezialisierte Geräteklassen, wie z.B. das SnowTEM-Instrument für den Einsatz in schneebedecktem Gelände umfasst.

Dieser Abschnitt beschreibt die tTEM-/FloaTEM-Messvorrichtung, die Dokumentation zur Kalibrierung, die Ergebnisse wiederholter Vermessungslinien innerhalb des Untersuchungsgebiets und die für dieses spezifische Kartierungsprojekt vorgenommenen Einstellungen. Damit soll in erster Linie ein tieferes Verständnis der Verfahren zur Erfassung, Verarbeitung und Inversion der Messdaten vermittelt werden. Da beide Messvorrichtungen grundlegende Gemeinsamkeiten aufweisen, wird das tTEM-Instrument relativ umfassend und weit gefächert beschrieben, während sich die Erläuterungen zum FloaTEM-Instrument auf die wesentlichen Unterschiede zu ersterem beschränken.

#### 2.1.1 tTEM-Instrumentenaufbau

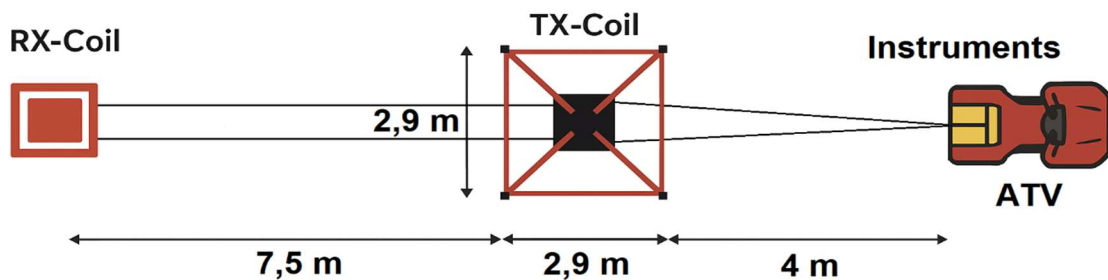
Das tTEM-System misst kontinuierlich, während es auf Bodenniveau von einem Geländefahrzeug gezogen wird. Dabei findet ein speziell entwickelter Schlittenrahmen mit nichtmetallischen Bauteilen Verwendung, um etwaige Störfelder zu vermeiden.

Die Anordnung ist so konzipiert, dass sie eine hohe Oberflächenauflösung mit frühen Zeitfenstern und einer schnellen Wiederholfrequenz gestattet. Das tTEM-System basiert auf einer versetzten Schleifenkonfiguration, bei der die Empfängerspule (Rx-Spule) rund 8,0 m hinter der Senderspule (Tx-Spule) hergezogen wird. Die Rx-Spule ist horizontal polarisiert und misst somit die z-Komponente der Magnetfelder.

Das tTEM-System nutzt eine Zwei-Momenten-Konfiguration, wobei ein kleines und ein großes Pulsmoment (auch Low-Moment, LM, bzw. High-Moment, HM, genannt) unterschiedliche Erkundungstiefen im Untergrund ermöglichen. Dabei weist das Low-Moment die beste Datenauflösung im flachen Untergrund auf, während die Empfindlichkeit des High-Moments auf die tieferen Bodenschichten fokussiert. Das System ist somit in der Lage, beide Bereiche abzubilden. Darüber hinaus lässt sich durch weitere Anordnungsvarianten die maximale Penetrationstiefe des Systems beeinflussen, z. B. die "flache" 331-Konfiguration, die einen Senderrahmen mit 3×3 m Kantenlänge und eine Spule mit nur einer Wicklung aufweist, und die auf tiefere Schichten fokussierende 333-Konfiguration mit dem gleichen Senderrahmen, jedoch mit drei Spulenwicklungen und einer niedrigeren Wiederholfrequenz.

Die tTEM-Daten für dieses Projekt wurden mit der 333-Konfiguration erhoben, bei einer Wiederholfrequenz von 1055 Hz/244 Hz für das Low- bzw. High-Moment, was 1055/244 Abklingkurven bzw. Impulsen pro Sekunde entspricht. Die hohe Zahl an Messpunkten erlaubt eine fortgeschrittene Datenverarbeitungsmethode, die den Signal-Rausch-Abstand optimiert.

Das tTEM-System wird von einem Quad oder ähnlichen Fahrzeug geschleppt. Der Abstand zwischen Quad und Tx-Spule beträgt 3.0 m. Die Tx-Spule bildet eine quadratische Schleife mit 3 m Kantenlänge, die von den roten Auslegern aufgespannt wird, wie in Bild 2 zu sehen. Zur exakten Positionierung des Systems befindet sich vorn am Senderrahmen ein GPS-Sensor. Die Rx-Spule liegt auf einem kleinen Schlitten. Senderelektronik, Empfangstechnik, Stromversorgung usw. sind allesamt direkt hinter dem Fahrersitz angeordnet.



**Bild 2: Die tTEM-Systemkonfiguration.**

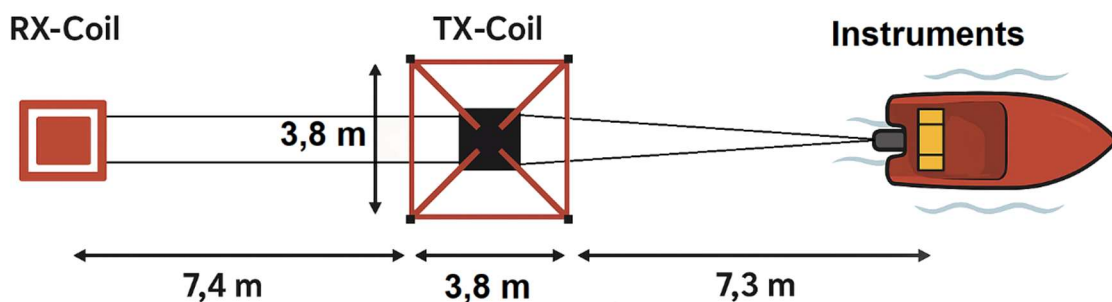
### 2.1.2 FloaTEM-Instrumentenaufbau

Die FloaTEM-Methode basiert, wie bereits erklärt, auf der tTEM-Plattform, die einige Jahre vor FloaTEM entwickelt wurde. Aufgrund des Bedarfs an hochpräziser hydrogeophysikalischer Kartierung von Gewässern wurde ein neues System entwickelt, montiert auf zwei Schlauchbooten und gezogen von einem kleinen motorgetriebenen Boot. Das System ist so leicht, dass es prinzipiell mit nahezu allen geeigneten Mitteln bewegt werden kann. So führte Ramboll beispielsweise erfolgreich Untersuchungen in sehr flachen Gewässern durch, bei denen die Messanordnung von zwei Teammitgliedern zu Fuß manuell gezogen wurde.

Die Tx-Spule bildet eine quadratische Schleife mit 3,8 m Kantenlänge, die von den roten Auslegern, wie in Bild 3 dargestellt, getragen wird. Zu beachten ist, dass die im Bild gezeigten Abstände zwischen den einzelnen Elementen nur indikativ sind, da bei einer schwimmenden Konfiguration bereits bei unmittelbar aufeinander folgenden Messungen geringe Abweichungen auftreten können. Um eine präzise Datenverarbeitung zu gewährleisten, wird die

Systemgeometrie in jedem Einzelfall neu vermessen, um im Anschluss an die Sondierung ein korrektes Datenhandling sicherzustellen.

Die tTEM-Daten für dieses Projekt wurden mit einer 443 Ein-Moment-Konfiguration erhoben, bei einer Wiederholfrequenz von 110 Hz, was 110 Abklingkurven bzw. Impulsen pro Sekunde entspricht. Dieses High-Moment-System schafft einen großen Signal-Rausch-Abstand, der die Durchdringung des Gewässerunterbodens gewährleistet.



**Bild 3: Die FloaTEM-Systemkonfiguration.**

## 2.2 Felduntersuchung

Die Arbeiten im Feld umfassten drei Tage tTEM-Vermessung vom 1. bis 3. Oktober 2025 und zwei Tage FloaTEM-Vermessung am 4. und 5. Oktober 2025, erstere am Großsee und letztere am Pinnower See. Fotos der Felduntersuchungen finden sich in Bild 4.

Vor den Erkundungsarbeiten wurde das System am dänischen Nationalen Testzentrum ausführlich geprüft und dokumentiert. Die Ergebnisse sind in Anhang 2 dargestellt. Sie weisen nach, dass das System die geophysikalischen Modelle der dänischen Test- und Referenzstelle exakt reproduziert.

Detaillierte Informationen zu den einschlägigen Methoden und die entsprechenden Spezifikationen finden sich in Anhang 1 bzw. Anhang 2.



**Bild 4: Das tTEM- und das FloaTEM-Systeme (Fotos der tatsächlichen Vermessungsarbeiten).**

### 2.3 Datenerhebung

Vor Sammlung der Daten wurden GIS-Ebenen mit geografischen Standortdaten des Untersuchungsgebiets und tTEM/FloaTEM-Vermessungslinien in die Navigationssoftware importiert, was eine Echtzeitverfolgung der Vermessungspfade ermöglichte. Dies erlaubte es dem Bediener zudem, die Abtastdichte der Daten zu überschauen und eine vollständige Abdeckung des Standorts zu sichern. Während der Vermessung prüfte der Bediener häufig die Qualität der Daten und die Funktion des Gesamtsystems.

In vielen Fällen waren die Feldstrecken für das tTEM-Vermessungsgebiet recht schmal, was zu einer relativ niedrigen Geschwindigkeit des Quads und in einigen Fällen zur Notwendigkeit führte, vorgesehene Vermessungslinien auszulassen.

Im Untersuchungsgebiet wurden mehrere kleinere, oftmals isolierte Standorte mit erkennbar verzerrten Daten beobachtet. Da es in einigen Fällen nicht möglich war, die Ursachen eindeutig zu bestimmen, interpretierten wir diese als z. B. durch metallische Zäune entlang der Waldwege entstandene Verzerrungen. Auf dem Pinnower See West mussten Daten in einem Streifen quer über den zentralen Teil des Sees ausgeklammert werden. Da während der Untersuchung keine sichtbaren Ursachen dafür zu erkennen waren, wird angenommen, dass den See in diesem Bereich z. B. ein Stromkabel durchquert. Störungen wurden auch auf anderen, kleineren Abschnitten nahe dem Seeufer festgestellt, wobei es in diesen Fällen wahrscheinlicher ist, dass sie durch sich in der Nähe befindliche Elemente an Land verursacht wurden.

An den genannten Lokationen war es notwendig, einen Teil der Daten zu entfernen. Trotz dieser isolierten Probleme war die Gesamtqualität der gesammelten Daten gut, insbesondere bei den FloaTEM-Daten. Eine Standortkarte der Vermessungslinien ist in Bild 1 und Anhang 3 dargestellt.

### 2.4 Instrumentenprobleme

Während der Untersuchung wurden keine Instrumentenprobleme festgestellt.

### 2.5 Datenqualitätskontrolle

Zum Vermessungsstart am Morgen des 1. Oktober montierten die Ramboll-Mitarbeiter das tTEM-System und inspizierten es sorgfältig, um sicherzustellen, dass alle Teile einschließlich Drahtleitern, Bolzen und Verknüpfungen intakt und betriebssicher sind. Die gleiche Start-up-Inspektion erfolgte in den folgenden Tagen. Sobald das System vollständig angelaufen war, wurden GPS, tTEM-Sender und -Empfänger überprüft. Dasselbe Setup fand an den beiden Feldtagen mit FloaTEM vom 4. bis 5. Oktober Verwendung.

Während der Datenerhebung führte das Feldpersonal eine Echtzeit-Qualitätskontrolle (QC) der Daten durch. Jeden folgenden Morgen nahm ein erfahrener Geophysiker eine zusätzliche Qualitätskontrolle der Daten vor, einschließlich vorläufiger Datenverarbeitung und -inversion. Die Ergebnisse zeigten Konsistenz und ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis. Während des QC-Prozesses wurden keine Probleme festgestellt.

## 2.6 Datenverarbeitung und -inversion

Verarbeitung und Inversion der tTEM-Daten erfolgten mit dem Softwarepaket Aarhus Workbench (<https://www.aarhusgeosoftware.dk/aarhus-workbench>). Bei dieser Workbench handelt es sich um ein gut dokumentiertes und technisch solides Softwarepaket zur Verarbeitung und Inversion elektromagnetischer und geoelektrischer Daten.

Die gesammelten tTEM-Daten durchliefen folgende Verarbeitungsschritte:

1. Prüfung, ob nützliche Daten während der Datenerfassung unbeabsichtigt maskiert wurden.
2. Import der Daten in die dänische Formatdatenbank für geophysikalische Daten, kurz GERDA (**GE**ophysical **R**elationship **DA**tabase).
3. Prüfung, ob die an Wendepunkten erfassten Daten erfolgreich maskiert sind, um Daten auszuschließen, bei denen das System nicht korrekt ausgerichtet war.
4. Prüfung aller sekundären Daten auf Konformität mit den Spezifikationen bzw. darauf, dass sie entlang der Vermessungslinien nicht wesentlich voneinander abweichen.
5. Verarbeitung der GPS-Daten.
6. Allen Daten wird ein normgerechtes gleichmäßiges 3%-Rauschen zugewiesen.
7. Dazu wird ein standardisiertes Verarbeitungsschema definiert, um Daten automatisch auszusondern bzw. ihnen das Rauschen zuzuweisen.
8. Jede Vermessungslinie wird manuell inspiziert. Als verrauscht eingestufte Daten, die im vorangegangenen Schritt nicht bereits ausgesondert wurden, werden entfernt. Das Rauschen kann durch Oberleitungen, vergrabene Stromkabel, Metallzäune und andere künstliche Quellen verursacht sein. Dies geschieht sowohl für die einzelnen Sondierungen als auch für eine Abfolge von Sondierungen entlang der Vermessungslinie.
9. Jedem Messpunkt werden Höhenwerte aus einem digitalen Höhenmodellgitter zugewiesen.
10. Mittelung der Daten entlang der Vermessungslinien durch trapezoidale Filterung, die den späten Zeitfenstern (die tiefere Strukturen repräsentieren) einen größeren Signal-Rausch-Abstand beschert, ohne die hohe Auflösung für frühe Zeitfenster (für oberflächennähere Strukturen) zu beeinträchtigen.
11. Erarbeitung eines endverarbeiteten Datensatzes mit einer Auflösung von etwa 4 m.

Während der Datenverarbeitungsphase wurde beschlossen, das Low-Moment aus der folgenden Inversion auszunehmen, da sich die Daten als zu verrauscht erwiesen. Bei Verwendung der 333-Konfiguration im tTEM ist dies ein bekannter Fall, wobei mit Ausnahme des Bereichs unmittelbar unter der Bodenfläche auch kein relevanter Einfluss auf die Ergebnisse zu erwarten war. Weitere Informationen sowohl zur tTEM- als auch zur FloaTEM-Datenverarbeitung finden sich in Anhang 2.

Um maximale Konsistenz zwischen den geophysikalischen Datensätzen zu gewährleisten, wurde der vollständige Verarbeitungsdatensatz – aus tTEM und FloaTEM – in folgenden Schritten verknüpft und invertiert:

1. Festlegung horizontaler und vertikaler Randbedingungen für die Widerstandsdaten, die Anzahl der Modellschichten und die Schichtstärken.
2. Inversion der Verarbeitungsdaten über den räumlich verknüpften Ansatz (SCI) ([Viezzoli et al., 2008](#)). Eine verknüpfte Version der Datensätze aus beiden Messverfahren (tTEM und FloaTEM) sichert die maximale Kontinuität der Inversion.
3. Die Daten werden als Tiefenschnitte dargestellt. Sollten diese Tiefenschnitte einige deutliche Anomalien aufzeigen, wird die Verarbeitung der maßgeblichen Daten nochmals geprüft (Schritte 1–8 der Verarbeitungsphase) und werden die Daten erneut invertiert.
4. Basierend auf der Sensitivitätsanalyse wird für jedes Widerstandsmodell die Untersuchungstiefe (DOI) berechnet.

Weitere Informationen zum Inversionsverfahren sind in Anhang 2 zu finden.

## 2.7 Geophysikalische Ergebnisse

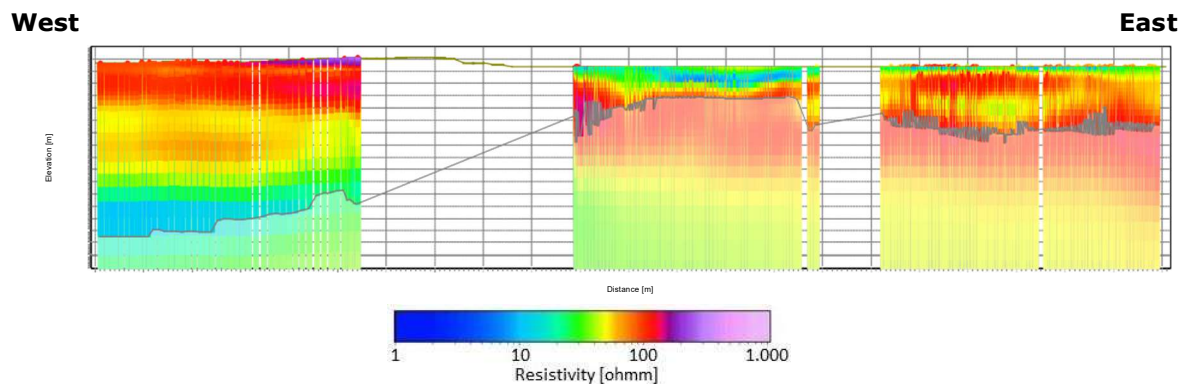
Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchung. Die Messdaten wurden so modelliert, dass sie die elektrischen Widerstände in unterschiedlichen Tiefen darstellen, deren Verteilung sich dann im lithologischen Profil interpretieren lässt, um die Geologie der Fundstelle besser zu verstehen. Aufgrund der hohen Datendichte führte die Inversion der Daten hier zu einem Quasi-3D-Widerstandsmodell des Vermessungsgebietes. Die laterale Auflösung ist besonders detailliert in Gebieten, in denen die FloaTEM-Methode genutzt wurde (auf den Gewässern), da es hier möglich war, die Messungen ohne einschränkende Faktoren, z. B. die gegebenen Verläufe der Waldwege, durchzuführen.

Die Ergebnisse werden als Grundrisskarten der mittleren Widerstände nach Tiefenintervallen (Anhang 4) und auf verschiedenen Elevationen bzw. Höhen über Normalhöhennull (NHN, Anhang 5) präsentiert. Darüber hinaus zeigt Anhang 7 das Geologische 3D-Modell in Querschnitten zusammen mit den tTEM-Messergebnissen.

### 2.7.1 Untersuchungstiefe

Die Untersuchungstiefe (DOI) bezeichnet die Tiefe, bis zu der das resultierende Modell als zuverlässig angesehen werden kann. Die DOI hängt von den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet, Variationen im elektromagnetischen Rauschpegel und den Spezifikationen des tTEM-Systems ab. Im gesamten Vermessungsgebiet wurde für jedes Modell die DOI berechnet.

Zur Veranschaulichung ist in Bild 5 ein vertikaler Querschnitt des Vermessungsgebiets dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse aus Tiefen, die über die DOI hinausgehen, durch verblassende Farben dargestellt. Der Schnitt zeigt eine Kombination von tTEM- und FloaTEM-Modellen aus einem Bereich westlich vom bzw. auf dem Pinnerow See West.



**Bild 5: Querschnitte geophysikalischer Modelle; die graue Linie ist die Untersuchungstiefe (DOI). tTEM-Daten werden von 0 bis 270 m und FloaTEM-Daten von 490 bis 1.100 m angezeigt.**

Die berechnete DOI wird sowohl mittels Tiefen- als auch Höhenniveaudaten in Anhang 6 verdeutlicht. Zu beachten ist, dass Erfahrungen hier auf eher optimistische Werte hindeuten und keine Datenabdeckung bis zu einer Tiefe von mehr als 120 m unter der Oberfläche erwartet werden kann, ja diese in vielen Fällen sogar nur bis in geringe Tiefen gegeben ist.

### 2.7.2 Übersichtskarten der mittleren Resistivität

Die Kartierung der Widerstandsmittelwerte veranschaulicht detaillierte Strukturen und gibt über Variationen in jedem Tiefenintervall quer durch die Vermessungsfelder Auskunft. Anhang 4 präsentiert Grundrisskarten des Widerstandsmittels für unterschiedliche Tiefenintervalle, die vom Geländeniveau bis zu 150 m unter der Oberfläche reichen. Um die höhere Auflösung der Methode im flachen Untergrund im Vergleich zu tieferen Strukturen widerzuspiegeln, sind die Karten in mit der Tiefe zunehmender Intervallgröße dargestellt. Die Karten in Anhang 5 zeigen die Widerstandsverteilung auf geografischen Höhenniveaus mit 10 m Äquidistanz, beginnend mit 80 m (über dem Meeresspiegel) bis -100 m.

Beide Darstellungsweisen zeigen dieselben Strukturen, doch bieten die Tiefenintervallkarten in der Regel eine präzisere Grundlage zur Interpretation der flachen Geologie, da Höhenunterschiede im Vermessungsgebiet aus der Gleichung herausgenommen sind. Der folgende Abschnitt basiert hauptsächlich auf solchen Tiefenintervallkarten und hebt lediglich Strukturen hervor, die in den Höhengniveauekarten leichter zu erkennen sind.

Im flachen Untergrund, vom Geländeniveau bis ca. 6 m unter der Oberfläche / Höhe ü. M. 30 bis 20 m, zeigen die Ergebnisse eine Geologie mit allgemein hohem Widerstand. Der Widerstand ist jedoch im östlichen und nordöstlichen Teil des Vermessungsgebiets generell am höchsten (80 bis 100  $\Omega\text{m}$ ). Im Allgemeinen deuten die Widerstände in diesem Bereich auf eine Geologie hin, die überwiegend aus Sanden besteht. Im nordwestlichen Teil besteht jedoch die Möglichkeit, sandgemischte Tone zu finden, da Widerstandswerte bis zu 50  $\Omega\text{m}$  zu beobachten sind. Die Widerstände der Seen unterscheiden sich in diesen Tiefenintervallen deutlich von denen im übrigen Gebiet, da sie vornehmlich die Wassersäule darstellen.

Ab etwa 6 m unter der Oberfläche, insbesondere von 10 bis 15 m unter Bodenniveau, wird ein Widerstandsanstieg deutlich, was ein klares Zeichen für sandige Materialien ist. In diesen Intervallen ist auch eine Verschiebung im Widerstand der Seen zu beobachten, was zeigt, dass der Seeboden nahe bzw. gerade erreicht ist. Widerstandsanstiege fallen zuerst in Nähe der Seeufer ins Auge, was logisch ist, da die Seen hier generell flacher sind. Allerdings sollte auch in Betracht gezogen werden, dass womöglich ein Aspekt der elektromagnetischen Felder Sedimentlagen am Ufer "erreicht", wenn die Messeinrichtungen sich diesen nähern.

Im Tiefenintervall von 20 bis 25 m unter der Bodenoberfläche sind in den meisten Teilen des Untersuchungsgebiets sehr hohe Widerstände zu beobachten, was auf sandige oder möglicherweise kiesige Sedimente hinweist. Die unter den Seen beobachteten Widerstandspegel haben im Vergleich zum flacheren Teil ebenfalls zugenommen, sind aber immer noch deutlich geringer als in den Waldgebieten. Bei der Betrachtung der Widerstände unter Gewässern sollten die Ergebnisse allerdings unterschiedlich bewertet werden, da die Resistivität im selben Sedimenttyp hier oft niedriger ist, z. B. durch Wassersättigung. Ausgehend von den Karten der mittleren Resistivität ist es daher sehr wahrscheinlich, dass die Geologie zwischen den Seen ebenfalls von Sand dominiert wird. Es gibt jedoch einen wesentlichen Unterschied zwischen den Widerstandsstrukturen unter dem Großsee und den drei Teilseen im Pinnower See: Während der Widerstand im erstgenannten Bereich sehr homogen ist (Widerstände von etwa 80 bis 100  $\Omega\text{m}$ , was auf sandige Materialien hinweist), ist er unter dem Pinnower See deutlich heterogener mit Widerständen von 50 bis 100  $\Omega\text{m}$ . Dies deutet darauf hin, dass die Geologie unter dem See deutlich verschiedenartiger ist und sowohl aus tonhaltigen als auch sandigeren Materialien bestehen könnte. Dies wird in Abschnitt 2.7.3 weiter erörtert.

Ab ca. 30 m unter der Oberfläche, und noch deutlicher ab dem Intervall von 40 bis 50 m Tiefe ist eine Verschiebung hin zu niedrigeren Widerständen zu beobachten. Dies zeigt sich zunächst im östlichen/nordöstlichen Teil des Gebiets und weist auf einen Übergang zu feinkörnigeren Sedimenten hin, somit einer stärker von Ton dominierten Geologie. Wie in Kapitel 3 erläutert, sind dies erste Hinweise auf die obere Lage der präquartären Sedimente im Untersuchungsgebiet.

Mit größeren Tiefen werden die im Gebiet beobachteten Widerstände immer geringer. Im Intervall von 80 bis 90 m unter der Oberfläche beispielsweise sind in weiten Teilen des Gebiets niedrige Resistivitäten von etwa 10 bis 30  $\Omega\text{m}$  zu beobachten, was eindeutig eine tondominierte Geologie ausweist. Im selben Tiefenintervall zeigt sich ebenfalls eine Tendenz zu höheren Resistivitäten im östlichen/nordöstlichen Teil des Vermessungsgebiets, was auf mögliche geologische Unterschiede mit etwas grobkörnigeren Materialien hinweist.

Die tiefsten Intervalle weisen einen weiteren Übergang zu niedrigeren Resistivitäten um 10 bis 20  $\Omega\text{m}$  aus.

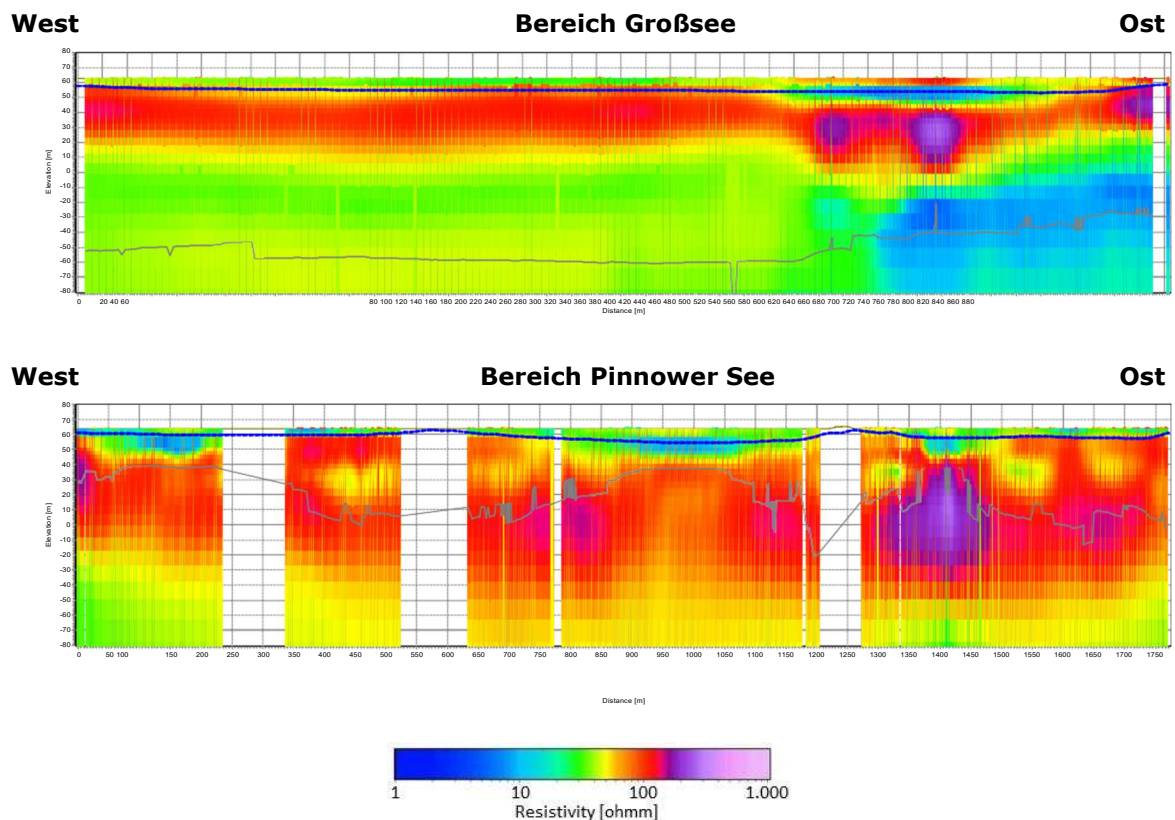
### 2.7.3 Querschnitte

Bild 6 zeigt vertikale Querschnitte, die die geophysikalischen Ergebnisse unter den Bereichen Großsee und Pinnower See darstellen. Diese Schnitte decken allein das Gebiet der Seen ab, wie durch die flache Topografie angezeigt, und enthalten somit nur FloaTEM-Daten. Die beiden Landteilungen zwischen den drei Teilbereichen des Pinnower Sees sind jedoch im unteren Bild an den geringen Elevationszunahmen um die Koordinaten X = 550 m und X = 1250 m sowie am Fehlen von FloaTEM-Daten zu erkennen.

Zusätzlich ist etwa bei X = 250 bis 350 m der Abschnitt zu sehen, auf dem Daten entlang eines quer über den See verlaufenden Streifens ausgeschlossen werden mussten.

Wie Bild 6 deutlich macht, lassen sich unter dem Großsee und den drei Teilbereichen des Pinnower Sees sehr unterschiedliche Widerstandsverteilungen beobachten. Während die Verteilung unter dem Großsee sehr homogen ist (Resistivitäten von etwa 80 bis 100  $\Omega\text{m}$ , was auf sandige Materialien hinweist), stellt sie sich unter dem Pinnower See mit Resistivitäten von 50 bis 100  $\Omega\text{m}$  deutlich heterogener dar.

Wie in Abschnitt 2.7.2 erläutert, deuten diese Variationen darauf hin, dass die Geologie unter dem Pinnower See deutlich heterogener ist und sowohl aus tonhaltigen als auch eher sandigen Materialien bestehen könnte.



**Bild 6: Geophysikalische Ergebnisse der Gebiete Großsee und Pinnower See in der Querschnittsdarstellung**

### 2.7.4 Zaundiagramme

In den folgenden Bildern wurden die Vertikalschnittmodelle zusammengesetzt und aus verschiedenen schrägen Perspektiven visualisiert. Diese Methode liefert eine dreidimensionale Darstellung der Ergebnisse.

Bild 7 und Bild 8 zeigen jeweils den Blick auf die Schnittmodelle von West/Südwest bzw. Ost/Nordost her.

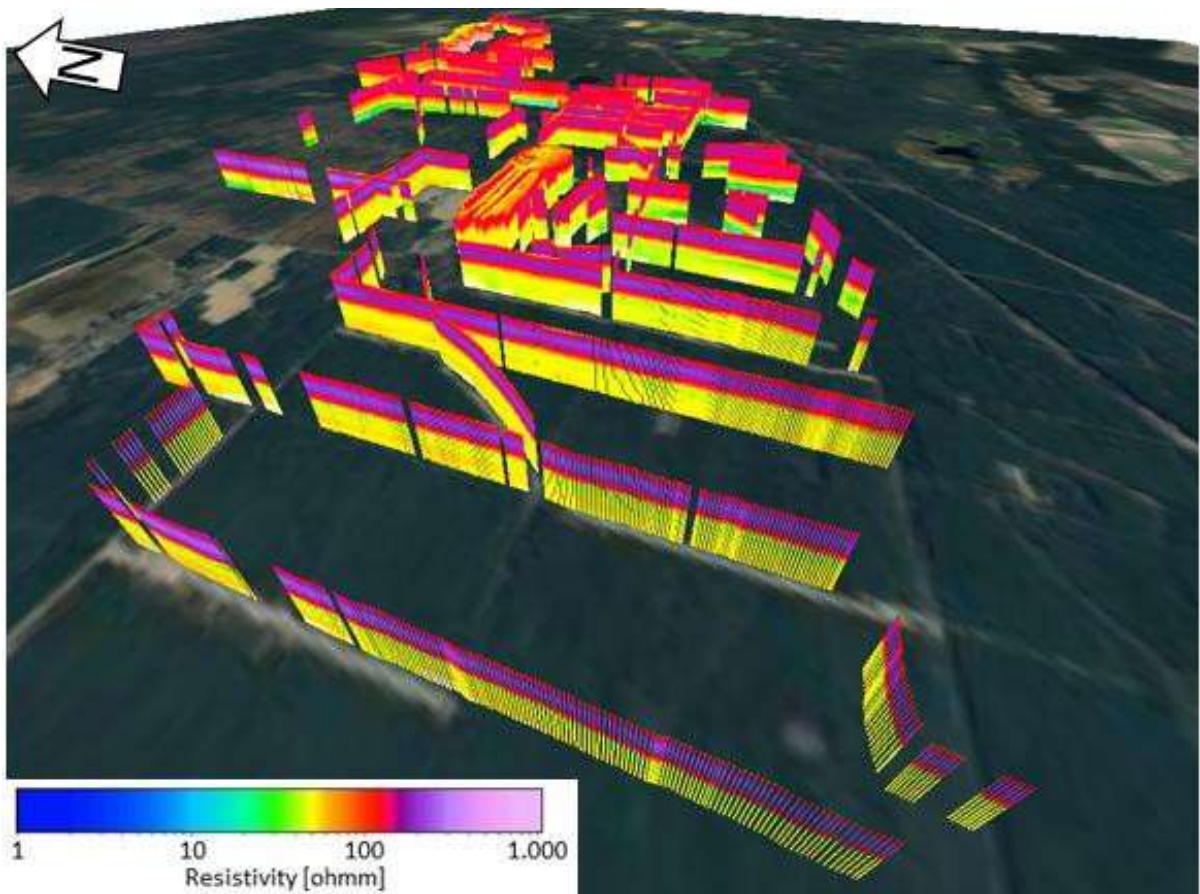


Bild 7: Geographische Ergebnisse dargestellt als 3D-Zaundiagramm – Blick aus West/West-Südwest

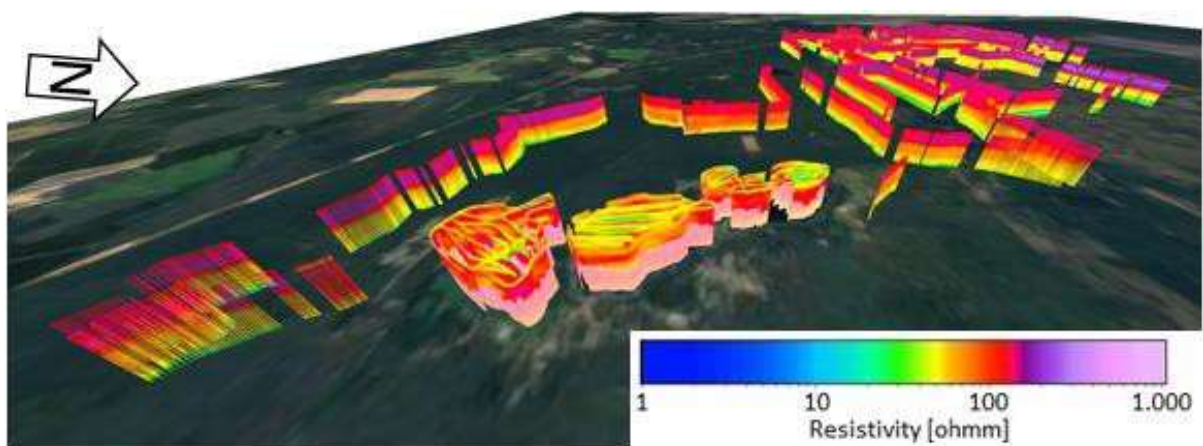


Bild 8: Geographische Ergebnisse dargestellt als 3D-Zaundiagramm – Blick aus Ost/Ost-Nordost

### 3. Geologisches 3D-Modell

Mithilfe der Software GeoScene3D wurde auf Grundlage von Bohrungs- und tTEM-Daten aus dem Projektgebiet ein Geologisches 3D-Modell erstellt. Das resultierende Modell besteht aus 10 Schichten.

#### 3.1 Digitalisierung der Bohrungsdaten

Ramboll lagen Bohrberichte zu 14 Bohrlöchern im Erkundungsgebiet vor. Die Daten wurden vom LBGR bereitgestellt.

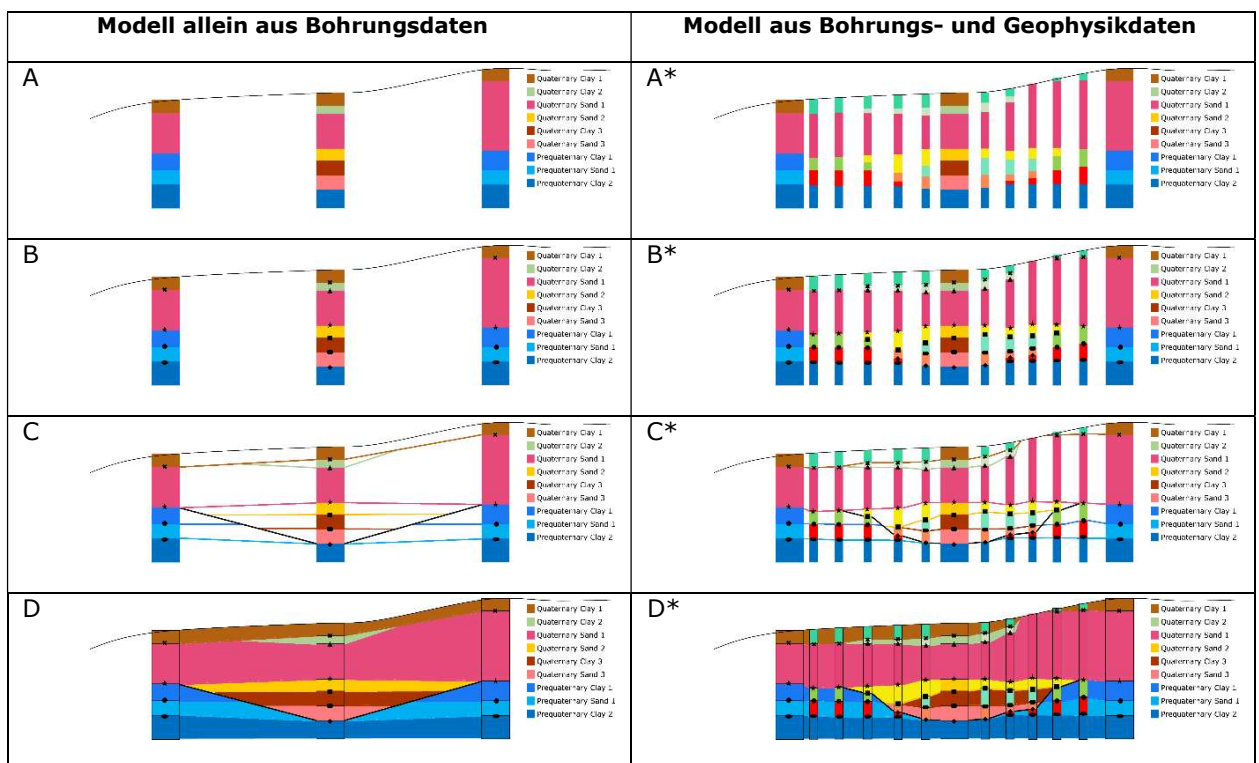
Um eine digitale Datenbank der Bohrungsinformationen für das Projekt zu erschaffen, wurden die Bohrberichte mithilfe der Ramboll-internen Software "GeoGIS" digitalisiert. Dazu wurden Bohrloch-IDs, Schichtgrenzen, lithologischen Schichtbeschreibungen usw. aus den vom LBGR zur Verfügung gestellten PDFs der Bohrberichte migriert. Im nächsten Schritt konnte aus GeoGIS eine Datenbank in einem Format (.mdb) extrahiert werden, das sich in die Modellierungssoftware GeoScene3D importieren ließ.

### 3.2 3D-Modellierungsverfahren

Das Geologische 3D-Modell wird in der Software GeoScene3D aufgebaut, die im dänischen Grundwasserkartierungsprogramm weit verbreitet Anwendung findet.

Das der geologischen 3D-Modellierung zu Grunde liegende Prinzip ist in Bild 9 veranschaulicht.

Das Bild zeigt zwei Szenarien, eines mit nur drei Bohrungsprofilen (Bilder A-D) und eines mit einer Kombination derselben drei Bohrungen mit dazwischen eingefügten geophysikalischen Modellen (Bilder A\*-D\*). Das Farbschema der geophysikalischen Schichten basiert lose auf einer konventionellen "kalt zu warm"-Skala, bei der niedrige Widerstände (feinkörnigen Sedimenten entsprechend) "kalte" Farben erhalten, während hohe Widerstände (grobkörnigen Sedimenten entsprechend) in "warmen" Farben erscheinen.



**Bild 9: Grundprinzip der 3D-Modellierung mittels Geoscene3D unter Einbeziehung nur der Bohrungsdaten (A-D) sowie einer Kombination aus Bohrungs- und geophysikalischen Daten (A\*-D\*).**

Das Verfahren zur geologischen Modellierung lässt sich in vier Schritte unterteilen, die hier anhand der Darstellung mit ausschließlich Bohrungsdaten (Teilbilder A-D) erklärt werden sollen:

- A.** Die Daten werden in die Geoscene3D-Umgebung importiert, wo sie sowohl als 3D- als auch als 2D-Profile angezeigt werden können. Die Anzahl der Modellschichten, die zur Auflösung der Geologie erforderlich sind, wird evaluiert.
- B.** Die Daten werden interpretiert und in Modellschichten "übersetzt", wobei Interpretationspunkte verwendet werden, die entweder ganz oder teilweise an Daten (Bohrungsdaten oder geophysikalische Daten) gekoppelt werden können („Snapping“). Gesnappte Punkte erben ihre X- und Y-Koordinaten von den Standorten der Bohrlöcher und die Z-Werte (Elevation) von den Schichtgrenzen, an die sie gesnappt sind.

Gleichzeitig wird dem Interpretationspunkt eine "Snap-ID" zugewiesen, die angibt, an welche Art von Daten der Punkt geknüpft ist. Einige Punkte sind nicht an eine Schichtgrenze oder gar direkt an Daten gebunden, sondern erhalten ihre Z-Koordinaten von der durch den Modellierer gewählten Tiefenlage.

In unserem Beispiel werden die Interpretationspunkte für den oberen Ton, Quartärton 1, am Boden der oberen Tonschicht in allen drei Bohrlöchern platziert.

- C.** Mithilfe integrierter Interpolationsroutinen zwischen Interpretationspunkten werden für jede Modellschicht Rasterflächen erstellt. Wo sich solche Raster überlappen oder kreuzen, werden zwecks Korrektur Qualitätskontrollen durchgeführt.

In unserem Beispiel wurde mit diesen Routinen ein Raster erstellt. Die schwarze Linie repräsentiert eine interpretierte Fläche, den „Boden der Quartärschichten“. Dieser Fläche ist hohe Priorität zugewiesen. Sie wird tiefere Schichtgrenzen (Raster) immer überschreiten und stellt z.B. verdeckte Täler (sogenannte „buried valleys“) usw. dar.

Zum Beispiel wird die Rasterfläche, die den „Boden von Präquartärton 1“ repräsentiert, in der Praxis das im mittleren Profilschnitt interpretierte „buried valley“ durchqueren. Das den Boden der quartären Schichten darstellende Raster maskiert dies jedoch in der Senke (praktisch drückt es die Rasterfläche von Präquartärton 1 nach unten, so dass sie genau der Quartär-Bodenfläche folgt und daher dort, wo das „buried valley“ modelliert ist, nicht vorhanden ist).

- D.** Die Modell-Schichtgrenzen werden gepaart, um Schichten mit einer oberen und einer unteren Begrenzung zu erzeugen. Die Schicht kann so eingefärbt werden, dass sie eine kompakte Schicht ganz bestimmter Lithologie visualisiert.

In unserem Beispiel wird der Hohlraum zwischen dem Boden von Quartärton 2 und dem Boden des quartären Sandes 1 als die Schicht Quartärsand 1 betrachtet.

Das Verfahrensprinzip lässt sich auch unter Einbeziehung der geophysikalischen Daten erläutern (Bilder A\*-D\*). Es folgt hier denselben Regeln mit wenigen Ausnahmen:

- Bohrungsdaten haben Vorrang, da sie unmittelbar gewonnene Daten sind, während geophysikalische Daten indirekt erhobene Daten darstellen, d. h. Interpretationspunkte sollten immer zuerst den Bohrungsdaten und erst anschließend den geophysikalischen Daten zugewiesen werden.
- Im Prinzip führt dies zu besser aufgelösten Schichtgrenzen. Da es in der Regel weit mehr geophysikalische Daten als Bohrungsdaten gibt, kann es sinnvoll sein, nicht *allen* Modellen Interpretationspunkte zuzuweisen, da das quantitative Missverhältnis dazu führen kann, dass Bohrungsdaten bei den Rasterungen untergewichtet werden.
- Bei Vorliegen einer hohen geophysikalischen Datendichte in Kombination mit den Bohrungsdaten ist ein Modell mit einer deutlich höheren Auflösung geologischer Strukturen erstellbar. Einige Beispiele werden in den Bildern gezeigt: 1. Auf der rechten Seite des Profils, wo kein quartärer Ton 1 vorhanden ist, ließe sich ein geologisches Fenster für Sand abbilden. Dies kann ein Problem sein, da z. B. Schadstoffe tiefere Grundwasserleiter infiltrieren könnten; 2. Es kann eine detailliertere Abgrenzung des quartären Tons 2 vorgenommen werden; und 3. Ein „buried valley“ in den tieferen Lagen kann präziser abgegrenzt und das Schüttmaterial kartiert werden.

Das Bild zeigt Beispiele dafür, wie die Kombination aus Bohrungs- und Geophysikdaten das optimale Ergebnis liefert. Beispielsweise ist zwischen Quartärsand 3 und Präquartärsand 1 nur eine geringere Widerstandsänderung zu beobachten. Ohne die Daten der Bohrungen wäre dieser Bereich anhand der geophysikalischen Daten allein wahrscheinlich nicht als zwei unterschiedliche geologische Einheiten interpretiert worden. Andererseits würde man bei ausschließlich Bohrlochdaten zwar die lithologisch/geologischen Einheiten erkannt haben, jedoch die Grenzen zwischen diesen nicht kennen. Im Endeffekt ist es mit einer Kombination aus Bohrungs- und Geophysikdaten möglich, zwischen zwei geologischen Einheiten (Quartärsand 3 und Präquartärsand 1) zu unterscheiden und eine detaillierte Interpretation der Schichtgrenzen entlang des Profils vorzunehmen.

### 3.3 Geologisches 3D-Modell – Ergebnisse

Nach Auswertung der Bohrungsdaten wurden beschlossen, dass das Modell aus drei quartären Sandschichten, einer Seesedimentschicht und zwei Tonschichten, zwei präquartären Tonschichten und zwei präquartären Sandschichten bestehen sollte, insgesamt also ein 10-schichtiges Modell. Das Modell basiert sowohl auf Informationen aus den Bohrungen als auch auf tTEM-Daten. Westlich des Pinnower Sees und im südlichen Teil des Vermessungsgebiets gab es jedoch keine Bohrungen, weshalb das Modell in diesen Bereichen ausschließlich auf tTEM basiert. Die modellierten Schichten werden in Tabelle 1 dargestellt, wo dargelegt wird, welche Formationen und lithologischen Merkmale jede Schicht repräsentiert. Die Flächen beziehen sich jeweils auf den Schichtboden.

**Tabelle 1: Schichten des Modells und von ihnen repräsentierte Formationen und lithologische Merkmale**

<b>Layer</b>	<b>Zeitalter/Formationen</b>	<b>Lithologische Merkmale</b>
<b>Quartärsand 1</b>	Holozän, Pleistozän, Quartär, Weichsel- und Saale-Eiszeit (und Interglazialzeit)	Sand: Feinsand, Mittelsand und Grobsand Einige Kiesschichten Schluff: feinsandig, sandig
<b>Seesediment 1</b>	Möglicherweise Ablagerungen aus der Bildung der Tunnelsenke und/oder organische Formationen der Eem-Interglazialzeit /1/	Organische Stoffe und Schlamm
<b>Quartärton 1</b>	Holozän und Pleistozän, hauptsächlich Weichsel- und Saale-Eiszeiten	Geschiebemergel
<b>Quartärsand 2</b>	Holozän und Pleistozän, hauptsächlich Weichsel- und Saale-Eiszeiten	Sand: Feinsand, Mittelsand und Grobsand Kies
<b>Quartärton 2</b>	Holozän und Pleistozän, hauptsächlich Weichsel- und Saale-Eiszeiten	Geschiebemergel: sandig
<b>Quartärsand 3</b>	Holozän und Pleistozän	Sand: feinkörnig
<b>Präquartärton 1</b>	Holozän und Pleistozän, hauptsächlich Weichsel- und Saale-Eiszeiten	Geschiebemergel, Schluff und Braunkohle
<b>Präquartärsand 1</b>	Grenze zwischen Miozän und Pleistozän	Feinsand
<b>Präquartärton 2</b>	Mittel-Miozän, Obere Brieske-Formation	Geschiebemergel, schluffig und sandig
<b>Präquartärsand 2</b>		Feinsand

Die Flächen wurden durch Interpolation von Interpretationspunkten gebildet. Die Interpolation wurde als „inverse Distanzwichtung“ mit einem Exponenten von 4, einem Glättungsfaktor von 200 und einer maximalen Quadrantzahl von 3 veranschlagt. Die Rastergröße betrug 10 m. Für die beiden Schichten Quartärsand 1 und Seesediment 1 wurde ein Glättungsfaktor 15 verwendet, um die Einbeziehung von Seesedimenten zu ermöglichen und die feineren lokalen Änderungen zu berücksichtigen.

Die Geologie im Gebiet ist relativ einfach, und die quartären Schichten bestehen hauptsächlich aus Sand. Die Struktur der Schichtanordnung des Modells basiert auf den beiden tiefsten Bohrlöchern, Brk DrwGu3 und Gts Söhö 1\_2018, die als einzige Bohrungen die präquartären Schichten erreichten. Die Korrelation zwischen diesen Bohrungen zeigt sich in Anhang 7.3. Nach der Strukturierung der Schichten anhand dieser Bohrungsdaten wurde das Modell räumlich erweitert, um auch die übrigen Daten im Projektgebiet abzudecken.

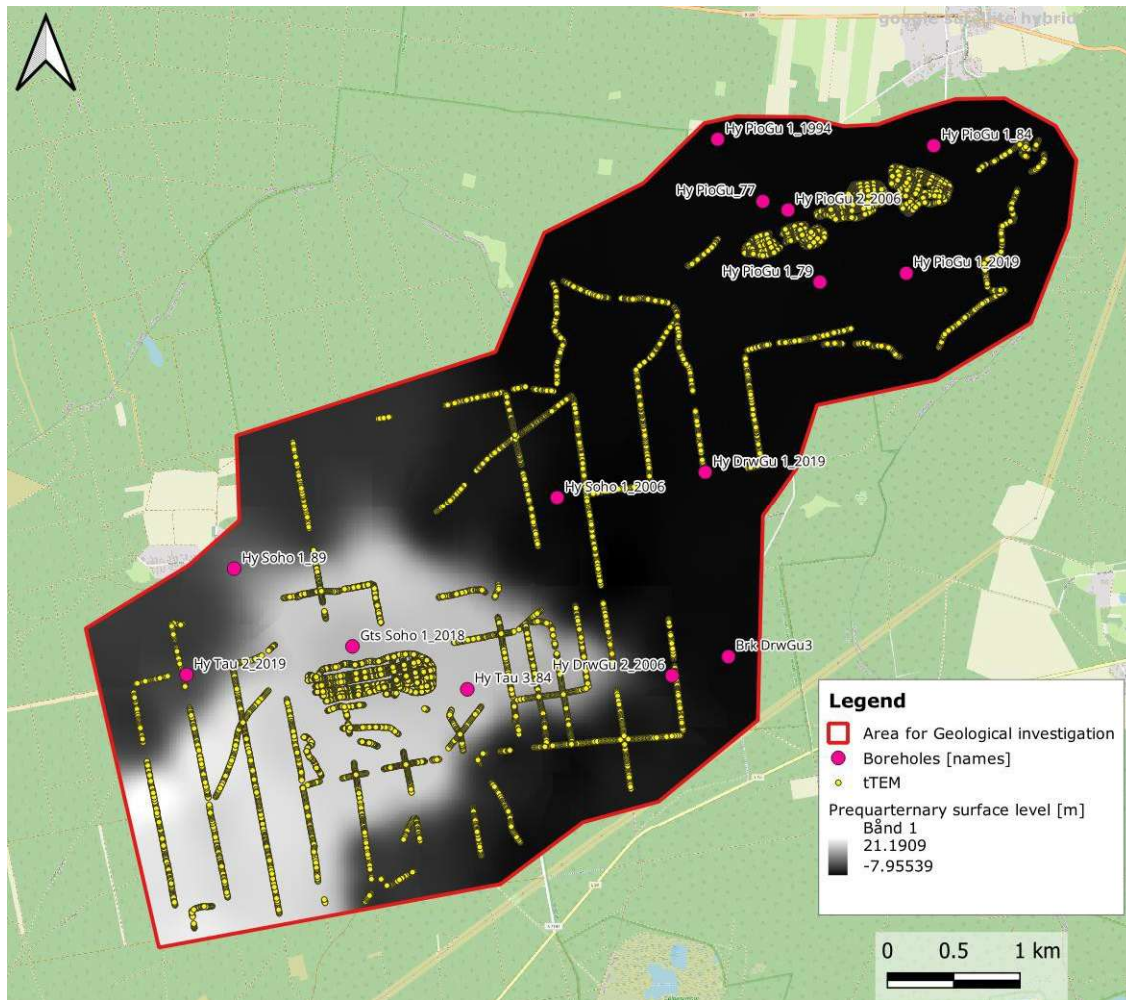
Der Großteil des quartären Pakets besteht aus Schichten wie Quartärsand 1, Quartärsand 2 und Quartärsand 3. Die quartären Schichten werden meist als hoch resistive Schichten betrachtet, interpretiert als grobes Material wie Sand und Kies, was auch durch Bohrungsdaten bestätigt wird. Quartärsand 2 umfasst das gröbste Material mit Widerstandsbereichen von 100-370  $\Omega$ m (tTEM-Daten), wie in Anhang 7 dargestellt.

In den Bohrungen Brk DrwGu3 und Hy Tau 3\_84 östlich des Großsees finden sich kleinere Tonablagerungen, die im Profil 1 und Profil 3 in Anhang 7 zu erkennen sind. Weitere Bohrungen im südlichen Teil des Vermessungsgebiets (Hy Tau 2\_2019, Gts Söhö 1\_2018 und Hy DrwGu 2\_2006) fanden Schluff in Tiefen von 65 bis 70 Meter über NHN, siehe Länge 500, 1.700 und 4.350 m in Anhang 7.2. Diese Schluffschichten werden im Modell in diesem Fall als Quartärsand 1 interpretiert aufgrund der Beschreibung als fein- bis mittelsandig.

Bohrung Hy PioGu 2\_2006 weist zwei schmalere Tonschichten aus, siehe Anhang 7.4 bei 6700 m. Diese wurde aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit von jeweils nur 20 cm und fehlender Verifikation durch ortsnahe Bohrungs- und tTEM-Daten nicht in das Modell aufgenommen.

Im nördlichen Teil des Projektgebiets finden sich hauptsächlich flache Bohrlöcher. Die Mächtigkeit des präquartären Sandes basiert daher auf tTEM-Daten. Die präquartäre Fläche liegt im Allgemeinen bei einer Elevation von -5 m, was gerade die Auflösungsgrenze der tTEM-Daten ist. Daher besteht eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der exakten Tiefe der präquartären Fläche im nördlichen Bereich. Die Visualisierung der Modellschichten auf tTEM-Datenbasis in den nördlichen Teilen ist in Anhang 7.5, Anhang 7.7 und Anhang 7.11 zu sehen.

Im südöstlichen Projektgebiet steigt die präquartäre Fläche indes von etwa -5 m auf eine Elevation von etwa +15 bis +20 m an. Die präquartäre Fläche ist in den tTEM-Daten einfach als Übergang von höheren Widerständen im quartären Teil zu niedrigeren Widerständen (25-40 Ohm) im präquartären Teil zu erkennen. Bohrung Gts Söhö 1\_2018 bestätigt, dass diese Änderung der Widerstandswerte einem Übergang vom quartären Sand zu präquartären feinkörnigen Materialien wie Schluff, Braunkohle und Ton entspricht. Noch tiefer wurde präquartärer Sand gefunden, doch ist dieser aus den tTEM-Daten nicht ersichtlich. Profil 2 (800 bis 1.800 Meter), Profil 3 (0 bis 2.200 Meter) und Profil 4 (1.100 bis 3.300 Meter) aus Anhang 7 zeigen diese Änderungen der Widerstandswerte. Bild 10 veranschaulicht den vertikalen Verlauf der modellierten Rasterfläche der Präquartärschicht.



**Bild 10: Höhenprofil der präquartären Rasterfläche**

Es gibt keine Bohrungen, um die geologische Schichtung unter den beiden Gewässern Großsee und Pinnower See zu validieren. Allerdings sind die Widerstandswerte lokal deutlich geringer als im umliegenden quartären Sand. Laut /1/, /2/ und /3/ könnte das quartäre Erosionstal die Seen und Bäche in der Gegend gebildet haben und das Seesediment möglicherweise aus Schmelzwasserablagerungen, organischem Material und Schluff bestehen.

Im Großsee ist die Seesedimentschicht typischerweise 0,5 m stark, vgl. /2/, jedoch erhöht sich gemäß FloaTEM-Daten die Mächtigkeit im östlichen Teil auf 5 m, siehe Großsee-Profil in Anhang 7. Der Grund des Sees wurde mithilfe einer Höhenlinienkarte des Seebodens digitalisiert; ihm wurden die Interpretationspunkte für Quartärsand 1 zugewiesen. Generell wurden diese Interpretationspunkte hier 0,5 m niedriger gelegt sowie im tiefen Teil des Sees den niedrigohmigen FloaTEM-Daten zugewiesen.

Die Seesedimentschicht für den Pinnower See wurde mit derselben Methode abgebildet, Quartärsand 1 am Grund des Sees und Seeablagerungen je nach FloaTEM-Daten. Aus /3/ ergibt sich, dass der Pinnower See auch stärkere Sedimentschichten in seinem tieferen Teil aufweist, die ebenfalls in der Modellinterpretation berücksichtigt wurden, siehe Profil Pinnower See in Anhang 7.

## 4. Mitzuliefernde Daten

Die folgenden Daten wurden im Rahmen des Berichts bereitgestellt.

1. Rohdaten, wie aus der Messeinrichtung extrahiert, darunter:
  - A. ASCII-Dateien mit Informationen über geografische Koordinaten, Sendestromstärke und zahlreiche weitere unterstützende Daten. Sämtliche Dateien sind im Format YYYYMMDD\_HHMMSS\_MMM (JahrMonatTag\_StundenMinutenSekunden\_Millisekunden) benannt, gefolgt von drei Buchstaben als Erweiterung. Die wichtigeren Dateien haben die Erweiterung SPS. Die übrigen Dateien sind hauptsächlich LOG-Dateien. Eine Datei mit der Erweiterung LIN beschreibt Anfang und Ende jedes Profils.
  - B. Binärdateien mit den elektromagnetischen Abklingmessungen. Der Anfangsteil der Binärdatei ist ein ASCII-Abschnitt mit allen Informationen zu Messzyklen und Einstellungen am Instrument.
2. GERDA Firebird-Datenbanken (<https://eng.geus.dk/products-services-facilities/data-and-maps/national-geophysical-database-gerda/>) und ASCII-Dateien mit importierten Koordinatendaten (XYZ), verarbeiteten Daten und den Modellergebnissen.
3. XYZ-Dateien, die die berechneten Werte der DOI, sowohl Tiefen- als auch Elevationsintervalle, ausweisen
4. Der Bericht wird als PDF-Datei geliefert.
5. Das Geologische 3D-Modell wird in die I-GIS GeoCloud (<https://i-gis.dk/geocloud/>) hochgeladen.

## 5. Schlussfolgerungen

Im Zuge der Vermessung wurden hochauflösende tTEM-Daten bis zu einer maximalen Tiefe von etwa 150 m erhoben. Die hohe Datendichte der tTEM-Daten erlaubte es, die geologischen Einheiten zu kartieren und detaillierte Informationen über die Homogenität, Kontinuität und Ausdehnung jeder Einheit im gesamten Vermessungsgebiet abzuleiten.

Eine vorläufige Interpretation der Geologie allein auf Grundlage der geophysikalischen Kartierung weist auf eine flache Unterschicht hin, die aus relativ grobkörnigen Sedimenten besteht, z. B. Sande oder mit Sand gemischte Tone im südlichen Teil des Gebiets. Im nördlichen Teil sind geringere Widerstände zu verzeichnen, was auf eine Geologie mit feinkörnigeren, tonhaltigen Materialien hinweist.

Ein Übergang zu niedrigeren Resistivitäten um  $30 \Omega\text{m}$  wird bei etwa 20 m unter Bodenniveau / Elevation 20 m ü. NHN beobachtet. Diese Transition beginnt im nördlichen Teil und breitet sich in den darunterliegenden Intervallen in Richtung Süden bzw. Südosten aus. Dies zeigt einen allgemeinen Übergang hin zu feinkörnigeren, tonhaltigen Materialien in diesem Bereich an wie auch, dass sich die Oberfläche dieser geologischen Einheit nach Süden bzw. Südosten neigt. Ab etwa 50 m unter dem Geländeboden/Elevation bis +10 m scheinen die letzten Spuren der hochohmigen Schichten im flachen Untergrund vollständig zu verschwinden, und auch darunter sind nur sehr wenige Widerstandsstrukturen zu beobachten. Eine Ausnahme bilden jedoch Bereiche mit geringeren Resistivitäten von etwa 10 bis  $20 \Omega\text{m}$  im zentralen Teil des Gebiets von etwa 70 bis 100 m unter Bodenniveau / Elevation -30 bis -60 m.

Mithilfe der GeoGIS-Software von Ramboll wurden 40 vom LBGR bereitgestellte Bohrungsberichte digitalisiert<sup>1</sup>. Daraus konnte eine Datenbank exportiert und in die Modellierungssoftware eingepflegt werden.

Auf Grundlage einer Kombination dieser Bohrungsdaten mit den Ergebnissen der tTEM-Abtastung wurde ein grobes Geologisches 3D-Modell erstellt.

Das Modell wurde in der Software GeoScene3D mit einer Rastergröße von 10 m aufgebaut<sup>2</sup>. Es umfasst 10 Schichten - fünf quartäre Schichten, eine Seesedimentschicht und vier präquartäre Schichten. Die präquartäre Grenzfläche ist in den tTEM-Modellen eindeutig als Übergang von höheren Widerständen im quartären Teil zu niedrigeren Widerständen im präquartären Teil auszumachen. Bohrungsdaten bestätigen, dass diese Widerstandsverschiebung mit einem Übergang von quartärem Sand zu präquartären feinkörnigen Sedimenten wie Schluff, Braunkohle und Ton einhergeht. Darunter gibt es noch präquartären Sand, der jedoch in den tTEM-Modellen nicht erkennbar ist. Die präquartäre Fläche liegt im Allgemeinen auf einer Elevation von -5 m, steigt aber im südwestlichen Teil des Gebiets auf +20 m an. Lokal wurde das Seesediment für die beiden Seen, Großsee und Pinnower See, basierend auf dem FloaTEM modelliert. Die Mächtigkeit der Sedimentschicht variiert in den Seen stark.

Das Modell wurde in die I-GIS GeoCloud hochgeladen, von wo es jederzeit abrufbar ist. Die im Modell zusammengefassten Daten können als GIS- bzw. Textdateien heruntergeladen werden.

<sup>1</sup> Anm. des Übers.: Eingangs (Seite 4) ist von 14 Berichten die Rede.

<sup>2</sup> Anm. des Übers.: Ebenda wird die Rastergröße mit 100 m angegeben.

## 6. Literaturverweise

- /1/ Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (2010), Atlas zur Geologie von Brandenburg. LBGR, Brandenburg
- /2/ Landesamt für Umwelt (2024), Bericht zu den Oberflächen- und Grundwasserverhältnissen des Großsees, Landkreis Spree-Neiße (Brandenburg). LBGR, Brandenburg
- /3/ Landesamt für Umwelt (2021), Landesamt für Umwelt (2024), Bericht zu den Oberflächen- und Grundwasserverhältnissen des Großsees, Landkreis Spree-Neiße (Brandenburg). LBGR, Brandenburg. LBGR, Brandenburg

## Anhang 1 Theorie - TEM

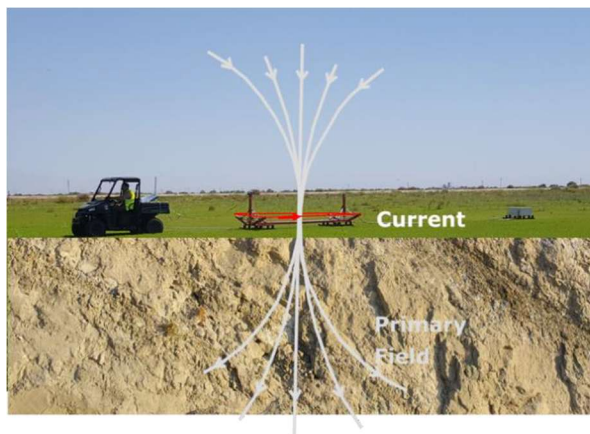
## TEM – Einführung und Theorie

Mit dem Erwerb des ersten bodengestützten TEM-Instruments zu Beginn der 1990er Jahre reihte sich Ramboll in die weltweite Schar von Pionieren der Anwendung von Transienten-Elektromagnetik-Verfahren zur Kartierung des geologischen Untergrunds ein. In den letzten 20 Jahren hat sich die Genauigkeit der Instrumente und ihre Fähigkeit, detaillierte Informationen über Grundwasserleiter und hydrogeologische Eigenschaften zu gewinnen, erheblich verbessert. Die TEM-Methode ist heute eine der effizientesten geophysikalischen Technologien für Grundwasseruntersuchungen.

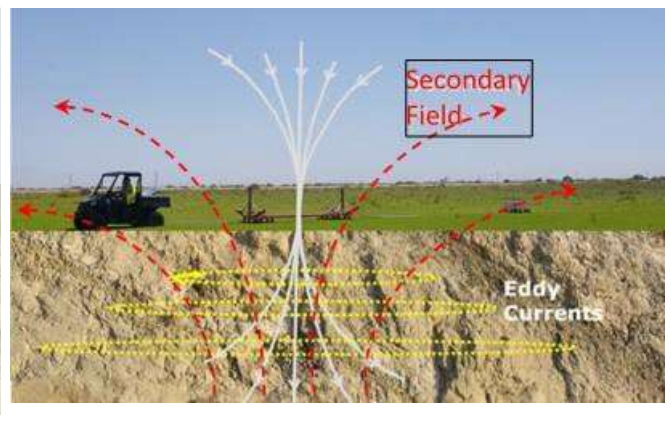
In den vergangenen 15 Jahren wurden auch luftgestützte TEM-Systeme entwickelt und eingeführt. Mit diesen Systemen gelang es noch weitaus besser, große geografische Gebiete zu erfassen. Das geschleppte TEM-System (tTEM für „towed transient electromagnetics“) ist im Grunde die herunterskalierte Version eines luftgestützten TEM-Systems namens SkyTEM.

### Theorie der TEM

Ein Gleichstrom wird in eine Senderspule eingespeist. Wenn sich der Stromfluss stabilisiert hat, wird der Sender abrupt abgeschaltet. Das abrupte Abschalten des Senderstroms induziert kurzzeitige Wirbelströme im leitfähigen Boden. Die außerhalb der Senderspule angeordnete Empfängerspule (beim tTEM-System räumlich versetzt) misst das aus den Wirbelströmen entstandene, abklingende sekundäre Magnetfeld.



**Bild A1-1:** Das vom Senderstromkreis kurzzeitig erzeugte primäre elektromagnetische Feld

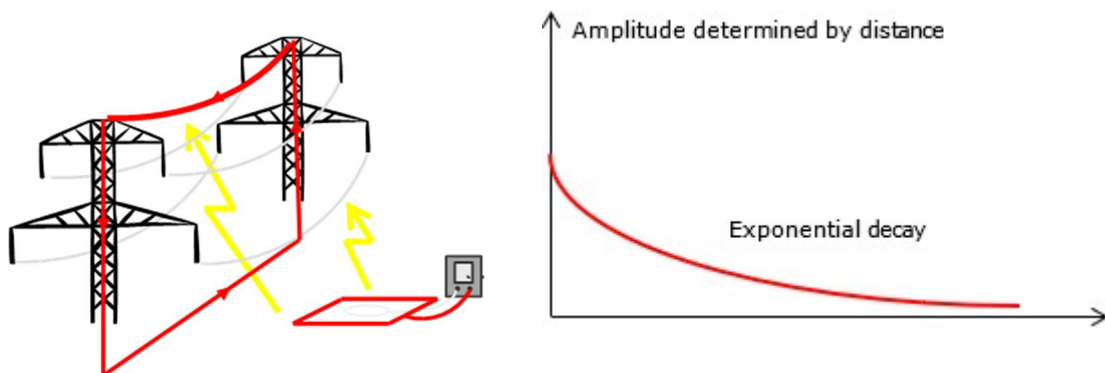


**Bild A1-2:** Das Abschalten des Stroms in der Senderspule (kein primäres Feld mehr) erzeugt im Boden Wirbelströme. Diese wiederum erzeugen sekundäre Magnetfelder, die vom Empfänger gemessen werden.

### TEM-Datenrauschen

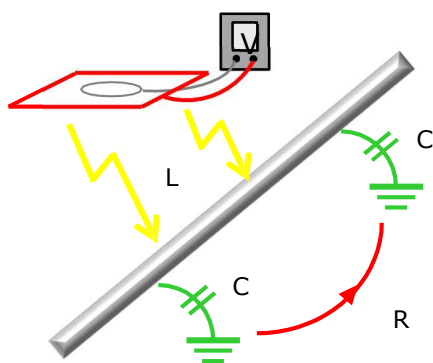
TEM-Daten beinhalten verschiedenen Arten von Rauschkomponenten. Das Rauschen kann Signalverzerrungen verursachen und die Untersuchungstiefe beeinflussen, was bei unzureichender Identifizierung und Entfernung womöglich zu fehlerhaften geologischen und hydrologischen Interpretationen führt. Die verschiedenen Rauschquellen werden im Folgenden beschrieben:

1. Galvanische Kopplung, verursacht durch das in einem metallischen Objekt, wie einem Metallrohr, Metallzaun oder einer Leiterschleife induzierte elektromagnetische Signal, das – wie unten skizziert – dem Erdungsleiter durch die Strommasten bis in den Untergrund folgt. Die Herausforderung besteht darin, dass diese durch galvanische Kopplung verursachte Störsignalkomponente schwer zu bestimmen sein kann, da die ihre Abklingkurve der empfangenen Signalantwort aus dem Boden ähnelt, wie in Bild A1-3 dargestellt. Um Abtastdaten der galvanischen Kopplung zu identifizieren und auszusondern, gilt es, alle Messpunktdaten entlang der Vermessungslinien zu betrachten und dabei anhand der GIS-Karte neben dem Signalpegel auch dessen Korrelation mit potenziellen Kopplungsquellen einzurechnen.



**Bild A1-3. Veranschaulichung der Effekte galvanischer Kopplung**

2. Kapazitive Kopplung, verursacht durch das in einem isolierten Leiter wie einem Stromkabel induzierte elektromagnetische Signal. Diese Störung erzeugt ein oszillierendes Signal, wie in Bild A1-4 dargestellt. In der Regel ist es einfach, kapazitives Kopplungsrauschen von der Signalantwort aus dem Boden zu unterscheiden.



**Bild A1-4: Veranschaulichung der Effekte kapazitiver Kopplung**

3. Kohärentes Rauschen, erzeugt von Stromtrassen, weist dasselbe Erkennungsmuster wie die kapazitive Kopplung auf, weshalb es während der Datenverarbeitung normalerweise leicht zu identifizieren ist.
4. Atmosphärisches Rauschen, das dem Wesen nach eher zufällig auftritt und sich in der Regel durch Nicht-Spike-Filterung und einfache Mittelwertbildung der Daten ausschließen lässt. Bei starkem Blitzschlag oder elektromagnetischem Sturm kann das Hintergrundrauschen allerdings die Datenerfassung mit einem akzeptablen Signal-Rauschabstand verhindern.
5. Bewegungsinduziertes Rauschen, verursacht durch Vibrationen in der Empfängerspule. Die Schwingbewegung der Empfängerspule im Erdmagnetfeld erzeugt eine Rauschkomponente. Das Problem tritt nur bei bewegten Systemen wie SkyTEM (luftgestützt) oder tTEM auf. Dieses Rauschen lässt sich minimieren, indem die Empfängerspule hängend angeordnet und die Vermessungsgeschwindigkeit innerhalb der empfohlenen Grenzen gehalten wird (Bild A1-5).
6. Internes Rauschen im Instrumentenaufbau.

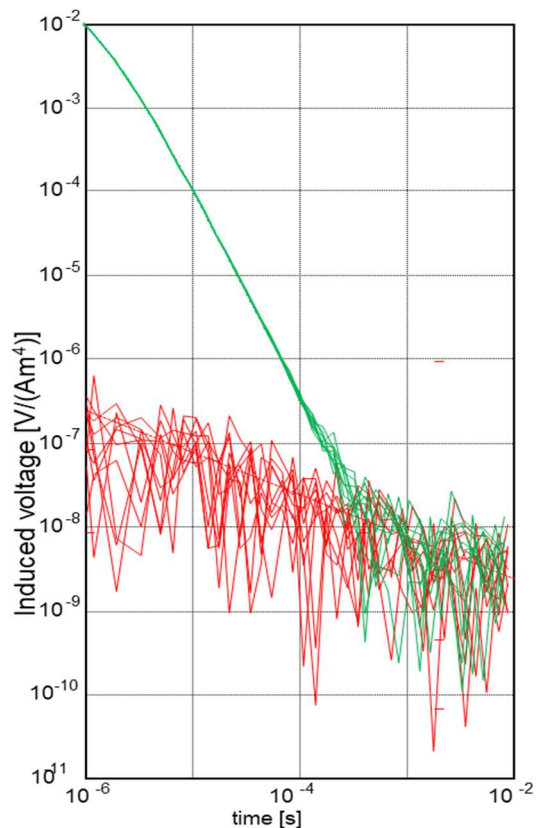


**Bild A1-5:** Um bewegungsinduziertes Rauschen zu reduzieren, wird die TEM-Empfängerspule eingehängt.

**Untersuchungstiefe**

Die Untersuchungstiefe (DOI) hängt von den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet sowie dem Signal-Rausch-Verhältnis ab, das durch die Leistung des übertragenen elektromagnetischen Feldes, das interne Rauschen in den Vermessungsinstrumenten und das tatsächliche Hintergrundrauschen während der Untersuchung bestimmt wird.

Die DOI ergibt sich aus der Länge der TEM-Abklingkurven, d.h. wie spät das Signal noch gemessen werden kann, bevor es auf den Rauschpegel absinkt. In Bild A1-6 erreicht die Bodenantwort (die grünen Kurven) den Rauschpegel des Systems bei etwa 500  $\mu$ s. Die Untersuchungstiefe lässt sich durch Verstärken des induzierten Signals vergrößern. Dies geschieht typischerweise durch Erhöhung der Stromstärke, Aufbau einer größeren Senderspule und/oder eine Erhöhung der Anzahl (Stackgröße) gemittelter Abklingkurven.



**Bild A1-6:** Ein Beispiel für die vom TEM-System erzeugten Abklingkurven (grüne Kurven) und das Hintergrundrauschen (rote Kurven).

Mit dem tTEM-System lässt sich typischerweise eine DOI von 60-120 m unter der Bodenoberfläche erreichen. Diese Untersuchungstiefe wird umso größer, je höher der spezifische elektrische Widerstand (Resistivität) im Boden ist, und fällt bei leitfähigeren Böden entsprechend geringer aus. Bei der Inversion wird für jedes Widerstandsmodell die DOI geschätzt.

### **Inversion**

Der Inversionsprozess ist der Schritt, bei dem die gemessenen Werte der induzierten Spannung mit der TEM-Antwort des geophysikalischen Modells abgeglichen werden. Das Modell ist durch seine Schichtmächtigkeit und die entsprechenden elektrischen Widerstände beschrieben. Die Ergebnisse werden in der Regel als homogene (mehrschichtige) Widerstandsmodelle präsentiert.

Die verarbeiteten Daten wurden durch ein räumlich verknüpftes Verfahren (SCI) invertiert – ein Ansatz, bei dem benachbarte Abtastdaten in einem mehrschichtigen Inversionsschema miteinander verknüpft werden.

Eine tiefere Beschreibung des Modellierungsansatzes findet sich in den abschließenden Literaturangaben.

## Literatur

Ausgewählte Beiträge, die TEM-Systeme wie tTEM, die Kalibrierung eines TEM-Systems am dänischen Nationalen Testzentrum und die Vorgehensweise bei der Modellierung beschreiben:

Auken, E., Foged, N., Larsen, J. J., Lassen, K. V. T., Kumar Maurya, P., Dath, S. M. und Eiskjær, T. T., 2019, tTEM – A towed transient electromagnetic system for detailed 3D imaging of the top 70 m of the subsurface, *Geophysics*, Band 84, Nr. 1 (Jan-Feb 2019); S. E13–E22, 11 Abbildungen, 1 Tabelle.

Auken, E., Foged, N. und Sørensen, K., 2002, Model recognition by 1-D laterally constrained inversion of resistivity data: Protokolle der Tagungsreihe Neue Technologien und Forschungsrichtungen, 8.Tagung, EEGS-ES.

Auken, E., Christiansen, A. V., Jacobsen, B. H., Foged, N., and Sørensen, K. I., 2005, Piecewise 1D Laterally Constrained Inversion of resistivity data: *Geophysical Prospecting*, 53, 497–506.

Christiansen, A.V. und Auken, E., 2012, A global measure for depth of investigation: *Geophysics*, Band 77, Nr. 4, 171-177.

Auken, E., A.V. Christiansen, C. Kirkegaard, G. Fiandaca, C. Schamper, A.A. Behroozmand, et al. 2015. An overview of a highly versatile forward and stable inverse algorithm for airborne, ground-based and borehole electromagnetic and electric data. *Explor. Geophys.* 46:223–235. doi:10.1071/EG13097

Foged, N., E. Auken, A. V. Christiansen und K. I. Sørensen, 2013, Test site calibration and validation of airborne and ground based TEM systems: *Geophysics*, 78, Nr. 2, E95–E106, doi: 10.1190/geo2012-0244.1.

McNeill, J. *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers; Technical Report TN-6; Geonics Limited: Mississauga, ON, Kanada, 1980*

Sørensen, K. I. und Auken, E., 2004, SkyTEM – A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system.: *Exploration Geophysics*, 35, 191–199.

Sørensen, K. I., 1997, The pulled array transient electromagnetic method: Protokoll der 3. Tagung der Environmental and Engineering Geophysical Society, Europa-Sektion, 135–138

Viezzoli, A., A. V. Christiansen, E. Auken und K. I. Sørensen, 2008, Quasi-3D modeling of airborne TEM data by Spatially Constrained Inversion, *Geophysics*, 73, 3, F105-F113

## Anhang 2

# Instrumentenaufbau und Einstellungen für Datenverarbeitung und -inversion

## Instrumentenaufbau und Einstellungen für Datenverarbeitung und -inversion

Beim geschleppten (towed Transient ElectroMagnetics, kurz tTEM) Instrument handelt es sich um ein für hydrogeophysikalische und Umweltuntersuchungen konzipiertes System für elektromagnetische Messungen im Zeitbereich (TDEM). Die Entwicklung des Instruments ist das Ergebnis langjähriger Forschungsarbeit an der Universität Aarhus in Dänemark, aufbauend auf der Technik des Transienten-Elektromagnetik-Systems im Schleppverfahren (pulled-array TEM, PATEM) und des nachfolgenden luftgestützten Systems SkyTEM.

Dieser Abschnitt beschreibt die tTEM-/FloaTEM-Messvorrichtung, die Dokumentation zur Kalibrierung, die Ergebnisse wiederholter Vermessungslinien innerhalb des Untersuchungsgebiets und die für dieses spezifische Kartierungsprojekt vorgenommenen Einstellungen. Diese Informationen sollen ein tieferes Verständnis der Verfahren zur Erfassung, Verarbeitung und Inversion der Abtastdaten vermitteln.

### Instrumenten-IDs

Bei dieser Vermessung kamen die in Tabelle A2-1 mit ihrer jeweiligen Kennung aufgeführten Instrumente zum Einsatz.

Einheit	ID
TIB-Empfänger	20210712
RC20-Empfangsspule	20210710
tTEM/FloaTEM-Sender	20210711
Novatel Agstar-GPS	20200640

**Tabelle A2-1: Die IDs der für die Vermessung genutzten Instrumente**

### Nominale Gerätepositionen

Die für die Verarbeitungs- und Inversionsschemata verwendeten Positionen und Geometrien der Hauptkomponenten sind in Tabelle A2-2 aufgelistet. Die GPS-Koordinaten werden z.B. vorn am Sender gemessen und werden bei der späteren Verarbeitung der GPS-Daten so verschoben, dass sie die tatsächlichen Fokuspunkt des Systems widerspiegeln. Die Geometrie des Senderrahmens und der exakte räumliche Versatz der Empfangsspule sind bei der Dateninversion von Bedeutung.

Unit	X (m)	Y (m)	Z (m)
<b>tTEM-Instrument</b>			
GP_Tx (GPS)	5,85	0,00	-0,90
RxZ (Z-Empfangsspule)	-9,00	0,00	-0,43
Tx-Spule, Mittelpunkt	0,00	0,00	-0,97
Tx-Spule Ecke 1	-1,45	-1,45	-0,43
Tx-Spule Ecke 2	1,45	-1,45	-0,43
Tx-Spule Ecke 3	1,45	1,45	-0,43
Tx-Spule Ecke 4	-1,45	1,45	-0,43
<b>FloaTEM-Instrument</b>			
GP_Tx (GPS)	9,20	0,00	-0,30
RxZ (Z-Empfangsspule)	-9,20	0,00	-0,43
Tx-Spule, Mittelpunkt	0,00	0,00	-1,10
Tx-Spule Ecke 1	-2,00	-1,90	-0,43
Tx-Spule Ecke 2	2,00	-1,90	-0,43
Tx-Spule Ecke 3	2,00	1,90	-0,43
Tx-Spule Ecke 4	-2,00	1,90	-0,43

**Tabelle A2-2: Nominale Positionierungen der Geräte, Empfangsspulen (Rx) und Sendespulen (Tx); Basiskoordinate ist die Mitte der Sendespule; Z ist abwärts positiv**

### Senderwellenform

Der Strom in der Senderschleife wird gepulst an- und abgeschaltet. Innerhalb jedes Impulses wechselt die Stromrichtung von positiv auf negativ. Die beiden untenstehenden Diagramme zeigen die Wellenform für das kleine (Low-Moment, LM) und das große (High-Moment, HM) Pulsmoment, wenn der Strom sehr schnell abgeschaltet wird.

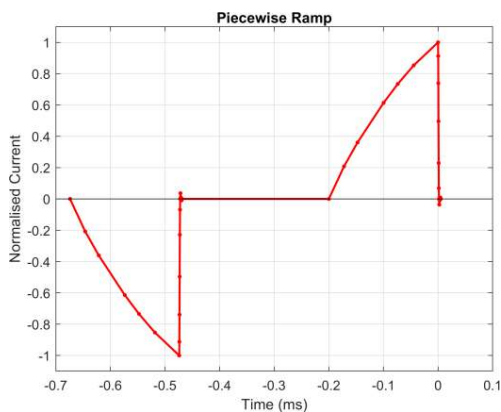
In den Off-Phasen, d.h. während der Strom abgeschaltet ist, werden die sekundären Magnetfelder der Wirbelströme in der Empfängerspule gemessen.



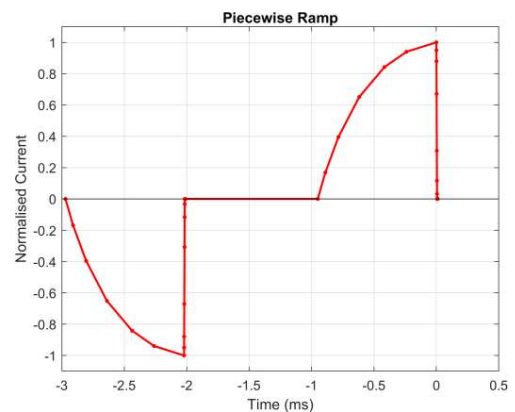
**Bild A2-2: Nahaufnahme der Montage des Senderrahmens auf dem Schlitten**

### tTEM

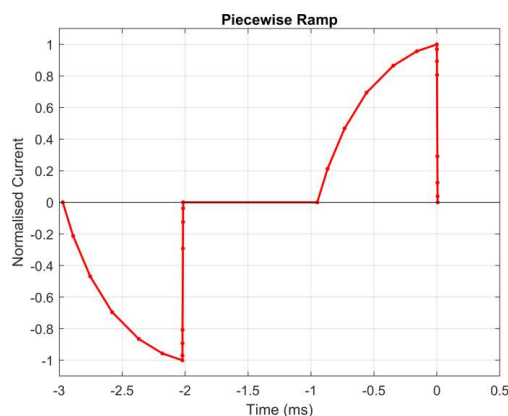
#### Low-Moment



#### High-Moment

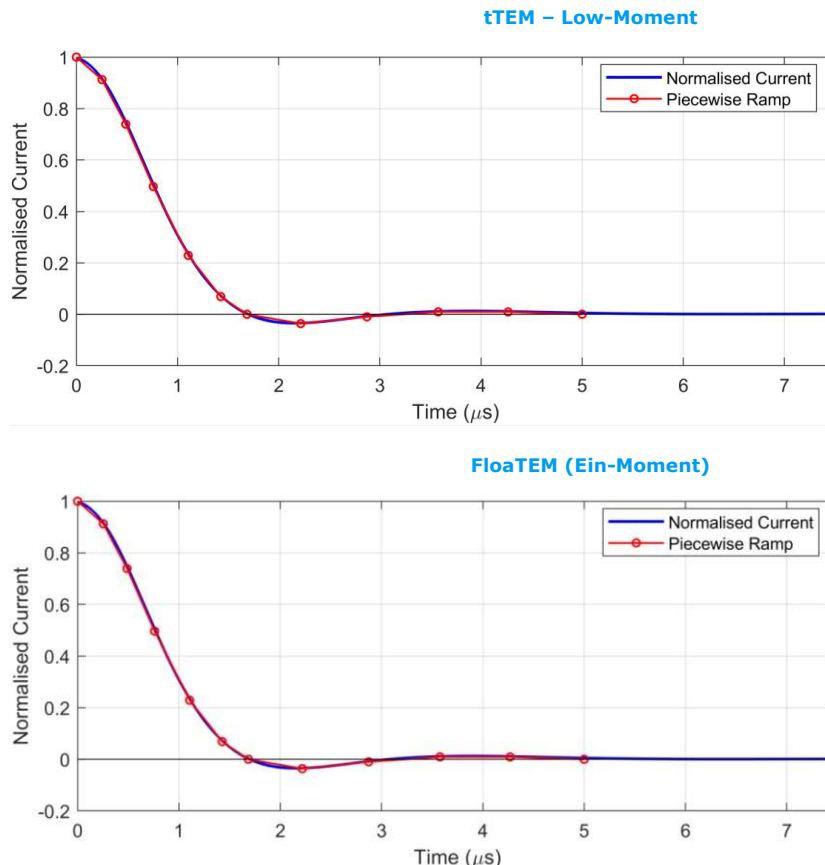


### FloaTEM (Ein-Moment)



**Bild A2-3: Wellenformen der tTEM- und der FloaTEM-Instrumentenanordnung; die roten Liniensegmente zeigen die stückweise lineare Modellierung der Wellenformen.**

Die Geschwindigkeit der Low-Moment-Abschaltrampe ist entscheidend für die Auflösung des flachen Untergrunds. Bild A2-4 zeigt eine vergrößerte Ansicht der Abklingrampe auf den tTEM- und FloaTEM-Instrumenten, wie sie sich beim kleinen Pulsmoment (LM) der tTEM- und der FloaTEM-(Ein-Moment-)Konfiguration gestaltet; der Strom wird innerhalb von 2 bzw. 6 Mikrosekunden ( $\mu\text{s}$ ) komplett abgeschaltet.



**Bild A2-4: Vergrößerte Ansicht der LM-Abklingrampe; die roten Liniensegmente zeigen die stückweise lineare Modellierung der Wellenform.**

Die Senderwellenformen für LM und HM ergeben sich durch die angegebenen Werte für die Zeit und die nominale Amplitude. On-Zeiten sind negativ und Off-Zeiten positiv. Die Gestalt der Wellenform wird für das Inversionsschema verwendet. Der Maßstab für die tatsächlichen Wellenformen folgt aus der Messung des Stroms unmittelbar vor dem Abschalten.

tTEM				FloaTEM	
LM-Zeit	LM-Amplitude	HM-Zeit	HM-Amplitude	Zeit	Amplitude
-6,7400e-04	-0,000	-2,9500e-03	-0,000	-5,6710e-03	-0,000
-6,4621e-04	-0,208	-2,8892e-03	-0,168	-5,6181e-03	-0,118
-6,2142e-04	-0,361	-2,7844e-03	-0,396	-5,5366e-03	-0,273
-5,7372e-04	-0,614	-2,6176e-03	-0,651	-5,4617e-03	-0,395
-5,4780e-04	-0,734	-2,4159e-03	-0,842	-5,3802e-03	-0,509
-5,1851e-04	-0,853	-2,2401e-03	-0,939	-5,2448e-03	-0,662
-4,7400e-04	-1,000	-2,0000e-03	-1,000	-5,0871e-03	-0,798
-4,7375e-04	-0,912	-1,9995e-03	-0,950	-4,9135e-03	-0,909
-4,7351e-04	-0,739	-1,9991e-03	-0,879	-4,6710e-03	-1,000
-4,7324e-04	-0,497	-1,9980e-03	-0,671	-4,6699e-03	-0,887
-4,7289e-04	-0,229	-1,9961e-03	-0,307	-4,6684e-03	-0,686
-4,7257e-04	-0,069	-1,9951e-03	-0,116	-4,6665e-03	-0,429
-4,7231e-04	0,000	-1,9945e-03	-0,032	-4,6648e-03	-0,182
-4,7178e-04	0,036	-1,9935e-03	0,000	-4,6640e-03	-0,088
-4,7113e-04	0,010	-1,9916e-03	-0,004	-4,6632e-03	-0,026
-4,7042e-04	-0,009	-1,9900e-03	-0,000	-4,6618e-03	-0,012
-4,6973e-04	-0,009	-9,5000e-04	0,000	-4,6590e-03	-0,006
-4,6900e-04	-0,000	-8,8915e-04	0,168	-4,6560e-03	-0,000
-2,0000e-04	0,000	-7,8437e-04	0,396	-1,0000e-03	0,000
-1,7221e-04	0,208	-6,1761e-04	0,651	-9,4714e-04	0,118
-1,4742e-04	0,361	-4,1592e-04	0,842	-8,6563e-04	0,273
-9,9718e-05	0,614	-2,4014e-04	0,939	-7,9070e-04	0,395
-7,3803e-05	0,734	0,0000e+00	1,000	-7,0920e-04	0,509
-4,4507e-05	0,853	4,6705e-07	0,950	-5,7380e-04	0,662
0,0000e+00	1,000	8,8221e-07	0,879	-4,1606e-04	0,798
2,5329e-07	0,912	1,9893e-06	0,671	-2,4254e-04	0,909
4,8806e-07	0,739	3,8575e-06	0,307	0,0000e+00	1,000
7,5988e-07	0,497	4,8608e-06	0,116	1,1306e-06	0,887
1,1058e-06	0,229	5,4835e-06	0,032	2,6133e-06	0,686
1,4271e-06	0,069	6,4868e-06	-0,000	4,4666e-06	0,429
1,6866e-06	-0,000	8,3550e-06	0,004	6,2459e-06	0,182
2,2179e-06	-0,036	1,0000e-05	0,000	6,9502e-06	0,088
2,8727e-06	-0,010			7,7657e-06	0,026
3,5770e-06	0,009			9,1742e-06	0,012
4,2689e-06	0,009			1,2028e-05	0,006
5,0000e-06	0,000			1,5000e-05	0,000

Tabelle A2-3: Sender-Wellenformen für tTEM (LM und HM) und FloaTEM (Ein-Moment),

**Messzyklus**

Die Instrumenten-Grundeinstellungen sind in Tabelle A2-4 zusammengefasst.

Parameter	tTEM		FloaTEM
	LM	HM	Ein-Moment
Moment-ID	2	1	1
Zahl der Wicklungen	3	3	3
Senderfläche (m <sup>2</sup> )	8,41 m <sup>2</sup>	8,41 m <sup>2</sup>	16 m <sup>2</sup>
Senderstrom	~ 1 A	~ 25 A	~ 22 A
Tx Peak-Moment	~ 25 Am <sup>2</sup>	~ 630 Am <sup>2</sup>	~ 1.056 Am <sup>2</sup>
Wiederholffrequenz	1055 Hz	494 Hz	110 Hz
Rohdaten-Stackgröße	422	198	252
Rohmoment-Zykluszeit	0,20 s	0,40 s	1,18 s
Tx On-Zeit	200 µs	950 µs	1.000 µs
Einschaltzyklus	47%	42%	21%
Abschaltzeit	5 µs bei 1 Amp	1,0 µs bei 25 Amp	1,5 µs bei 22 Amp
Zahl der Zeitfenster	6	15	25
Zeitintervall (in der Fenstermitte)	1,2 µs – 3,4 µs	19 µs – 900 µs	19 µs – 900 µs
Verzögerung Front-Zeitfenster	1,9 µs	1,9 µs	1,9 µs

Tabelle A2-4: Grundeinstellungen der Instrumente

### Empfängerspule

Die Empfängerspule kann durch folgende Parameter beschrieben werden, die bei der Inversion zur Anwendung kommen.

Parameter	Wert
Tiefpassfilterfrequenz	679 kHz
Tiefpassfilter-Ordnung	1
Effektive Fläche	20m <sup>2</sup>

Tabelle A2-5: Parameter der Empfängerspule

### Dokumentation der Prüfung und Kalibrierung

Der oben beschriebene tTEM-Instrumentenaufbau wurde auf dem nationalen dänischen Geophysik-Testgelände bei Aarhus geprüft und kalibriert. Prüfung und Kalibrierung dienen dazu, die Leistung des Instruments zu dokumentieren und absolute Kalibrierparameter zu definieren.

Bei der Kalibrierung wird die absolute Zeitverschiebung und das Datenniveau festgelegt, um eine präzise Datenmodellierung zu ermöglichen. Zusätzliche Nivellierungen oder Driftkorrekturen finden nicht statt. Für diese Kalibrierung müssen sämtliche Systemparameter (Senderwellenform, Tiefpassfilter usw.) bekannt sein, damit eine akkurate Modellierung mit dem tTEM-Instrument möglich wird. Die Kalibrierkonstanten werden durch den Abgleich einer im Testzentrum aufgezeichneten tTEM-Antwort mit der Referenzantwort bestimmt. Diese Referenzantwort wird aus dem Referenzmodell des Testzentrums für die verwendete tTEM-Konfiguration berechnet.

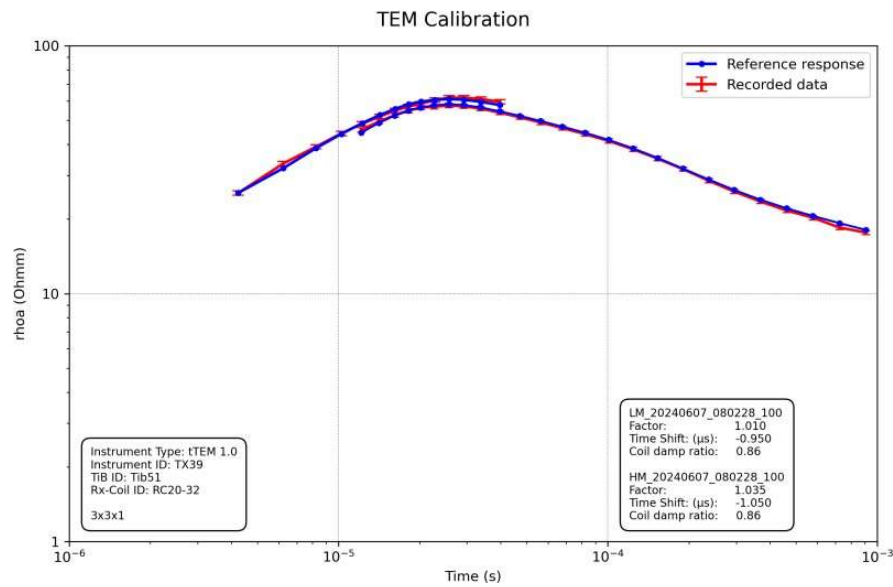
Akzeptable Kalibrierungen gelangen mit den in Tabelle A2-7 verzeichneten Kalibrierkonstanten. Diese Kalibrierungen erfolgten am 7. Juni 2024 (tTEM) bzw. 10. September 2024 (FloaTEM). Die zeitliche Lücke war dem Verzug bei der Elektronikbestückung und nicht exakt genug modellierten Wellenformen geschuldet.

Parameter	tTEM		FloaTEM
	LM	HM	Ein-Moment
<b>Zeitverschiebung</b>	-1,10 µs	-1,10 µs	-1,30 µs
<b>Maßstab</b>	1,165	1,110	0,995

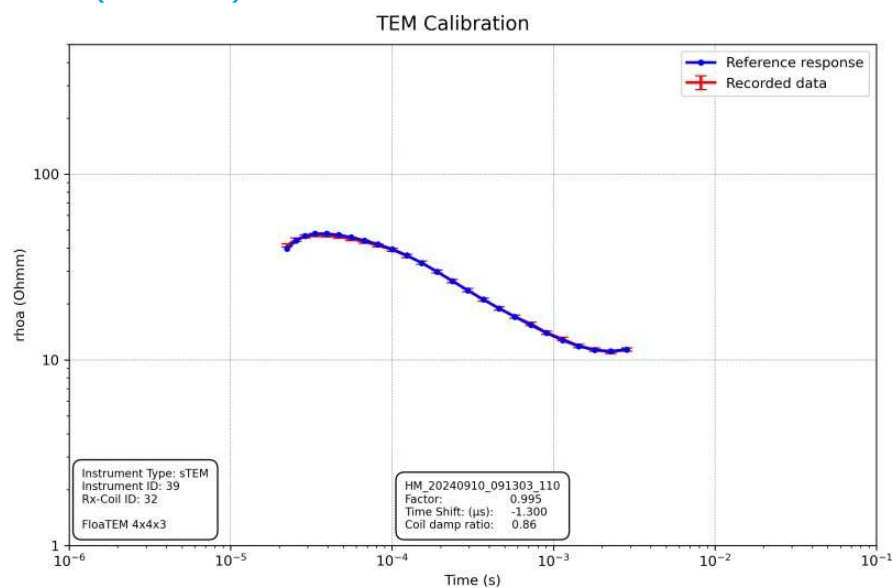
Tabelle A2-7: Kalibrierungskonstanten

Die Grafiken in Bild A2-5 zeigen Kalibrierplots für beide Momenten.

**tTEM – Low-Moment und High-Moment**



**FloaTEM (Ein-Moment)**



**Bild A2-5: Kalibrierungs-Plot für LM und HM, Rote Kurve: Unter Anwendung der Kalibrierungsfaktoren aufgezeichnete Daten; blaue Kurve: Referenzantwort vom Nationalen Geophysik-Testzentrum in Dänemark**

**Settings der Verarbeitungs- und Inversions-Software**

Datenverarbeitung und -inversion basieren auf der Software Aarhus Workbench, Version 2024,2, Dabei wurde ein 30-Schichten-Modell zugrunde gelegt, Tabelle A2-8 führt die festgelegten Schichtmächtigkeiten, die Tiefe des Schichtbodens, und die den Schichten des Modells zugewiesene Anfangsresistivität (ein homogener Halbraum) auf, Die Resistivitäts-Ausgangswerte für diese Erhebung wurden ermittelt, indem zunächst jedes Datenpaket der tTEM-Sondierung mit dem homogen geschichteten Halbraummodell invertiert wurde, um die daraus resultierenden Werte bei der Inversion anzusetzen,

Schicht	Schichtmächtigkeit [Meter]	Tiefe [Meter]	Anfangswert [Ωm]
1	1,0	1,0	40
2	1,1	2,1	40
3	1,2	3,3	40
4	1,4	4,7	40
5	1,5	6,2	40
6	1,7	7,9	40
7	1,9	9,8	40
8	2,1	11,8	40
9	2,3	14,1	40
10	2,5	16,6	40
11	2,8	19,5	40
12	3,1	22,6	40
13	3,5	26,0	40
14	3,8	29,9	40
15	4,3	34,1	40
16	4,7	38,8	40
17	5,2	44,1	40
18	5,8	49,9	40
19	6,4	56,3	40
20	7,1	63,4	40
21	7,9	71,3	40
22	8,8	80,1	40
23	9,7	89,8	40
24	10,8	100,6	40
25	12,0	112,6	40
26	13,3	125,9	40
27	14,7	140,6	40
28	16,3	156,9	40
29	18,1	175,0	40
30	--	--	40

Tabelle A2-8: Übersicht des 30-Schichten-Modells

### GPS-Einstellungen

Tabelle A2-9 zeigt die Einstellungen und Position des GPS.

Parameter	Wert
Taktzeit	0,5 s
Filterlänge	7,0 s
Polynom-Ordnung	2
Verschiebung in x-Richtung	0 m

Tabelle A2-9: GPS-Verarbeitung

## Anhang 3 Übersichtskarte

## Anhang 4

# Karten der mittleren Resistivität in Tiefenintervallen

## Anhang 5

# Karten der mittleren Resistivität in Elevationsintervallen

## Anhang 6

### Untersuchungstiefe (DOI)

## Anhang 7

# Profile des Geologischen 3D-Modells