

Vorhaben: **BorWin6, 600 kV DC-Leitung BorWin kappa – Büttel**
- Abschnitt Seetrasse -

| | | | | | |
|---|----------------------|--|--|---|--|
| Aufgestellt: Bayreuth, den 31.03.2022 Frank Bütke <small>Digital unterschrieben von Frank Bütke Datum: 2022.04.14 14:12:32 +02'00'</small> Lara Groscurth <small>Digital unterschrieben von Lara Groscurth Datum: 2022.04.14 16:11:05 +02'00'</small> | | <h2 style="margin: 0;">Unterlage zur Planfeststellung</h2> | | | |
| <h3 style="margin: 0;">600 kV DC-Leitung BorWin kappa – Büttel des Netzanbindungsprojektes BorWin6 für den Bereich der 12-sm-Grenze bis UW Büttel - Abschnitt Seetrasse -</h3> <p style="margin: 10px 0 0 0;">Materialband M6.4: Baugrundvoruntersuchungen Deich – Geoelektrischer Bericht</p> | | | | | |
| Prüfvermerk | GeCon Geophysik GmbH | | | | |
| Datum | | | | | |
| Ersteller | R. Muckelmann | | | | |
| Prüfer | | | | | |
| Änderung(en): | | | | | |
| Rev.-Nr. | Datum | Erläuterung | | | |
| 2.0 | 31.03.2022 | | | | |
| | | | | Anhang: Abbildungen 5-8 Verfahrensbeschreibung Gleichstrom-Geoelektrik | |



**Geoelektrische Untersuchung
von zwei HDD Bohrtrassen**

für die



**Thade Gerdes GmbH
Norden**

Projekt-Nr. 1239
V1.0

26. Oktober 2021



Versionsverfolgung

| Version | Datum | Änderung |
|-----------|------------|----------|
| 1239 V0.1 | 26.10.2021 | Ursprung |
| | | |
| | | |
| | | |

Inhalt

- Veranlassung
- Verwendete Dokumente
- Durchführung
- Bearbeitung der Daten
- Ergebnisse
- Zusammenfassung

Anhang



1. Veranlassung

GeCon wurde von der Thade Gerdes GmbH beauftragt, ergänzend zu Baugrunduntersuchungen für die Anlandung des BorWin 6 Kabels bei Büsum mittels Bohrungen und Drucksondierungen, geoelektrische Vermessungen entlang von vier ca. 700 m langen Linien durchzuführen. Die Linien folgen den Bohrtrassen bzw. spannen beidseitig des Bohrkorridors die Untersuchungsfläche auf.

2. Verwendete Dokumente

Folgende Dokumente fanden zur Bearbeitung der oben skizzierten Aufgabe Verwendung:

- ITT_20200316_Baugrund_HDD_BorWin6_Leistungs...(19850664).pdf
- 20210409_BW6_CHD_Gesamtplan_LSD Büsum_ETRS89_Rev2_2004.dwg
- Z_20200603_BW6_CHD_Übersichtslageplan Baugrund(19850684).pdf
- Z_20201001_BW6_CHD_Lageplan Baugrund(19850685).pdf

3. Durchführung

Zur Vorbereitung der Untersuchungen fand am 31.08.2021 eine Ortsbesichtigung statt.

Die Vermessungsarbeiten fanden dann vom 14. bis zum 16.09.2021 statt. Da die Bohrtrassen eine Kurve beinhalten wurden die vier Vermessungslinien jeweils zweigeteilt, um so der Bohrtrasse folgen zu können. Vier parallele, 485 m lange Linien erstrecken sich aus dem Watt über den Deich. Vier 275 m lange Linien laufen vom Deich aus in die auf der Landseite angrenzende Ackerfläche.

Die Vermessungslinien wurden von unserem Auftraggeber abgesteckt. Dabei erfolgte auch die Aufnahme des Höhenreliefs. Eine Lageskizze ist als Abb. 5 im Anhang zu finden. Unser Messtrupp erreichte den Ort am Vormittag und begann nach einer Baustellenbesprechung mit dem Auftraggeber mit dem Aufbau der südlichen wattseitigen Vermessungslinie. Das heißt entlang der Linie wurde alle 5 m eine Elektrode in den Boden gesteckt und mit dem ausgerollten Messkabel verbunden. Daraufhin wurde die Vermessung durchgeführt. Anschließend wurde der Aufbau zunächst auf die nächstliegende Wattlinie und danach auf die südliche Landlinie verlegt und auch hier

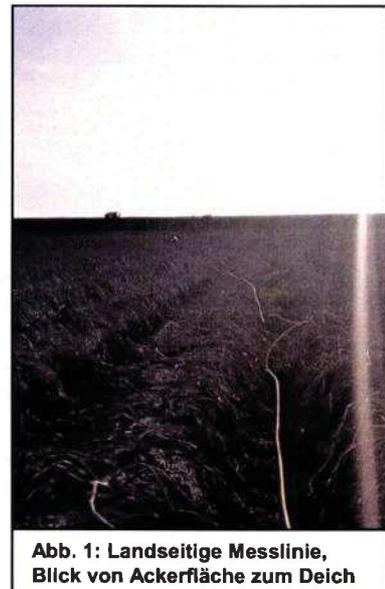


Abb. 1: Landseitige Messlinie, Blick von Ackerfläche zum Deich



die Messungen durchgeführt. Am Folgetag wurden die beiden nördlichen Wattlinien vermessen, am dritten Tag die drei restlichen Landlinien. Abschließend wurden die vom Vermesser gesetzten Marken entfernt und die Rückreise angetreten.

Die eigentliche geoelektrische Vermessung erfolgt Programmgesteuert mit einem Messcomputer schon begleitend zum Streckenaufbau. Hierzu kam eine Multielektroden-Geoelektrikapparatur RESECS II als Steuer- und Registriereinheit zum Einsatz. Diese war über Kabel mit dem Messkabel und Edelstahlelektroden, die in den Boden gesteckt wurden, verbunden. Der Elektrodenabstand

betrug 5 m. Die geoelektrischen Vermessungen wurden in der Wenner-

Aufstellung realisiert. Hierbei sind bei einer Einzelmessung die Abstände zwischen den vier auf einer geraden Linie angeordneten betroffenen Elektroden gleich. Der Stromkreislauf wird über die beiden äußeren Elektroden gebildet, die Spannung wird zwischen den beiden inneren Elektroden gemessen (s. auch die Methodenbeschreibung im Anhang). Die maximale Auslagenweite (Abstand Messpunkt – Stromelektrode) betrug ca. 90 m.



Abb. 2.: Wattseitige Messlinie, Blick vom Watt Richtung Deich

4. Bearbeitung der Daten

Aus den gemessenen Strömen und Spannungen wurden mit Hilfe der Geometriefaktoren, die sich aus den verwendeten Messgeometrien ergaben, die scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände berechnet. Das sind Werte, die sich rechnerisch aus den direkten Messwerten Strom und Spannung jeweils für einen Messpunkt bei einem elektrisch homogenen Untergrund ergäben. Diese scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände waren Grundlage der weiteren Bearbeitung. Sie wurden in Form so genannter Pseudosektionen farbcodiert dargestellt. Bei dieser Darstellung entspricht die Z-Achse nicht einer wirklichen Tiefe sondern einer Größe, die proportional zum jeweiligen Abstand zwischen den zwei Stromelektroden ist (Abb. 3).

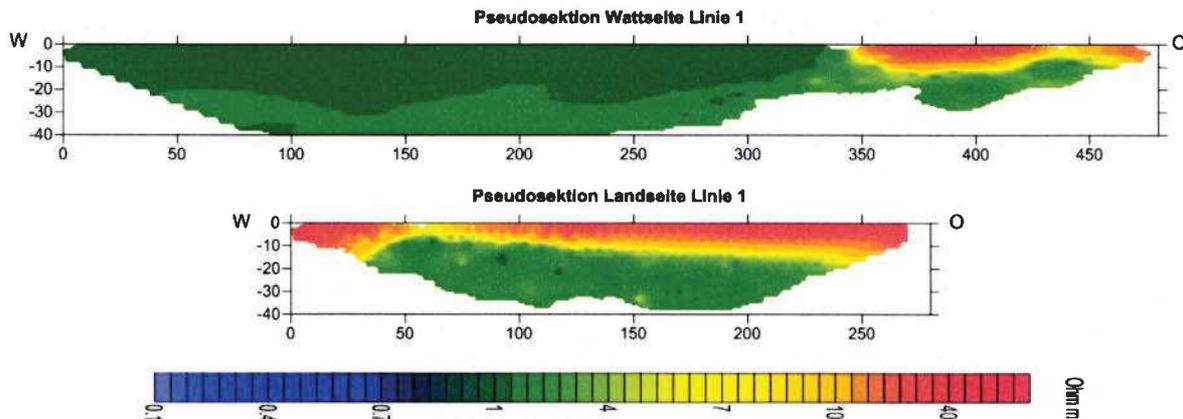


Abb. 3: Beispiel: Pseudosektionen

Aus den scheinbaren spezifischen Widerständen, der jeweils zugehörigen Messgeometrie und der Morphologie wurden mit dem Programm SensInv3D über Inversionsrechnungen die Verteilung der „wahren“ spezifischen Widerstände im Untergrund berechnet. Da nicht flächenhaft sondern entlang von Linien vermessen worden war, wurde an allen Linien jeweils eine 2D-Modellierung vorgenommen. Es wurden bis zu 20 Iterationsschritte berechnet. Nach etwa 15 Iterationen zeichneten sich keine weiteren Verbesserungen der Ergebnisse mehr ab. Deswegen wurden für alle Linien die Ergebnisse der 15. Iterationen für die Darstellung verwendet. Aus allen acht vermessenen Linien wurde eine Sektion, die sich entlang der Systemachse erstreckt, berechnet und zur Darstellung gebracht (siehe Abb.6). Hierbei wurden allerdings die beiden inneren Linien 2 und 3 stärker gewichtet als die äußeren Linien 1 und 4. Die spezifischen elektrischen Widerstände wurden dabei farbcodiert dargestellt.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den geoelektrischen Schnitten (Abb. 6a und 6b im Anhang) dargestellt. Im Anhang sind außerdem die einzelnen Sektionen der acht vermessenen Linien wiedergegeben (siehe Abb. 7 und 8). Schon in den Pseudosektionen (Abb. 3) erkennt man, dass sich die spezifischen Widerstände nur über einen geringen Wertebereich erstrecken. Der Pseudosektion der wattseitigen Linie 1 ist ebenfalls zu entnehmen, dass es aufgrund von fehlenden Elektroden zu einer erheblichen Reduktion der Aufschlusstiefe kommen kann: In den durch Steinmolen oder Straßenbelag versiegelten Boden konnten keine Elektroden gesteckt werden. Dies zeigt sich durch fehlende Daten im östlichen Bereich der Linie. In der Sektion der

| Bodenart | Ungefäherer spezifischer Bodenwiderstand in Ohm m |
|-------------------------------|---|
| Mergel, Torf, Humus (feucht) | 5 ... 15 |
| Moorboden | 30 ... 50 |
| Lehm, Ton, Ackerboden | 20 ... 200 |
| Mergel, Torf, Humus (trocken) | 50 ... 200 |
| Feuchter Sandboden | 100 ... 400 |
| | 500 ... 2000 |
| Kies | |
| Schotter, Mutterfels, Basalt | 3000 ... 10.000 |

Abb. 4: Widerstandstabelle als Beispiel



Systemachse (Abb. 6a) sind aufgrund der Inversion keine Datenlücken mehr enthalten. Es sollte bei der Betrachtung jedoch beachtet werden, dass die Datengrundlage nicht für alle Ortspunkte gleichbleibend gut ist. Der Sektion der Systemachse (Abb.6a) ist zu entnehmen, dass der Deich und die landseitigen oberflächennahen Bereiche höhere spezifische elektrische Widerstände aufweisen als sie im Watt zu finden sind. Im Watt nehmen die spezifischen Widerstände mit zunehmender Tiefe zu. Signifikant niedrige Widerstände sind auf der landseitigen Seite des Deichs ab etwa 10 m Tiefe zu beobachten.

Die spezifischen Widerstände sind Materialkonstanten. Bei Kenntnis dieser Größen lassen sich prinzipiell Abschätzungen über Bodenarten gewinnen. Leider streuen die Werte aber erheblich, so dass es deutliche Überschneidungen der Widerstandsbereiche unterschiedlicher Gesteine und Böden gibt. Als Beispiel ist in Abb. 4 eine Tabelle der spezifischen Widerstände verschiedener Bodenarten aufgelistet. Da der spezifische Widerstand von Böden wesentlich durch die Porenfüllung bestimmt wird, spielt die Wassersättigung des Untergrunds eine große Rolle. Besonders der Eintrag von Salzwasser erhöht die elektrische Leitfähigkeit und sorgt somit für teilweise sehr geringe spezifische elektrische Widerstände.

Die Schnitte der vier Linien (Abb. 7 und 8) sind sich sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich nur in Details. Dies ist auch nicht verwunderlich, da sie in einem Abstand von nur 10 m zueinander parallel verlaufen. Im Folgenden werden deshalb die Ergebnisse nur am Schnitt „Systemachse“ (Abb. 6a) und „Klassifizierte Widerstandsverteilung“ (Abb. 6b) diskutiert.

Wie bereits oben erwähnt, weist der Wattboden niedrige spezifische elektrische Widerstände auf, die mit der Tiefe etwas zunehmen, von etwa $1 \Omega\text{m}$ im oberen Bereich auf ca. $2 \Omega\text{m}$ in Tiefen ab etwa 10 m unter GOK. Solche Werte sind für mit Salzwasser gefüllte Böden zu erwarten. Der höhere Widerstand ab etwa 10 m Tiefe ist wahrscheinlich durch einen geringeren verfügbaren Porenraum als weiter oben bedingt. Dieses wird jedoch nur für den westlichen Abschnitt des Vordeichbereiches beobachtet. Direkt vor dem Deich ist im Watt eine vergleichsweise niederohmige Zone (geringe spezifische elektrische Widerstände) zu beobachten, die sich über die gesamte Schnitttiefe erstreckt. Die Zunahme des spezifischen Widerstands ab etwa 10 m Tiefe wird hier nicht beobachtet.

Im Bereich des Deichs nehmen die spezifischen Widerstände stark zu, sind aber insgesamt weiterhin im tieferen Bereich recht niedrig. In den oberflächennahen Bereichen des Deichs zeigen sich deutlich höhere Widerstände als in den tieferen Bereichen. Hier zeigt sich der Einfluss des nicht mit Seewasser gesättigten sandigen Deichkerns. Landseitig des Deichs findet man in den ersten 5 bis 10 m unter der Geländeoberkante spezifische elektrische Widerstände von etwa 20 bis $50 \Omega\text{m}$. Diese Werte sind für Ackerböden nicht weiter auffällig. In größeren Tiefen nehmen die Widerstände allerdings sehr schnell ab und zeigen ab etwa 10-15 m Tiefe besonders kleine spezifische elektrische Widerstände um $0,5 \Omega\text{m}$. Der spezifische elektrische Widerstand ist hier signifikant geringer als im Vordeichbereich, wo er bei etwa 1 bis $2 \Omega\text{m}$ liegt. Die Oberkante dieser sehr leitfähigen Zone fällt nach Osten hin ein. Der Porenraum ist in diesem Bereich mit Salzwasser gefüllt. Überlagert wird



diese Zone von einem Süßwasserkeil, dessen Mächtigkeit in Richtung auf den Deich (Westen) abnimmt. Das Salzwasser der Nordsee hat sich keilförmig unter das Süßwasser an Land, das eine geringere Dichte aufweist als das Salzwasser, geschoben. Ein Vergleich mit der Situation im Vordeichbereich zeigt aber, dass dieses alleine nicht ausreicht, die beobachteten extrem geringen spezifischen Widerstände um $0,5 \Omega\text{m}$ zu erklären.

Ein größeres Porenvolumen, das in der Lage ist mehr Wasser aufzunehmen als im Vordeichbereich, könnte ein solches Ergebnis liefern. Bei gleichbleibender Porosität müsste alternativ die Porenfüllung eine höhere Leitfähigkeit aufweisen als das Seewasser im Wattbereich. Beachtung sollte in diesem Zusammenhang aber auch die Zone geringerer spezifischer Widerstände in Tiefen unter ca. 10 m unter GOK unmittelbar vor dem Deich finden. Es ist durchaus möglich, dass diese eine weniger ausgeprägte Fortsetzung der ausgeprägten niederohmigen Zone hinter dem Deich ist.

Der Deich setzt wegen seiner Höhe bzw. Mächtigkeit bei hohen spezifischen Widerständen eine Zäsur. Kontakte zwischen Zonen mit unterschiedlichen spezifischen Widerständen lassen sich nur in Form von allmählichen Übergängen modellieren. Wenn die Differenz der Widerstände sehr groß ist, erstrecken sich diese Übergänge über größere Bereiche. Dies trifft beim Deich in noch stärkerem Maß zu als beim östlich anschließenden Acker. Der starke Kontrast zwischen dem niederohmigen ($0,5$ bis $1,0 \Omega\text{m}$) tieferen Untergrund und dem hochohmigen Deich (ca. 30 bis $100 \Omega\text{m}$) führt zu einer Maskierung der Verhältnisse vor allem unterhalb des Deichs. Diese Beurteilung führt zu der in der Abbildung 6b gezeigten interpretativen Darstellung. Ein weiterer Effekt, der hier nicht aufgelöst werden kann, ist eine erwartbare Setzung des Deichs. Also eine Verdichtung des Untergrundes aufgrund der überlagerten Deichmasse.

Die Durchgeführten Kernbohrungen und Drucksondierungen zeigen sowohl auf der landseitigen als auch auf der wattseitigen Seite in den ersten 10 m sandige und mit zunehmender Tiefe schluffige Böden. Die geoelektrischen Untersuchungsergebnisse sind hiermit kompatibel. Die spezifischen elektrischen Widerstände sind jedoch stark vom porenfüllenden Wassereintrag geprägt, so dass sich allein über sie keine eindeutigen Abschätzungen über die Bodenarten machen lassen. Die gemessenen elektrischen Widerstände zeigen jedoch weder wattseitig noch landseitig überraschende laterale Änderungen des Untergrundes.

6. Zusammenfassung

Im Zeitraum vom 14.09.2021 bis zum 16.09.2021 wurden geoelektrische Vermessungsarbeiten bei Büsum zur Untersuchung des Baugrunds für zwei HDD Bohrtrassen durchgeführt.



Die vorgefundene Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands im Untergrund deckt sich mit den Ergebnissen der Kernbohrungen und Drucksondierungen und spricht für größtenteils sandige und in tieferen Lagen schluffige Böden. Aus der Widerstandsverteilung ergeben sich weder auffällige laterale noch vertikale Änderungen der Bodenstruktur.

Dänischenhagen, den 26. Oktober 2021

Dr. Rolf Muckelmann



Anhang

Abbildung 5: Lageskizze

Abbildung 6a: Geoelektrischer Schnitt der Systemachse

Abbildung 6b: Klassifizierte Widerstandsverteilung der Systemachse

Abbildung 7: Schnitt Wattseitige Linien 1-4

Abbildung 8: Schnitt Landseitige Linien 1-4

Verfahrensbeschreibung: Gleichstrom-Geoelektrik



Abb. 5: Lageskizze

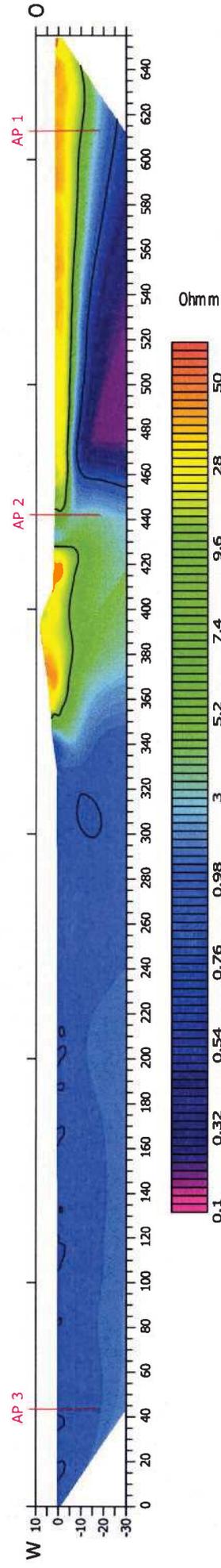


Abb. 6a: Geoelektrischer Schnitt der Systemachse

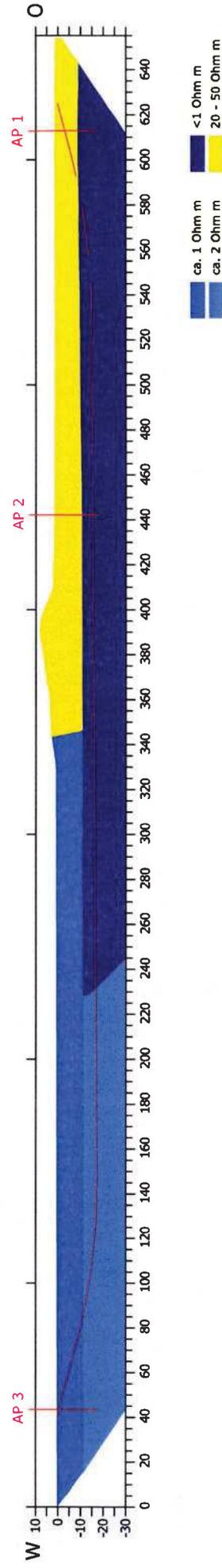


Abb. 6b: Klassifizierte Widerstandsverteilung der Systemachse

!Achtung!

Die Transiente der HDD Bohrung ist dem Dokument [20210409_BW6_CHD_Gesamtplan_LSD](#)
[Büsum_ETRS89_Rev2_2004.dwg](#) entnommen. Die Länge stimmt nicht mit der auf dem
 Flächenplan eingezeichneten Bohrung überein: Ein- und Austrittspunkt der Bohrung
 liegen jeweils 8 m weiter Richtung Zentrum.

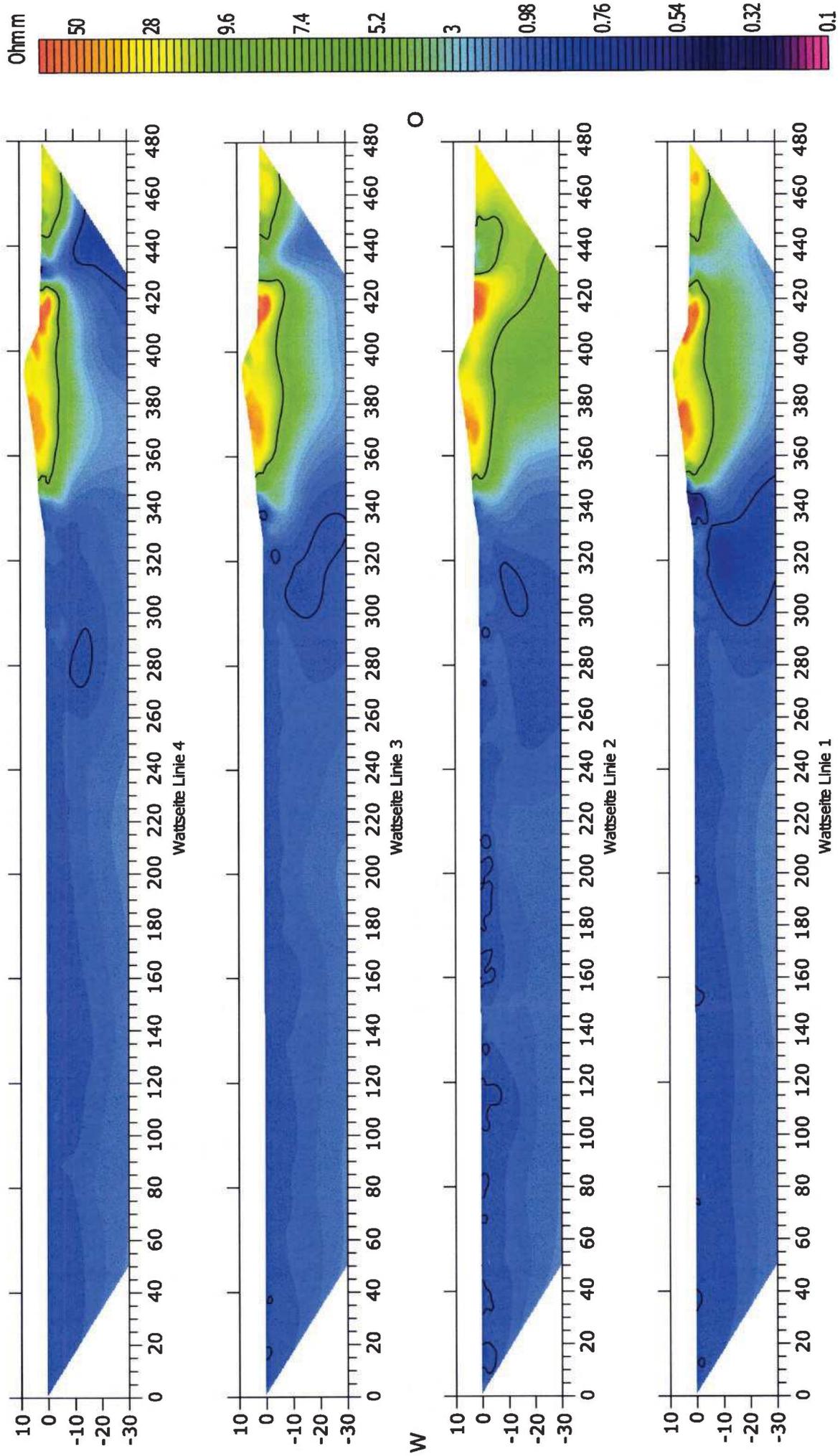


Abb. 7: Geoelektrische Schnitte der wattseitigen Linien 1-4

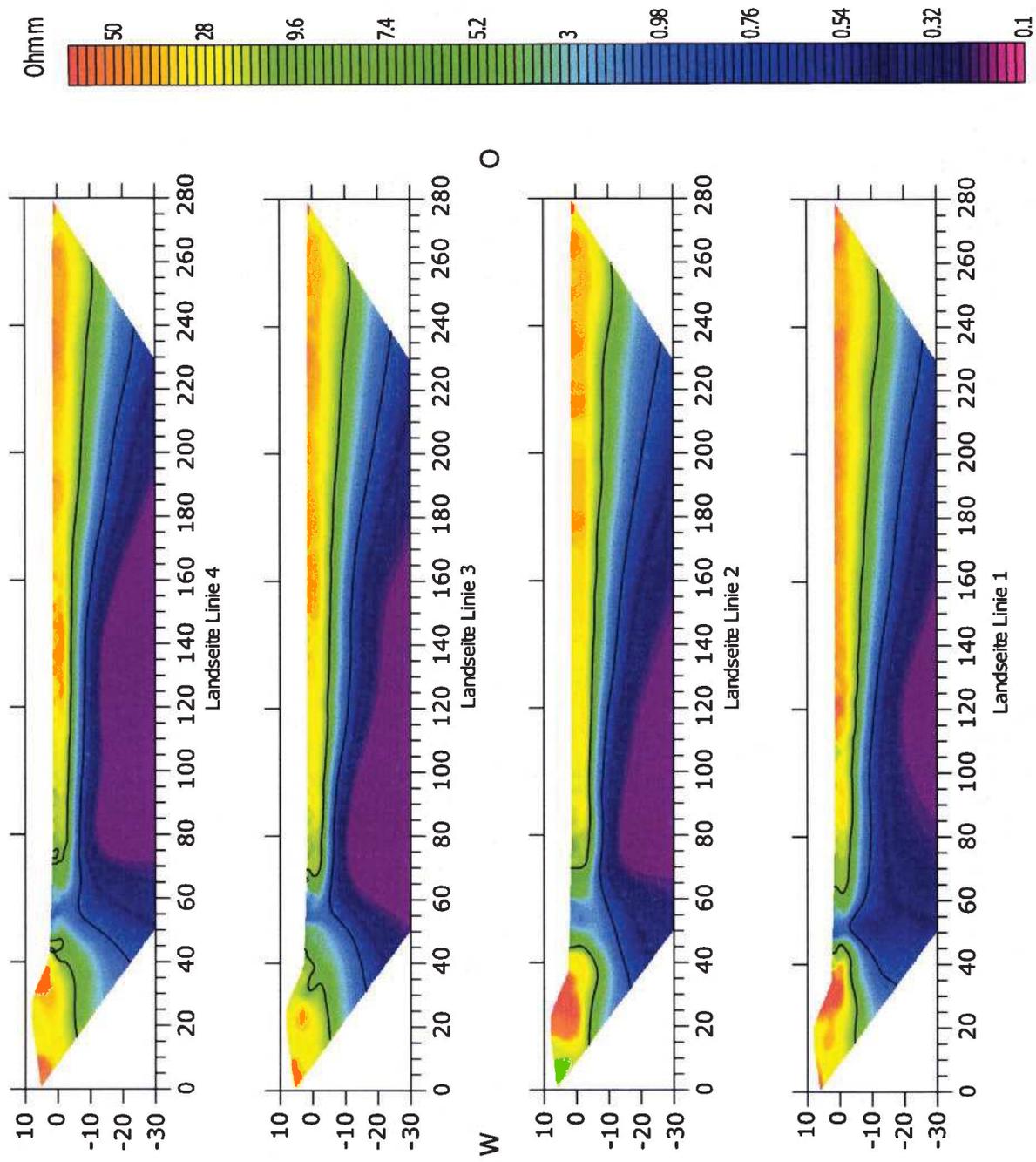


Abb. 8: Geoelektrische Schnitte der landseitigen Linien 1-4



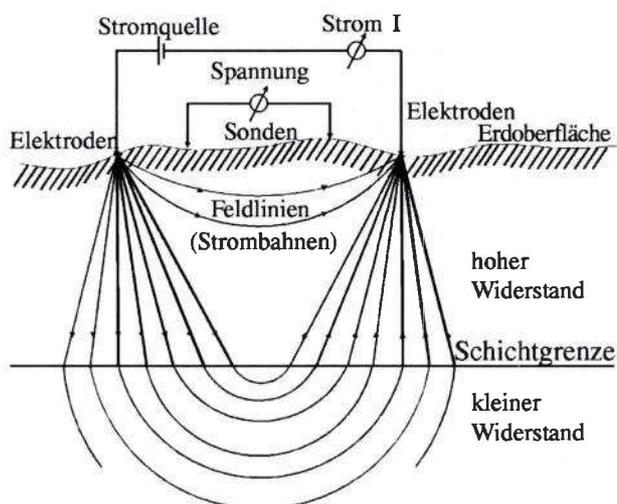
Verfahrensbeschreibungen

Geoelektrik

Zur Bestimmung der Tiefenlage und Mächtigkeit von Sand/Kies und Ton-/Mergelschichten ist die Gleichstrom-Geoelektrik als geophysikalisches Prospektionsverfahren besonders geeignet. Bei ihrem Einsatz können mit verhältnismäßig geringem Aufwand größere Areale vermessen werden. Geoelektrische Tiefensondierungen werden oft in der sogenannten Schlumberger-Anordnung von Elektroden und Sonden vorgenommen. Eine Prinzipskizze über die Anordnung von Sonden und Elektroden ist unten in der Abb. dargestellt.

Bei einer geoelektrischen Tiefensondierung wird die Spannung, die von einem über Elektroden in den Boden eingespeisten Strom herrührt, an einem Zentralpunkt gemessen. Mit zunehmender Entfernung der Elektroden beiderseits vom Zentralpunkt wächst die Eindringtiefe der Strombahnen an. Aus den gemessenen Strömen und Spannungen werden bei vorgegebener Geometrie der Sonden- und Elektrodenanordnung sogenannte scheinbare spezifische elektrische Widerstände errechnet. Diese Widerstandswerte werden dem Zentralpunkt der Aufstellung zugeordnet. Sie sind jedoch integrale Werte über den Untergrund entlang der Strombahnen. Je weiter die Elektroden vom Zentralpunkt entfernt sind, desto größere und tiefere Bereiche des Untergrundes werden erfasst, und um so eher geben die Messungen den allgemeinen durchschnittlichen Aufbau wieder. Deshalb liefert die Interpretation nicht nur Informationen über den Untergrund im Zentralpunkt, sondern auch über seine Umgebung.

Prinzipskizze einer geoelektrischen Tiefensondierung



Die Auswertung der geoelektrischen Tiefensondierung erfolgt durch 1-dimensionale Modellrechnungen auf einem Computer. Dabei wird angenommen, dass der Untergrund horizontal geschichtet ist. Ferner wird davon ausgegangen, dass es an den Grenzen einzelner Schichten zu keiner Vermischung kommt, sondern dass die Änderungen der Materialparameter abrupt erfolgen. Rechnerisch werden in dem Modell die Mächtigkeiten und spezifischen elektrischen Widerstände der einzelnen Schichten solange variiert, bis die Anpassung der Modellkurve an die gemessenen Daten optimal ist.

Das Ergebnis der Berechnung ist der Aufbau des Untergrundes in verschiedenen Schichten, für die jeweils Mächtigkeit und spezifischer Widerstand angegeben werden. Unterschiedliche Materialien, z.B. Sand oder Ton, zeichnen sich durch unterschiedliche und typische spezifische Widerstände aus. Durch geoelektrische Tiefensondierungen werden die grundsätzlichen geologischen Verhältnisse des Untergrundes erfasst. Die angegebenen Werte für Mächtigkeit und Widerstand weisen in der Regel eine Unsicherheit von 5 % bis 10 % aus, wenn die genannten Voraussetzungen etwa erfüllt sind. Sind diese Voraussetzungen (söhlige Lagerung und diskrete Schichtung) nicht erfüllt, so können die Fehler erheblich größer werden und ggf. kann nur noch eine semiquantitative oder gar eine qualitative Aussage gewonnen werden.

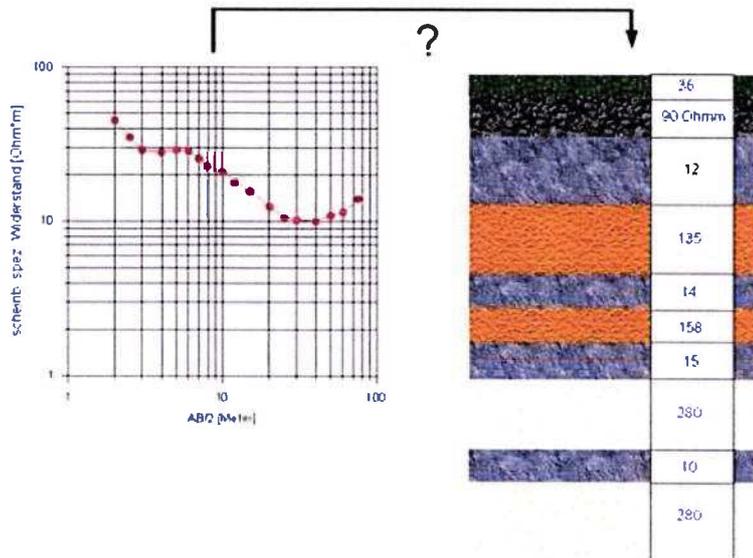


Sondierkurve, Geologie und geoelektrisches Tiefenmodell

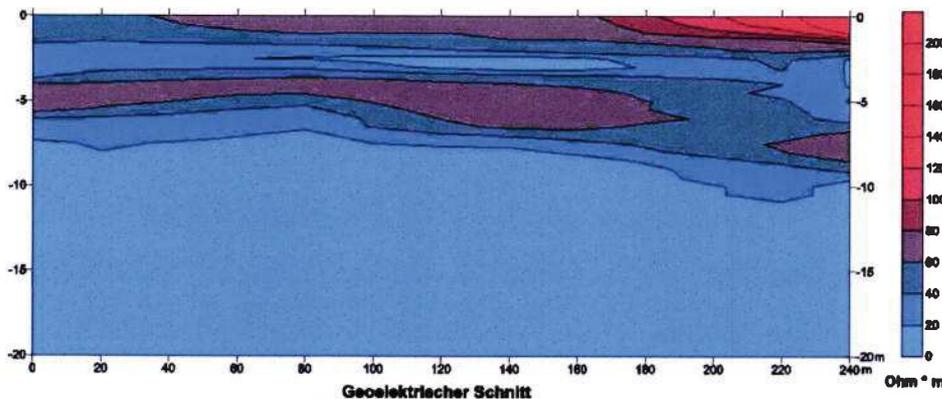
Aus einer Kombination mehrerer Tiefensondierungen kann ein 2-dimensionaler geoelektrischer Schnitt erstellt werden, der Grundlage einer geologischen Interpretation ist.

Bei einer **geoelektrischen Kartierung** wird der Abstand der Elektroden zum Zentralpunkt der Aufstellung nicht variiert. Es wird hierbei die

gesamte Sonden- und Elektrodenaufstellung lateral mit ungeänderter Aufstellungsgeometrie versetzt. Für jeden Zentralpunkt wird hierbei nur ein scheinbarer spezifischer Widerstand bestimmt. Die effektive Wirtiefe bestimmt sich hierbei u.a. durch den Abstand der Elektroden zum Zentralpunkt. Je größer dieser Abstand ist, um so größer ist auch die effektive Aufschlusstiefe.



Geoelektrische Tiefensondierungen und Kartierungen können sowohl mit Hilfe einer herkömmlichen 4-



Elektroden Messapparatur als auch mit einer sogenannten Multielektrodenapparatur durchgeführt werden. Auch bei einer Multielektrodenanlage werden zu jeder Einzelmessung in der Regel nur 4 Elektroden

benutzt. Die Elektroden müssen dann allerdings zur Änderung der Messgeometrie nicht umgesteckt werden. Die Apparatur schaltet, nach einem vorgegebenen Programm, selbstständig nach jeder Einzelmessung auf andere Elektroden um. Dies kann vor allem bei kleinräumigen Untersuchungen mit Elektrodenintervallen bis zu ca. 2 m, wie sie z.B. in der Archäologie erforderlich sind, bei der Datenakquisition einen deutlichen Produktivitätsfortschritt ergeben.