

Bericht

Hohlraumortung im Erschließungsgebiet Röte III in Mötzingen – Ergänzungskampagne

- Auftraggeber: RBS wave GmbH Standort Ettlingen Ludwig-Erhard-Str. 2 76275 Ettlingen Deutschland
- Auftragnehmer: Dr. Donié Geo-Consult GmbH Am Hang 3 76307 Karlsbad Deutschland
- Bearbeiter: M.Sc. Geoph. Dr. Anne-Sophie Reiß M.Sc. Geol. Florian Streibel Dipl.-Geol. Dr. Christoph Donié

12. April 2023



Inhalt

1.	Veranlassung	4
2.	Unterlagen	4
3.	Allgemeiner Überblick	4
3.1	Untersuchungsgebiet	4
3.2	Kurzbeschreibung der Geologie	5
3.3	Aufgabenstellung	6
4.	Untersuchungskonzept	7
4.1	Elektromagnetische (EM-) Kartierung	7
4.2	Geoelektrische Tomographie	8
5.	Durchgeführte Geländearbeiten	8
5.1	Vermessung	9
5.2	EM-Kartierung	9
5.3	Geoelektrische Messungen	10
6.	Datenbearbeitung und Auswertung	10
6.1	Auswertung der EM-Kartierung	10
6.2	Geoelektrische Messungen	10
7.	Untersuchungsergebnisse und Interpretation	11
8.	Ausblick und Handlungsempfehlung	13

Anhang

Verfahrensbeschreibungen: Geoelektrische Tomographie, Elektromagnetik



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Blick von N nach S über ein nicht abgeerntetes Feld im Vordergrund auf eine	
	Scheune und landwirtschaftlich genutzte Flächen mit geringem Baumbestand.	5
Abbildung 2	Blick von N nach S auf Wiesen mit vereinzelten Obstbäumen sowie ein Feld n	nit
	Sonnenblumen	5
Abbildung 3	Ausschnitt aus der geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:50.000 [U3]	
	mit kartierter Störung im Untersuchungsgebiet (kuE: Erfurt-Formation, moD:	
	Trigonodusdolomit, qhz: Holozäne Abschwemmmassen)	6
Abbildung 4	EM-Kartierung unter Einsatz des Messgerätes CMD 4/6 bei simultaner	
	Positionsaufzeichnung mittels GPS (Stonex S800A)	9
Abbildung 5	Messprinzip der geoelektrischen Widerstandstiefensondierung	17
Abbildung 6	Prinzip des elektromagnetischen Induktionsverfahrens (nach Millitzer & Webe	r,
	1985: Angewandte Geophysik, Band 3, Springer-Verlag Wien)	18
Abbildung 7	Isolinienplan der elektrischen Leitfähigkeit. Der deutliche Unterschied in der	
	elektrischen Leitfähigkeit zwischen linker und rechter Bildhälfte wird durch zwe	ei
	verschiedene geologische Formationen hervorgerufen.	19

Anlagen

Anlage 1:	Lageplan mit EM-Messfläche, Geoelektrikprofilen, Bohransatzpunkten und ver-
	muteter Störung

- Anlage 2.1: EM-Ergebnisse für sieben verschiedene Tiefenbereiche
- Anlage 2.2: Geoelektrische Längsschnitte nach 2D-Inversion für die Profile P11-P13
- Anlage 3.1: Lageplan mit Schwächezonen innerhalb des Baugrunds aufgrund tieferliegender karstbedingter Phänomene mit Bohransatzpunkten
- Anlage 3.2: Lageplan mit tektonischen Strukturen auf Basis der geophysikalischen Erkundungsergebnisse, interpretiert



1. Veranlassung

Nachdem in der jüngeren Vergangenheit sowohl punktuelle geotechnische Untersuchungen [U1] als auch lokale geophysikalische Detailuntersuchungen [U2] im Bereich der Erschließungsfläche Röte III in Mötzingen Hinweise auf mögliche Karstphänomene bestätigt haben, sollte eine flächenhafte Erkundung mittels Elektromagnetik vorgenommen werden. Die zu untersuchende Messfläche erstreckt sich über ca. 27.600 m². Zur Detailabklärung sollten zusätzlich drei geoelektrische Messprofile durchgeführt werden.

Am 24.01.2023 beauftragte die RBS wave GmbH aus Ettlingen die Dr. Donié Geo-Consult GmbH aus Karlsbad mit der Durchführung der genannten geophysikalischen Erkundung.

2. Unterlagen

- [U1] RBS wave GmbH, Ettlingen: Geotechnisches Gutachten mit Anlagen, Gemeinde Mötzingen, Erschließungsgebiet Röte III, 71159 Mötzingen, 03.11.2020
- [U2] Dr. Donié Geo-Consult GmbH, Karlsbad: Bericht Hohlraumortung im Erschließungsgebiet Röte III in Mötzingen, 18. November 2022
- [U3] Baden-Württemberg Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LBRG) (2021): LGRB-Kartenviewer – Layer GeoLa-GK50: Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:50.000, abgerufen am 31.01.2023
- [U4] Geotechnik Aalen GmbH und Co. KG, Aalen: Anlage 2.1, Bohrprofil der Bohrung BS2, 14.11.2022
- [U5] Geotechnik Aalen GmbH und Co. KG, Aalen: Anlage 2.1 bis 2.18 Bohrprofile und DPH-Schlagzahlen, 20.03.2023

3. Allgemeiner Überblick

3.1 Untersuchungsgebiet

Das Erschließungsgebiet Röte III liegt am westlichen Ortsrand von Mötzingen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Wiesengelände mit vereinzelten Obstbäumen und teilweise um landwirtschaftlich genutzte Flächen, die zum Zeitpunkt der Messung lediglich einen geringen Bewuchs aufwiesen (Abbildung 1). Nördlich eines WSW-ESE verlaufenden Feldweges, der das Untersuchungsgebiet quert, befand sich ein nicht abgeerntetes Sonnenblumenfeld.



Südlich des Feldweges konnte die Messfläche wegen mehrerer Bäume mit teils tiefhängenden Ästen und einer Scheune nicht vollständig erfasst werden. Kleinräumigere Einschränkungen gab es auch im nördlichen Bereich beim Passieren einzelner Obstbäume (Abbildung 2).



Abbildung 1 Blick von N nach S über ein nicht abgeerntetes Feld im Vordergrund auf eine Scheune und landwirtschaftlich genutzte Flächen mit geringem Baumbestand.



Abbildung 2 Blick von N nach S auf Wiesen mit vereinzelten Obstbäumen sowie ein Feld mit Sonnenblumen

3.2 Kurzbeschreibung der Geologie

Laut geologischer Karte des Landes Baden-Württemberg [U3] treten im Untersuchungsgebiet der Trigonodusdolomit im Süden und die Erfurt-Formation im Norden auf, die im Kartenbild von einer WNW-ESE streichenden Störung getrennt sind (Abbildung 3). Die Erfurt-Formation



(Unterkeuper) besteht im Allgemeinen aus Wechsellagerungen von Ton-, Sandstein und Dolomitstein, lokal mit Knollen oder Lagen von Gipsstein oder Anhydrit [U1, U3]. Der Trigonodusdolomit (entspricht der Rottweil-Formation, Oberer Muschelkalk) setzt sich aus dolomitischem Kalkstein und Dolomitstein mit Tonmergelsteinlagen zusammen [U1, U3]. Im Untersuchungsgebiet wurden in Baugrundaufschlüssen unter der Oberbodenschicht meist Tone und Schluffe, teilweise auch Kiese und Steine (schluffig, schwach tonig, Verwitterungshorizont) angetroffen [U1, U4]. Darunter wurde Tonstein (Erfurt-Formation) beziehungsweise Kalkstein und Dolomitstein (Trigonodusdolomit) nachgewiesen.



Abbildung 3 Ausschnitt aus der geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:50.000 [U3] mit kartierter Störung im Untersuchungsgebiet (kuE: Erfurt-Formation, moD: Trigonodusdolomit, qhz: Holozäne Abschwemmmassen)

In den im März 2023 ergänzend durchgeführten Baugrunduntersuchungen [U5] wurden unterhalb der Oberbodenschicht teilweise anthropogene Auffüllungen nachgewiesen. Mit Hilfe der neuen Erkundungskampagne [U5] war es generell möglich, direkte Hinweise auf den Übergangsbereich zwischen Locker- und Festgestein zu gewinnen.

3.3 Aufgabenstellung

Ziel der geophysikalischen Untersuchung war es, bis in eine Tiefe von 9 m möglicherweise vorhandene Schwächezonen (Auflockerungszonen oder Hohlräume), die auf Karstphänomene zurückführen sind, zu detektieren. Dabei sollte insbesondere festgestellt werden, in



welchen Bereichen der Erschließungsfläche Auffälligkeiten erkennbar sind, die aufgrund eines unmittelbaren Zusammenhangs mit dem tieferen geologischen Untergrund bautechnisch relevante Schwächezonen darstellen könnten. Darüber hinaus sollten mittels zweier geoelektrischer Längsprofile, die den Verlauf der laut geologischer Karte [U3] zu erwartenden geologischen Störung (Abbildung 3) schneiden sollten, indirekte Hinweise auf diese tektonische Struktur gewonnen werden. Ein drittes geoelektrisches Messprofil sollte der Ergänzung einer bereits im Dezember 2022 durchgeführten geophysikalischen Erkundung [U2] dienen.

4. Untersuchungskonzept

4.1 Elektromagnetische (EM-) Kartierung

Aufgrund der Flächengröße von ca. 27.600 m² sollte als zielführende und wirtschaftlich vertretbare Erkundungsmethode eine elektromagnetische (EM-) Kartierung unter Einsatz zweier unterschiedlicher Messgeräte (CMD 4/6 und CMD Explorer 6L) entlang von parallelen Messprofilen im Abstand von 1 m durchgeführt werden. Dabei sollten insgesamt sieben Tiefenbereiche bis zu einer Tiefe von max. 9 m erfasst werden. Als Ergebnis sollten sieben Horizontalschnitte für die unterschiedlichen Tiefen mit der jeweiligen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit erstellt werden.

Bei dieser Messmethode wird an der Geländeoberfläche ein künstlich erzeugtes elektromagnetisches Feld (Primärfeld) angelegt, wodurch in leitfähigen Strukturen im Untergrund ein Wirbelstromsystem entsteht. Das hieran gekoppelte sekundäre magnetische Feld überlagert das Primärfeld. An der Empfangsspule wird eine magnetische Komponente (Horizontal- oder Vertikalkomponente) des Gesamtfeldes gemessen. Nach Korrektur des gemessenen Gesamtfeldes um den Anteil des bekannten Primärfeldes lässt sich hieraus die elektrische Leitfähigkeit (in Siemens/Meter, S/m) des Untergrundmaterials bestimmen, die den direkten Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes in Ohm*m darstellt.

Verfahrensbedingt ist die Auflösung oberflächennah am höchsten und nimmt mit zunehmender Tiefe sukzessive ab.



4.2 Geoelektrische Tomographie

Zur Detailabklärung der kartierten geologischen Störung [U3] sowie einer teilweise untersuchten auffälligen Geländestruktur [U2] sollten zusätzlich Messungen unter Einsatz einer geoelektrischen Tomographie entlang dreier Messprofile erfolgen.

Bei der Durchführung einer geoelektrischen Tomographie wird ein elektrisches Feld erzeugt, in dem über zwei Elektroden Strom in den Untergrund eingespeist wird. Über zwei Potentialelektroden werden an verschiedenen Positionen die resultierenden Potentialdifferenzen erfasst. Daraus lässt sich unter Einbeziehung der jeweiligen Messgeometrie der scheinbare spezifische Widerstand berechnen.

Um eine möglichst hohe vertikale und laterale Auflösung im Untersuchungsfeld zu erhalten, sollte als Messkonfiguration eine Dipol-Dipol-Anordnung mit einem Elektrodenabstand von 1,5 m gewählt werden, die sich insbesondere zur Detektion kleinräumiger Phänomene eignet. Die Profillängen sollten 81 m betragen.

Die Auflösung der geoelektrischen Tomographie hängt vom Elektrodenabstand sowie von der Anzahl der Tiefenniveaus ab. Unter Einsatz der Dipol-Dipol-Konfiguration lassen sich mit einem Elektrodenabstand von 1,5 m oberflächennah Objekte oder Phänomene mit einem Durchmesser von > 1,5 m erfassen. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Auflösung physikalisch bedingt sukzessive ab. Darüber hinaus ist es notwendig, dass Suchobjekte eine gewisse laterale Ausdehnung und einen entsprechenden Widerstandskontrast in Relation zu ihrer Umgebung aufweisen, um detektiert werden zu können. Geoelektrische Anomalien sind in der Regel größer als das ursächliche Phänomen.

Bei allen geophysikalischen Verfahren ist eine Kalibrierung der ausgewerteten Messdaten an hinreichend tiefen Aufschlussbohrungen unerlässlich. Physikalisch bedingt gilt, dass ohne Kalibrierbohrungen bei einer geoelektrischen Tomographie Tiefenangaben unter idealen Bedingungen bei 80 % bis 90 % liegen.

5. Durchgeführte Geländearbeiten

Die EM-Kartierung erfolgte in zwei Messkampagnen in den Zeiträumen vom 14.02. bis 15.02.2023 (CMD 4/6) und vom 21.02. bis 22.02.2023 (CMD Explorer 6L). Die ergänzenden



geoelektrischen Messungen entlang der drei einzelnen Profile wurden am 16.03. und 18.03.2023 durchgeführt.

5.1 Vermessung

Zunächst wurde die Erschließungsfläche Röte III mittels hochauflösendem GPS-Gerät (Stonex S800A) unter Benutzung von SAPOS-Korrekturdaten abgesteckt (Koordinatensystem ETRS 89 / UTM zone 32 N). Entsprechend wurden zu einem späteren Zeitpunkt auch die Lagen der Geoelektrikprofile im Gelände markiert.

5.2 EM-Kartierung

Aufgrund der Flächengröße und der Tatsache, dass beim Einsatz dieser Messtechnologie idealerweise zusammenhängende Flächen gemessen werden, wurde das Erschließungsgebiet zunächst in drei Abschnitte unterteilt, um nicht bei Einbruch der Dunkelheit die Messkampagne irgendwo innerhalb der Messfläche abbrechen zu müssen. Die Abschnitte erstreckten sich über einen nördlichen, mittleren und südlichen Teil. Im Zuge der EM-Kartierung wurden einzelne Messprofile im Abstand von einem Meter simultan für sechs unterschiedliche Tiefenniveaus (bis 0,9 m, bis 1,6 m, bis 2,4 m, bis 3,7 m, bis 5,0 m und bis 6,3 m) mit dem Messgerät CMD4/6 untersucht (Abbildung 4). Am Profilende musste verfahrensbedingt gewendet werden, ohne dass dabei die Messung angehalten werden konnte, was bei der Darstellung der Messergebnisse aufgrund von Mehrfachdaten Grenzen zwischen den einzelnen Teilmessflächen zeigt.



Abbildung 4 EM-Kartierung unter Einsatz des Messgerätes CMD 4/6 bei simultaner Positionsaufzeichnung mittels GPS (Stonex S800A)



Die Messungen mit dem Messgerät CMD Explorer 6L erfolgten aufgrund der gerätespezifischen Auflösungsgrenzen entlang einzelner Messprofile im Abstand von 3 m, weswegen die nördliche und mittlere Teilfläche zusammengefasst werden konnten. Hierbei wurde eine Erkundungstiefe von bis zu 9 m erreicht.

Die Positionierung der Messprofile erfolgte bei beiden unterschiedlichen Mesgeräten simultan mit der EM-Kartierung unter Einsatz eines hochauflösenden GPS-Gerätes (siehe oben).

Das Messgebiet ist im Lageplan in Anlage 1 ersichtlich (dunkelgrauer Bereich) und erstreckt sich über eine Gesamtfläche von ca. 28.240 m².Abbildung 4 EM-Kartierung unter Einsatz des Messgerätes CMD 4/6 bei simultaner Positionsaufzeichnung mittels GPS (Stonex S800A)

5.3 Geoelektrische Messungen

Die geoelektrischen Messungen wurden entsprechend dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Untersuchungskonzept durchgeführt. Dabei erfolgten die Messungen entlang von drei jeweils 81 m langen Einzelprofilen (P11 bis P13). Das Profil P11 ist SSW-NNE orientiert, das Profil P12 verläuft von W-E und das Profil P13 von SW nach NE. Die Lage der Messprofile ist in Anlage 1 ersichtlich.

6. Datenbearbeitung und Auswertung

6.1 Auswertung der EM-Kartierung

Die Messdaten wurden zunächst einer Qualitätskontrolle unterzogen und Ausreißer, die insbesondere auf anthropogene Einflüsse in den Randbereichen zurückzuführen sein dürften, entfernt. Darüber hinaus wurden die Daten dahingehend gefiltert, dass Messwerte in nahezu identischer Position nicht doppelt berücksichtigt wurden. Solche Situationen stellten sich vor allem in den Wendebereichen am jeweiligen Profilanfang und -ende ein. Zuletzt wurden die Untersuchungsbefunde der sieben unterschiedlichen Tiefenniveaus als Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit dargestellt. Die Ergebnisse sind in Anlage 2.1 zu ersehen.

6.2 Geoelektrische Messungen

Die Messdaten der einzelnen Messprofile wurden aufbereitet, indem einzelne Datenausreißer entfernt und die Topographie integriert wurden. Anschließend erfolgte jeweils eine 2D-Inversion (Software: Res2DInv), wobei aus den gemessenen scheinbaren elektrischen



Widerständen ein Modell mit der Verteilung des spezifischen Widerstands in Form eines geoelektrischen Längsschnitts erstellt wurde. Die Ergebnisse der Profile P11 bis P13 sind in der Anlage 2.2 dargestellt.

7. Untersuchungsergebnisse und Interpretation

EM-Ergebnisse für sieben verschiedene Tiefenbereiche – Anlage 2.1

In Anlage 2.1 ist die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Bereich der Untersuchungsfläche für sieben unterschiedliche Tiefenniveaus dargestellt. Dabei sind die unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeiten anhand einer ausgewählten Farbskala zu erkennen. Warme Farbtöne stehen für höhere elektrische Leitfähigkeiten, während kalte Farbtöne tendenziell geringere elektrische Leitfähigkeiten kennzeichnen.

Auf den ersten Blick scheinen mit Ausnahme des obersten Tiefenbereichs (bis 0,9 m) ähnliche generelle Leitfähigkeiten innerhalb der einzelnen Teilflächen vorhanden zu sein, die auf den geologischen Untergrund zurückzuführen sein dürften (im Norden rötlich, gefolgt von hellblau bis im Süden zu eher dunkelblau). Innerhalb dieser generellen Farbtöne bzw. Leitfähigkeitsbereiche sind auffällige Anomalien zu erkennen. Leitfähigkeitsmaxima lassen auf Bereiche schließen, die einen höheren Ton- und Schluffanteil oder/und einen höheren Wassergehalt aufweisen. Leitfähigkeitsminima deuten hingegen darauf hin, dass Auflockerungszonen mit luftgefülltem Porenraum, Anhäufungen von grobkörnigerem Material oder aber bei lineament-artigen Strukturen signifikante Trennflächen vorhanden sind. Sofern diese Leitfähigkeitsanomalien über mehrere Tiefenniveaus reichen und mit dem tieferen geologischen Untergrund, in dem möglicherweise Karstphänomene auftreten können, in Verbindung stehen, ist eine bautechnische Relevanz gegeben. Dies gilt auch für Anomaliebereiche, die sich ausschließlich in der Tiefe zeigen und bei denen es sich, wie oben beschrieben, um tektonische Strukturen handeln dürfte.

Geoelektrische Längsschnitte nach 2D-Inversion für die Profile P11-P13 – Anlage 2.2

In der Anlage 2.2 sind die Ergebnisse der geoelektrischen Tomographie als geoelektrische Längsschnitte nach 2D-Inversion für die Profile P11, P12 und P13 ersichtlich. Die dargestellten geoelektrischen Längsschnitte liefern indirekte Hinweise auf die zu erwartenden geologischen Untergrundverhältnisse. In allen drei Profilschnitten sind in den oberen ca. 2 m bis 3 m Schichten mit vergleichsweise kleinen elektrischen Widerständen erkennbar, die auf Deckschichten



bzw. den darunterliegenden Verwitterungshorizont des Festgesteins (Trigonodusdolomit im Süden und die Erfurt-Formation im Norden) zurückzuführen sind [U1, U3, U5]. Darunter ist ein markanter Widerstandskontrast mit einer signifikanten Widerstandserhöhung sichtbar, der der Felslinie bzw. dem Übergangsbereich zwischen Locker- und Festgestein entspricht. Dies wurde auch durch Kleinrammbohrungen bestätigt [U1, U5].

Alle drei Längsschnitte zeigen Auffälligkeiten, die entweder auf eine markante Kluft oder geologische Störung (P11 ca. Station 25 m, P12 ab ca. Station 60 m und P13 ca. Station 50 m), einen möglicherweise mit tonigen Verwitterungsprodukten verfüllten Hohlraum oder einen tektonisch stärker zerlegten und angewitterten Bereich zurückzuführen sein könnten.

Im Profilschnitt P13 ist zwischen Station 25 m und 55 m ein auffälliges Widerstandsminimum in der Tiefe erkennbar, das in unmittelbarem Zusammenhang mit dem bei Station 50 m als mögliche tektonische Struktur zu bezeichnenden Phänomen steht. Unter Einbeziehung des geologischen Kontextes könnte es sich hierbei um eine Zone handeln, in der möglicherweise aufgrund der Nähe zu einer geologischen Störung ein höherer Zerlegungsgrad des Gebirges in Verbindung mit einer stärkeren Verwitterung gegeben ist. Prinzipiell ist hier mit einem markanten Materialwechsel beziehungsweise einer Änderung der Gesteinseigenschaften zu rechnen.

Ohne einen direkten Nachweis durch eine geeignete Felsbohrung (Doppelkernrohr) bleiben diese Angaben zwar interpretativ, doch bieten sie dem Geotechniker Hinweise für eine Einschätzung der geologischen Untergrundsituation und Lokalisierung möglicher Schwächezonen.

Lageplan mit Schwächezonen innerhalb des Baugrunds aufgrund tieferliegender karstbedingter Phänomene mit Bohransatzpunkten – Anlage 3.1

In der Anlage 3.1 sind besonders markante Leitfähigkeitsanomalien dargestellt, die aus den Messergebnissen der unterschiedlichen Tiefenniveaus abgeleitet wurden (Anlage 2.1). Dabei wurden warme Farbtöne für höhere Leitfähigkeiten und kalte Farbtöne für niedrigere Leitfähigkeiten gewählt. Um die unterschiedlichen Tiefenbereiche, in denen bestimmte Anomalien festgestellt wurden, besser erkennbar zu machen, wurden unterschiedliche Farben für die jeweiligen Tiefen festgelegt (siehe Legende).

Wie bereits oben erwähnt, sind insbesondere solche Anomaliebereiche zu betrachten, die sich über mehrere Tiefenniveaus erstrecken und bis in den tieferen geologischen Untergrund



reichen, in dem möglicherweise Karstphänomene auftreten können. Außerdem sind auch lineamentartige Anomalien von Bedeutung, die ausschließlich in größerer Tiefe (im Festgestein) auftreten.

Lageplan mit tektonischen Strukturen auf Basis der geophysikalischen Erkundungsergebnisse, interpretiert – Anlage 3.2

Die in Anlage 3.2 dargestellten markanten tektonischen Strukturen basieren auf den Ergebnissen der EM-Messungen für den Tiefenbereich bis 9 m. Hierbei wurde der Fokus ausschließlich auf lineamentartige Widerstandsminima gelegt. Nach den Befunden besteht der Verdacht, dass die geologische Störung innerhalb des Untersuchungsgebietes einen leicht abweichenden Verlauf gegenüber der in der geologischen Karte [U3] eingetragenen Richtung aufweist. Eine NW-SE verlaufende markante lineamentartige Struktur dürfte der geologischen Störung laut [U3] entsprechen und stößt bei dem Geoelektrikprofil P11 exakt auf die Stelle, an der sich dort ebenfalls eine markante tektonische Struktur andeutet (Anlage 2.2). Daraus kann man schließen, dass es sich bei dem beschriebenen Phänomen um die im Untersuchungsgebiet zu erwartende geologische Störung handeln dürfte. Neben der vermuteten Hauptstörung sind eine Reihe von ähnlich markanten Strukturen in unterschiedlichen Orientierungen erkennbar.

8. Ausblick und Handlungsempfehlung

Mit Hilfe der flächenhaft bis in eine Tiefe von 9 m durchgeführten geophysikalischen Messkampagne war es möglich, Zonen zu erkennen, die wahrscheinlich im Zusammenhang mit Karstphänomenen im tieferen geologischen Untergrund stehen. Dabei konnten unterschiedliche Situationen festgestellt werden. Zunächst gibt es Bereiche, in denen sich über nahezu alle Tiefenniveaus Leitfähigkeitsmaxima zeigen, die auf ein Material aus Deckschichten oder Verwitterungsprodukten des anstehenden Festgesteins, einen lokal tiefer reichenden Verwitterungshorizont (z.B. ausgeprägte Verwitterung an Trennflächen) sowie Auflockerungszonen mit einer feinkörnigen Matrix zurückzuführen sein dürften. Im geologischen Kontext lässt sich daraus ein unmittelbarer Zusammenhang zu möglichen Karstphänomenen herstellen. Im nördlichen Bereich der Untersuchungsfläche ist eine größere Zone mit einem Leitfähigkeitsminimum zu sehen, die sich nahezu über alle Tiefenbereiche erstreckt. Ohne einen direkten Aufschluss lässt sich keine interpretative Einschätzung dieser Untergrundsituation vornehmen.

Außerdem sind in eher größeren Tiefenbereichen Zonen in Form von Leitfähigkeitsminima zu erkennen, die lineamentartig ausgebildet sind. Hierbei dürfte es sich um markante tektonische



Strukturen handeln, die wahrscheinlich keine tonigen Trennflächenbelege aufweisen, da sie unterhalb des Verwitterungshorizonts liegen.

Mit Hilfe der EM-Kartierung wurde auch ein einfaches tektonisches Modell entwickelt, das den Verlauf markanter Trennflächen zeigt. Die zur Bestätigung der laut geologischer Karte [U3] vorhandenen geologischen Störung durchgeführte geoelektrische Messung (P11) konnte innerhalb der EM-Kartierungsfläche dieses Modell bestätigen. Das außerhalb dieser Fläche liegende Profil P13, das ebenfalls Hinweise auf die geologische Störung liefern sollte, zeigt zwar eine sehr markante Anomalie, die auf diese Störung zurückzuführen sein könnte, doch steht diese weder in einem räumlichen Zusammenhang mit der Untersuchungsfläche, noch lässt sich ohne Weiteres eine Verbindung zu den tektonischen Strukturen laut EM und Geoelektrikprofil P11 herstellen. Auch das außerhalb der Untersuchungsfläche gemessene Geoelektrikprofil P12 liefert ebenfalls im östlichen Bereich einen Hinweis auf eine lokal tiefgreifende Verwitterung mit möglichen Karstphänomenen entlang einer tektonisch bedingten Schwächezone.

Ohne direkte Nachweise durch Felsbohrungen (Doppelkernrohr) sowie Baggerschürfe für den flacheren Erkundungsbereich bleiben diese Angaben zwar interpretativ, doch bieten sie dem Geotechniker Hinweise für eine Einschätzung der geologischen Untergrundsituation und eine Lokalisierung möglicher Schwächezonen. Inwieweit den Befunden nach der geologischen Interpretation der geophysikalischen Erkundungsergebnisse aus geotechnischer Sicht ein besonderes Gewicht beizumessen ist, ist im Rahmen einer entsprechenden Risikoanalyse der Erschließungsfläche zu diskutieren.

Auch wenn im Bereich der Messprofile eine gute Übereinstimmung zwischen dem Modell und der Realität zu erwarten ist, sind lokale Abweichungen von der geschilderten und in den Anlagen 2 und 3 dargestellten Situation generell nicht auszuschließen. Physikalisch bedingt ist mit einem Tiefenfehler von ca. 10 % bis 20 % zu rechnen.

Karlsbad, den 12.04.2023

Dr. Donié Geo-Consult GmbH

Dowé

Dr. Christoph Donié





Anhang: Verfahrensbeschreibungen

Geoelektrische Tomographie

Geoelektrische Tomographie nennt man Messverfahren, die die räumliche Widerstandsverteilung des Untergrundes tomographisch abbilden. Aus dieser Widerstandsverteilung lassen sich Rückschlüsse auf den Aufbau des Untergrundes ziehen. Erkundungsziele sind unter anderem:

- geologische Schichtgrenzen
- Grundwasserspiegel, Wasserwegigkeiten
- Störungszonen
- Hohlräume
- Dolinen, Klüfte, Findlinge
- vergrabene Objekte, wie Tanks, Fundamente,
- Altlasten, Deponiekörper
- Pipelines

In der Gleichstrom-Geoelektrik wird über in den Untergrund eingebrachte Stromelektroden ein elektrisches Feld erzeugt. Über Potentialelektroden werden an verschiedenen Positionen die resultierenden Potentialdifferenzen erfasst. Die Messwerte ergeben sich aus der Geometrie der jeweiligen Messanordnung und der elektrischen Feld- und damit Widerstandsverteilung im Untergrund.

Mit Multielektrodenapparaturen lassen sich große Untergrundbereiche linien- oder flächenhaft abtasten. Dabei ist die Wahl der Messkonfigurationen grundsätzlich beliebig. Unterschiedliche Konfigurationen besitzen aber unterschiedliche Vor- und Nachteile. Die Wahl der geeigneten Messkonfiguration(en) kann daher für das Ergebnis einer Messkampagne von entscheidender Bedeutung sein.

Zum Einsatz kommen u. A. die Konfigurationen "Wenner", besonders geeignet für flächenhafte Erkundungen, "Schlumberger", als Tiefensondierung zur Erkundung vertikaler Leitfähigkeitsunterschiede und "Pol-Dipol" bzw. "Dipol-Dipol" zur Erfassung lateraler Widerstandsänderungen.



Die Messdaten werden zunächst überarbeitet, um Ausreißer zu eliminieren. Mit dem korrigierten Datensatz wird dann für jedes Messprofil mittels mathematischer Inversion ein Schnitt der Widerstandsverteilung im Untergrund modelliert.

Solche Modelle besitzen allerdings eine gewisse Mehrdeutigkeit, d. h. verschiedene Untergrundmodelle können einen Satz von Messwerten erklären. Je genauer der zu untersuchende Untergrundbereich erfasst ist, d.h., je mehr Messungen an unterschiedlichen Positionen durchgeführt werden, um so präziser kann auf die tatsächliche Verteilung der Widerstände im Untergrund rückgeschlossen werden. Darüber hinaus kann die Mehrdeutigkeit der Ergebnisse durch Zusatzinformationen, z. B. Bohrprofile und geologische Karten erheblich eingeschränkt werden.

In einem zweiten Schritt wird die räumliche Widerstandsverteilung des Untergrundes geologisch interpretiert. Hierbei spielen neben der Datenqualität und dem Informationsgehalt des Widerstandsmodells auch die geowissenschaftliche Fachkenntnis und Erfahrung der Interpretierenden eine entscheidende Rolle.

Geoelektrische Widerstandstiefensondierungen

Die Methode der geoelektrischen Widerstandstiefensondierungen wird dem Bereich der konventionellen Geoelektrik zugeordnet.

Das Ziel der geoelektrischen Widerstandstiefensondierungen ist die Ermittlung der spezifischen elektrischen Widerstandsverteilung im Untergrund. Sie stellt die Grundlage für die Bestimmung der Mächtigkeit bzw. Tiefenlage einzelner geologischer Schichten unter dem Messpunkt dar.

Die elektrische Eigenschaft des "Bodens" wird durch Anlegen eines künstlichen elektrischen Feldes an der Erdoberfläche über Messelektroden erfasst.

Mit der Vierpunktanordnung von Elektroden (Stahlspieße A, B, N und M in Abbildung 5) wird über die Außenelektroden (Stromelektroden A und B) dem Boden ein künstlicher elektrischer Strom (I) zugeführt und die sich einstellende Potentialdifferenz über die beiden mittleren Elektroden (Potentialelektroden M und N in Abb. 1) gemessen. Zur Ermittlung der Tiefenlage einzelner geologischer Schichten sind eine Reihe von Einzelmessungen erforderlich. Hierbei wird der Stromelektroden-Potentialelektroden-Abstand unter Beibehaltung des Mittelpunktes von MN schrittweise soweit vergrößert, bis die gewünschte Wirkungstiefe erreicht ist.





Abbildung 5 Messprinzip der geoelektrischen Widerstandstiefensondierung

Auf diese Weise wird der scheinbare spezifische elektrische Widerstand als Funktion der Elektroden-Abstände (AB/2) und somit als Funktion der Tiefe, für den jeweils auf dem Profil festgelegten Messpunkt ermittelt. Die Auswertung (1D-Inversion) ergibt schließlich die Anzahl der Schichten, ihre Mächtigkeiten bzw. Tiefenlagen sowie die einzelnen spezifischen elektrischen Schichtwiderstände.

Mit den entsprechenden lokalen geologischen Kenntnissen (z.B. über Bohrungen) kann aus den Auswertungen der Einzelmessungen ein geologisches Modell entwickelt werden.

Stehen keine Bohrungen für Kalibriermessungen zur Verfügung, so erhöht sich der mittlere Fehler auf ca. 20 %. Insbesondere bei Wechselfolgen unterschiedlicher Gesteine wird dann eine Zuordnung der geoelektrischen Messdaten zu den anstehenden Gesteinen außerordentlich schwierig bis unmöglich. Die laterale Auflösung hängt unmittelbar vom Elektrodenabstand ab.



Elektromagnetisches Induktionsverfahren

Die Methoden der Elektromagnetik werden der konventionellen Geoelektrik zugeordnet und werden zur Untersuchung von Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund eingesetzt. In Abhängigkeit von der Quelle des anregenden Feldes spricht man von aktiven oder passiven Verfahren, wobei die passiven Verfahren (VLF, VLF-R) die von weit entfernten Radiosendern erzeugten Felder nutzen. Bei den aktiven Verfahren werden zur Anregung künstlicher elektromagnetischer Felder transportable Sender verwendet, die für ingenieurgeologische und -geophysikalische Fragestellungen im Frequenzbereich zwischen ca. 100 Hz und 60 kHz arbeiten. Durch ein künstlich erzeugtes elektromagnetisches Feld (Primärfeld) entsteht in leitfähigen Strukturen im Untergrund ein Wirbelstromsystem. Das hieran gekoppelte sekundäre magnetische Feld überlagert sich dem Primärfeld (siehe Abbildung 6). An der Empfangsspule wird eine magnetische Komponente (Horizontal- oder Vertikalkomponente) des Gesamtfeldes gemessen. Nach Korrektur des gemessenen Gesamtfeldes um den Anteil des bekannten Primärfeldes lässt sich hieraus die elektrische Leitfähigkeit (in Siemens/Meter, S/m) des Untergrundmaterials bestimmen, die den direkten Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes in Ohm*m darstellt.



Abbildung 6 Prinzip des elektromagnetischen Induktionsverfahrens (nach Millitzer & Weber, 1985: Angewandte Geophysik, Band 3, Springer-Verlag Wien)



Die erreichbaren Erkundungstiefen, Auflösungen und Empfindlichkeiten der elektromagnetischen Messsysteme hängen stark von der Leitfähigkeit des Untergrundmaterials, der abgestrahlten Frequenz, dem Abstand der Sende- und Empfangsspulen sowie der Ausrichtung der Spulen (horizontal oder vertikal) ab. Typische Werte für Erkundungstiefen liegen bei 0,6 m bis ca. 100 m.

Die Ergebnisse meist flächenhafter Kartierungen werden in Form von Isolinienplänen, die die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (oder des spezifischen elektrischen Widerstandes) zeigen, dargestellt (als Beispiel siehe Abbildung 7).



Abbildung 7 Isolinienplan der elektrischen Leitfähigkeit. Der deutliche Unterschied in der elektrischen Leitfähigkeit zwischen linker und rechter Bildhälfte wird durch zwei verschiedene geologische Formationen hervorgerufen.

Neben der Kartierung geologischer Formationen, Störungen und Klüfte finden spezielle elektromagnetische Verfahren Anwendung in der Leitungsdetektion sowie in der Ortung metallischer Objekte.







Dr. Donié Geo-Consult GmbH Am Hang 3, D-76307 Karlsbad Tel. : +49 7202/941680 E-Maii: info@donie-geo-consult.de						
Auftraggeber: RBS wave GmbH Ludwig-Erhard-Straße 2 76275 Ettlingen						
Projekt: Hohlraumortung im Erschließungsgebiet Röte III in Mötzingen - Ergänzungskampagne						
Planbezeichnung: Geoelektrische Längsschnitte nach 2D-Inversion für die Profile P11-P13						
Bearbeitet: Reiß	Maßstab: 1:300					
Geprüft: C. Donié	Datum 28.03.2023 Anlage 2.2		Anlage 2.2			



Legende

 \sim

 \sim

 \sim

 \sim

 \bullet

- Verdachststellen Level 1 in 0,9 m Tiefe \sim
 - (warme Farbtöne: erhöhte Leitfähigkeit / kalte Farbtöne: niedrigere Leitfähigkeit) Verdachststellen Level 2 in 1,6 m Tiefe
 - (warme Farbtöne: erhöhte Leitfähigkeit / kalte Farbtöne: niedrigere Leitfähigkeit) Verdachststellen Level 3 in 2,4 m Tiefe
 - (warme Farbtöne: erhöhte Leitfähigkeit / kalte Farbtöne: niedrigere Leitfähigkeit)
 - Verdachststellen Level 4 in 3,7 m Tiefe (warme Farbtöne: erhöhte Leitfähigkeit / kalte Farbtöne: niedrigere Leitfähigkeit)
 - Verdachststellen Level 5 in 5,0 m Tiefe (warme Farbtöne: erhöhte Leitfähigkeit / kalte Farbtöne: niedrigere Leitfähigkeit) Verdachststellen Level 6 in 6,3 m Tiefe
 - (warme Farbtöne: erhöhte Leitfähigkeit / kalte Farbtöne: niedrigere Leitfähigkeit) Verdachststellen Level 7 in 9,0 m Tiefe
 - (warme Farbtöne: erhöhte Leitfähigkeit / kalte Farbtöne niedrigere Leitfähigkeit)
 - Direkte Aufschlüsse
 - Geologische Störung mit unbekanntem Versatz, vermutet laut Geologischer Karte von Baden-Württemberg 1:50.000, LGRB Freiburg
 - Geoelektrikprofil





Legende

Direkte Aufschlüsse

 \bullet

Geologische Störung mit unbekanntem Versatz, vermutet laut Geologischer Karte von Baden-Württemberg 1:50.000, LGRB Freiburg Geoelektrikprofil

Markante tektonische Strukturen (Klüfte, potentielle Störung), interpretiert

