

Projekt EXPLOGRAF

*Einsatz moderner geophysikalischer
Untersuchungsmethoden in der Exploration von
Grafitlagerstätten an ausgewählten
Lagerstättenbeispielen der Bunten Serie (NÖ)*

ENDBERICHT

von

RÖMER, A., SCHEDL, A., BENOLD, C., OTTOWITZ, D.,
KATONA, T., FLORES-OROZCO, A.

140 S., 102 Abb., 9 Tab.

***Im Rahmen der GBA-Forschungspartnerschaften:
Grundlagenorientierte Mineralrohstoffforschung***

Wien, November 2020

 GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT
NEULINGGASSE 398
1030 WIEN

PROJEKTLEITUNG:

MAG. A. RÖMER (FA GEOPHYSIK) / DR. A. SCHEDL (FA ROHSTOFFGEOLOGIE)

MITARBEITERINNEN UND MITARBEITER (GBA):

MAG. D. OTTOWITZ	GEOPHYSIK
MAG. S. PFEILER	GEOPHYSIK
MMAG. C. BENOLD	GEOCHEMIE

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sei herzlich für die gute Zusammenarbeit gedankt!

Die Projektdurchführung erfolgte im Rahmen der „Grundlagenorientierte Mineralrohstoffforschung (MRI)“ im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung und des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus.

KOOPERATIONSPARTNER**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN (DEP. OF GEODESY AND GEOINFORMATION)****RESEARCH DIVISION GEOPHYSICS**

ASS. PROF. DR. A. FLORES-OROZCO

UNIV.ASS. DIPL.-ING. MSc T. KANTONA

BAKK.TECHN. J. GALLISTL

Inhalt

1. Zusammenfassung	5
1.1 Kurzzusammenfassung und kritische Reflexion der Aktivitäten bezogen auf projektinterne und projektexterne Kooperation	5
1.2 Erreichte Projektziele (Zusammenfassung)	6
1.3 Abweichungen von der Projektplanung (mit Begründung).....	7
2. Einleitung.....	7
3. Geophysikalische Untersuchungen/Messgebiet Weinberg-Amstall	11
3.1 Geologie des Grafitbergbaus Weinberg-Amstall	11
3.2 Ergebnisse Eigenpotenzial (SP).....	16
3.3 Ergebnisse Geoelektrik/Induzierte Polarisation (IP)	24
3.4 Geoelektrische Modellrechnung	32
3.5 Abschätzung des Lagerstättenpotentials.....	38
4. Geophysikalische Untersuchungen/Messgebiet Zettlitz	39
4.1 Geologie des Grafitbergbaus Zettlitz und weiterer Grafitvorkommen im Raum Zettlitz-Zettenreith-Wollmersdorf	40
4.2 Ergebnisse Messung Eigenpotenzial (SP).....	46
4.3 Ergebnisse Geoelektrik/Induzierte Polarisation (IP)	48
4.4 Ergebnisse Abschätzung des Lagerstättenpotenzials.....	59
5. Geochemische Untersuchungen Messgebiete Weinberg-Amstall/Zettlitz.....	60
5.1 Ausgangslage und Problemstellung zur geochemischen Prospektion/Exploration von Grafitvorkommen.....	60
5.2 Test bodengeochemischer Prospektionsmethoden im Bereich ausgewählter Grafitvorkommen des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie).....	61
6. Methodenbewertung und generalisierte Explorationsstrategie für Grafitlagerstätten	81
6.1 Methodenbewertung Eigenpotenzial (SP)/Mise al a Masse	81
6.2 Methodenbewertung Geoelektrik und Induzierte Polarisation (IP)	85
6.3 Methodenbewertung Geochemie bodengeochemischer Prospektionsmethoden bei der Erkundung von Grafitvorkommen.....	87
6.4 Generalisierte Explorationsstrategie für die Bewertung des Lagerstättenpotentials	88
7. Publikationen, Vorträge und wissenschaftliche Arbeiten	89
8. Aktivitäten im Bereich Öffentlichkeitsarbeit und Vortragstätigkeit	91
9. Literatur.....	92

10. Anhänge	95
10.1 GEOMON4D-IP/techn. Beschreibung.....	95
10.2 Endbericht der Arbeitsgruppe Geophysik der TU Wien.....	100

Anhänge

Anhang 9.1: Gerätebeschreibung GEOMON 4D/IP

Anhang 9.2: Adrián Flores Orozco, Lukas Aigner and Timea Katona (2019): Report: ExploGraf Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Explograf, Technische Universität Wien - Department für Geodäsie und Geoinformation Forschungsgruppe Geophysik, 40 S., Wien.

ENDBERICHT PROJEKT: EXPLOGRAF

Einsatz moderner geophysikalischer Untersuchungsmethoden in der Exploration von Grafitlagerstätten an ausgewählten Lagerstättenbeispielen der Bunten Serie (NÖ)

PROJEKTLAUFZEIT 12/2017-12/2019

(kostenneutral verlängert bis zunächst 08/2020, auf Grund der Covid-19 Situation verlängert bis 10/2020)

Beteiligte Institutionen:

Geologische Bundesanstalt (FA Geophysik, FA Rohstoffgeologie/FA Geochemie)

TU Wien (Research Division Geophysics am Dept. of Geodesy and Geoinformation)

Projektleitung gesamt: Mag. Alexander Römer/ Dr. Albert Schedl (GBA)

Projektleitung TU Wien: Prof. Dr. Adrian Flores-Orozco

1. Zusammenfassung

1.1 Kurzzusammenfassung und kritische Reflexion der Aktivitäten bezogen auf projektinterne und projektexterne Kooperation

Zunächst wurden geologische und lagerstättenkundliche Unterlagen der ausgewählten Testgebiete der jeweiligen Grafitlagerstätten (Auswertung der Literatur- und Archivunterlagen, kartenmäßige Kompilation der Grafitvorkommen anhand der verfügbaren geologischen Unterlagen und der Bergbaukartenwerke im Lagerstättenarchiv der GBA und bei der zuständigen Montanbehörde) ergänzt. Dann erfolgte eine kartenmäßige Kompilation der verfügbaren geologischen Unterlagen und eine entsprechende Aufbereitung für eine anschließende GIS Nutzung. Damit erfolgte eine Auswahl von messtechnisch geeigneten Abbaubereichen mit geringer Überlagerung und erwartbaren Grafit-Restpotenzialen in der Tiefe. Diese Bereiche von vermuteten Restpotenziale wurden mittels geophysikalischer Methoden in den als sicherungswürdig eingestuften Grafitlagerstätten der Bunten Serie (Weinberg/Amstall und Zettlitz in NÖ) auf Basis moderner geophysikalischer Explorationsmethoden (Messungen des Eigenpotentials (SP), des elektr. Widerstands, Induzierte Polarisationsmessungen (IP) im Zeit- und Frequenzbereich) konkret untersucht. Überdies wurden unterschiedliche Probenmedien aus dem Umfeld von Grafitlagerstätten in der Bunten Serie für ergänzende Auswertung geochemischer Daten im Hinblick auf geochemische Prospektionsparameter beprobt. Auf Basis ergänzender Beprobungen erfolgte eine Evaluierung lagerstättenindikativer geochemischer Explorationsparameter von grafitführenden Gesteinen, Bachsedimenten und Böden im Umfeld von Grafitmineralisationen.

Die im Zuge dieses Projektes durchgeführten Tätigkeiten wurden als fachabteilungsübergreifende Zusammenarbeit der Fachabteilungen FA Geophysik, FA Geochemie und FA Rohstoffgeologie reibungslos und jeweils termingerecht durchgeführt. Als externer Kooperationspartner war die Arbeitsgruppe Geophysik (Leiter: Prof. Dr. A. Flores) am Department of Geodesy and Geoinformation der TU Wien im vorliegenden Projekt eingebunden. Der Arbeitsschwerpunkt dieser Zusammenarbeit umfasste die Bereiche IP/SIP (Induzierte Polarisierung im Zeit bzw. Frequenzbereich) Messungen, deren Auswertung und Interpretation. Diese Kooperation hat sich durch die methodische Ergänzung und auf Grund der hohen fachlichen Expertise der KollegenInnen äußerst zielführend entwickelt. So wurden im Projekt mehrere gemeinsame Messkampagnen durchgeführt. Es fanden regelmäßig Projektbesprechungen, sowohl GBA intern, als auch mit dem externen Projektpartner statt. Die Kooperation kann zusammenfassend als sehr gut bezeichnet werden.

1.2 Erreichte Projektziele (Zusammenfassung)

Die angestrebten und im gegenständlichen Projekt umgesetzten Ziele waren einerseits die **Untersuchung von vermuteten Restpotenzialen** in den als sicherungswürdig eingestuften **Grafitlagerstätten** der Bunten Serie mittels moderner geophysikalischer Explorationsmethoden (elektr. Widerstand, Eigenpotenzial, Induzierte Polarisationsmessungen im Zeit- und Frequenzbereich), die durch Auswertungen geochemischer Daten aus dem Umfeld der Grafitlagerstätten im Hinblick auf geochemische Prospektionsparameter ergänzt wurden. Andererseits konnten, wie geplant, eine erste grobe Abschätzung der vorhandenen Restpotenziale der ausgewählten Grafitlagerstätten und eine entsprechende Bewertung, der im Projekt eingesetzten Methoden durchgeführt werden.

Ziel der **geophysikalischen Untersuchungen** war eine grobe laterale Abgrenzung von ausgewählten relevanten Lagerstättenbereichen mittels Messung des Eigenpotentials (SP/Self Potential). So konnte durch den Einsatz eines neuen SP-Messgerätes und der gleichzeitigen GPS Aufnahme eine rasche flächenhafte Aufnahme im Gelände durchgeführt und damit eine Weiterentwicklung im Sinne einer deutlichen Optimierung der Messmethodik erreicht werden. Des Weiteren wurden, aufbauend auf den Ergebnissen der SP Messungen, weiterführende Untersuchungen mittels Gleichstromgeoelektrik (elektr. Widerstand und IP) durchgeführt und damit erste Abschätzungen zur groben, lateralen (und zum Teil vertikalen) Abgrenzung relevanter Bereiche der Grafitvorkommen getroffen werden. Begleitend zu den geophysikalischen Feldmessungen wurden Probenahmen für **geochemische Analysen** in Abhängigkeit von Ergebnissen geophysikalischer Messprofile im Bereich oberflächlich indizierter Ausbisse z.B. von Grafitlinsen SE von Wollmersdorf (Messgebiet Zettlitz) bzw. im Bereich eines geoelektrischen Profils in Amstall durchgeführt. Durch integrative Auswertung geochemischer Daten aus dem Verbreitungsgebiet der Grafitvorkommen im Drosendorf-Deckensystem (Bunter Serie) konnten einige charakteristischen Indikatorelemente für die bodengeochemische Grafit-Prospektion abgeleitet werden, die anhand ausgewählter Messprofile erfolgreich getestet werden konnten.

Durch den Einsatz (oben erwähnter) verschiedener geophysikalischer Methoden und unter Bezugnahme ergänzender geochemischer Untersuchungen mit Bor als Indikatorelement für Grafitvorkommen, konnten **erste grobe Abschätzungen des relevanten (Rest)Lagerstättenpotenzials** an ausgewählten Grafitbereichen an beiden ausgewählten Standorten durchgeführt werden.

Für die ausgewählten Grafitlagerstätten Weinberg/Amstall- und Zettlitz konnte damit eine grundsätzliche entsprechende **generalisierte Explorationsstrategie** entwickelt werden.

1.3 Abweichungen von der Projektplanung (mit Begründung)

Die für das Projektjahr 1 geplanten Milestones konnten mit geringfügigen Abweichungen zu den im Zeitplan (Projektantrag) angeführten Arbeitsschritten erreicht werden. Die Abweichungen waren organisationsbedingt und stellten durch die zeitliche Adaptierung bestimmter Tätigkeiten zwischen erstem und zweitem Projektjahr für die Erreichung der geplanten Zielsetzung für die gesamte Laufzeit kein Problem dar.

Durch einen längeren, unfallbedingten Krankenstand des Projektleiters Geophysik an der GBA gegen Ende der vorgesehenen Projektlaufzeit (Projektjahr 2) wurde auf Grund der noch ausstehenden abschließenden geophysikalischen Messkampagnen und der damit fehlenden Synthese der Ergebnisse um eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes bis August 2020 angesucht, die auch genehmigt wurde. Innerhalb dieser zeitlichen Verschiebung konnten auch die anfänglichen Probleme bei der geochemischen Analytik (Boranalyse) gelöst werden. Mit der ab März 2020 einsetzenden COVID-19 Krise konnten die letzten ergänzenden geophysikalischen Messkampagnen erst im Sommer 2020 durchgeführt werden, womit sich die Abgabe des Endberichtes auf Oktober 2020 verschoben hat.

2. Einleitung

Die verstärkte Suche nach kritischen Mineralrohstoffen hat in den letzten 10 Jahren auch zu einer Weiterentwicklung innovativer Prospektions- und Explorationstechnologien bei vielen dieser Rohstoffe geführt. Der mineralische Rohstoff Grafit wird aufgrund seiner hohen ökonomischen Bedeutung und des vorhandenen Versorgungsrisikos auch in der aktualisierten Studie der Europäischen Kommission (EUROPEAN COMMISSION, 2014) als kritischer Rohstoff eingestuft. Mit der zunehmenden Nachfrage nach hochwertigem Naturgrafit (z. B. als Anodenmaterial in Lithium-Ionen-Akkus) und dem Preispeak in den Jahren 2010-2012 kam es in den letzten Jahren weltweit zu einer enormen Zunahme von Grafit-Prospektions-/Explorationsprojekten.

Im Gegensatz zu den meisten anderen kritischen Rohstoffen bestehen in Österreich für Grafit aufgrund der vorhandenen geologischen Rahmenbedingungen und des rohstoffwirtschaftlichen Kenntnisstandes noch durchaus abbauwürdige Rohstoffpotenziale. Aus diesem Grund sind auch einige dieser Grafitlagerstätten im Österreichischen Rohstoffplan als sicherungswürdig bewertet worden (WEBER, 2012). Die große rohstoffwirtschaftliche Bedeutung der Grafitgewinnung in Österreich geht auch aus den historischen Produktionsstatistiken hervor. In den frühen 1960er Jahren erreichte die Grafitproduktion in Österreich mit ca. 102.000 t/a in 8 Betriebsstätten ihre Maximalförderung, wobei die überwiegende Produktion auf die Grafitlagerstätten in der Bunten Serie in Niederösterreich fielen. Damit zählte Österreich für mehrere Jahre weltweit zu den Spitzenproduzenten bei Grafit. Aktuell besteht nur mehr ein Abbaubetrieb (Kaisersberg) mit einer bescheidenen Jahresförderung von 150 t für Sonderprodukte.

Fokus des geplanten explorativen Projektvorhabens waren ausgewählte bekannte Grafitvorkommen im Bereich der Bunten Serie in Niederösterreich, bei denen noch ein geologisches Lagerstättenpotenzial vermutet wird.

Die Grafit-Mineralisationen in der Bunten Serie treten in Wechselfolgen von Marmoren, Schiefergneisen, Quarziten und Amphiboliten des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie) in Form von schicht-konkordant im Nebengestein eingelagerten Lagerlinsen auf, die durch tektonische Überprägung zu Linsen unterschiedlicher Dimension geformt wurden. Ausdehnung und Mächtigkeiten der Grafitkörper wechseln im kleinregionalen Maßstab zum Teil sehr stark. Gewöhnlich beträgt die Länge der spindelförmigen Linsen zwischen 20 und 60 Meter, wobei die Mächtigkeiten von wenigen Dezimetern bis 25 Meter reichen können (POLEGEG et al., 1987; WEBER, 1987).

Als Zielobjekte der geplanten Untersuchungen wurden die beiden Lagerstättenbereiche Weinberg/Amstall und Zettlitz ausgewählt, die beide im Österreichischen Rohstoffplan als sicherungswürdig eingestuft sind (die Lage der beiden Untersuchungsgebiete zeigt Abb. 1).

In der Grafitlagerstätte Weinberg bei Amstall (Weinberg I - V) wurden überwiegend tagbaumäßig insgesamt 8 Grafitlinsen aufgeschlossen und oberflächennah abgebaut. Aus den bekannten Vorratsangaben und den Abbaudaten resultiert ein Restvorrat von 35.000 t, wobei eine (äußerst wahrscheinliche) weitere Erstreckung der Lagerlinsen gegen die Tiefe dabei nicht berücksichtigt ist.

Die Grafitlagerstätte Zettlitz mit einer Gesamtförderung bis 1967 von 350.000 t ist eine der größten Lagerstätten in der Bunten Serie. Die Mächtigkeit des Lagerstättenkörpers beträgt bis zu 15 m (POLEGEG et al., 1987). Im Streichen sind die Grafit-schiefer im heutigen Tagbaubereich auf ca. 200 m aufgeföhren. Das im bestehenden Bergbaubereich und in Restpfeilern ab der ersten Sohle noch vorhandene Gesamtpotenzial wird auf über 100.000 t (MÜLLER, 2016) geschätzt. Der mit ca. 40° gegen W bzw. SW einfallende, unterhalb der ersten Abbausohle liegende Lagerstättenkörper ist dabei noch nicht berücksichtigt.

Die extrem turmalinreichen, grafitführenden Gesteine der Bunten Serie liefern mit den höheren Bor-Gehalten einen durchaus guten Prospektionsindikator, der anhand von verschiedenen Probenmedien überprüft werden soll. Eine wesentliche Fragestellung betrifft dabei die Verlagerung von Bor im Zuge von Verwitterungsprozessen in den Böden über Grafitkörpern.

Seit den in den 80-er Jahren durchgeführten geophysikalischen Explorations- und Prospektionstätigkeiten mittels Aero- und Bodengeophysik im Bereich der Böhmischen Masse (ALBER, 1987; HEINZ et al. 1984) wurden hier keine weiteren Untersuchungen in dieser Richtung durchgeführt. Die damals nach dem Stand der Technik erfolgten bodengeophysikalischen Messungen waren noch klassische 4 Punktanordnungen. Angestoßen durch die ab den 2000er Jahren rasante Entwicklung von Multielektrodenapparaturen, wurde an der GBA ein eigenes Messsystem (GEOMON4D) entwickelt, das neben raschen Messungen mit einer sehr hohen Messpunktdichte, auch die volle Kontrolle der Datenqualität erlaubt. Mit dem zusätzlichen Einsatz moderner SIP-Messsysteme war das Ziel durch eine deutlich bessere Auflösungs-genauigkeit die interpretative Aussagekraft der Ergebnisse entsprechend zu erhöhen und somit eine dem modernen Stand der Technik entsprechende Bewertung des Einsatzes dieser geophysikalischen Methoden abgeben zu können.

Die genauere Lage der beiden Untersuchungsgebiete zeigt Abb. 2



Abb. 1: Lage der beiden Untersuchungsgebiete Weinberg-Amstall und Zettlitz



Abb. 2: Lage Detail der beiden Untersuchungsgebiete Weinberg-Amstall und Zettlitz

3. Geophysikalische Untersuchungen/Messgebiet Weinberg-Amstall

3.1 Geologie des Grafitbergbaus Weinberg-Amstall

Die oberflächennahen Grafit-Lagerlinsen des Weinbergs liegen in einer Abfolge aus Marmoren, Paragneisen und Quarziten und zeigen hier eine auffallende Bindung an Marmorzüge (Abb. 3 zeigt die geologische Karte 1:50.000 im Bereich des Untersuchungsgebietes). Auf Grund der Entstehung und der tektonischen Überprägung handelt es sich dabei um lagerförmige Mineralisationen, die durch tektonische Überprägung zu axial eingeregelt, spindelförmigen Linsen unterschiedlicher Dimension geformt wurden. Die Grafitlinsen streichen meist NW-SE, seltener SW-NE und fallen mittelsteil bis steil gegen NE ein, teilweise auch gegen SE. Der gesamte Schichtstoß wird dabei um E-W-streichende Achsen, steil ostwärts abtauchende Faltenachsen verformt. Die Streichenderstreckung der Lagerlinsen beträgt im Bereich Weinberg 50-150 Meter (PICHLHÖFER, 1985). Die Mächtigkeit der Grafitlinsen ist durch die tektonische Verformung starken Schwankungen unterworfen und variiert von wenigen Metern bis maximal 30 m. Das Nebengestein wird von C-reichen Quarziten bzw. Paragneisen sowie Marmoren gebildet. Die Marmore treten dabei vorwiegend im Hangenden auf, können aber auch geringmächtige Bänder im Liegenden der Grafitlinsen bilden.

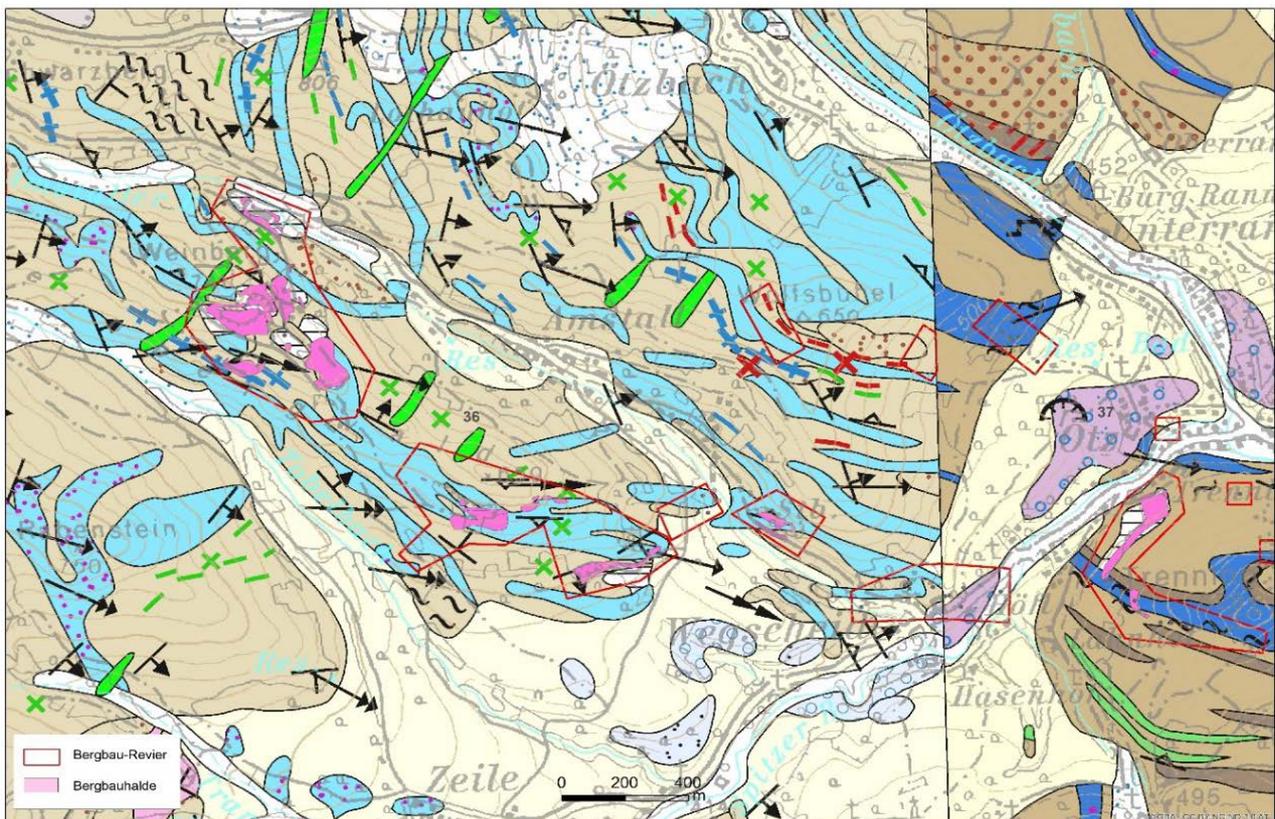


Abb. 3: Grafitbergbaue im Raum Weinberg-Amstall-Wegscheid (rote Polygone); Ausschnitt aus der geologischen Karte GK 36 -Blatt Ottenschlag (FUCHS, G. & FUCHS, W., 1986) und Bergbau-/Haldenkataster GBA.

Der Grafit kommt im Wesentlichen als tektonische Grafitbrekzie bestehend aus Grafit und einer Quarzfeldspat-Matrix vor. Grafit tritt dabei in enger Verwachsung mit Diopsid, Rutil, Titanit, Turmalin und Korund

auf. ZIRKL (1962) vermutet eine gleichzeitige Entstehung dieser Mineralphasen in den bitumenhaltigen Ausgangsgesteinen mit einer möglicherweise kontaktmetamorphen Überprägung. Charakteristisch für den Lagerstättenraum Weinberg ist eine hohe Pyritführung, insbesondere im Randbereich der Lagerstätte. Als weitere Erzphasen konnten Pentlandit, Sphalerit, Chromit und Pyrrhotin beobachtet werden. Der oberflächennahe Pyritzerfall in der Verwitterungszone führt schließlich zur Entstehung von Tonmineralien, Limonit, Opal, Jarosit und Natrojarosit

Die spindelförmigen Grafitkörper zeigen meist einen zonaren Aufbau der Grafitanreicherungen. Im Kern dominiert ein sehr dichter, feingeschichteter Grafit, während dieser nach außen in einen dichten, grobblättrigen Typ übergeht (PICHLHOFER, 1985). Der C-Gehalt der Grafite in den Weinberger Revieren kann mit ca. 54 und 62% für Weichgrafite und ca. 67 - 72% für Hartgrafite angegeben werden.

Die Grafitlagerstätten des Weinbergs zählen zu den größten und ergiebigsten des gesamten Waldviertels. Die abgebauten Grafitkörper erstrecken sich über eine Länge von mehr als 1,6 km am Bergrücken zwischen dem Amstaller Bach im NE und dem Tobelbach im SW; W der Ortschaft Mühlendorf. Seit 1960 wurden in den beiden Grubenfeldern Weinberg und Weinbergwald Neu insgesamt 9 Grafitlager vorwiegend tagbaumäßig gewonnen, wobei im Hinblick auf Größe und Qualität das Vorkommen Weinberg IV (Grubenfeld Weinberg/Weinbergwald Neu) das bedeutendste aller Weinberger Vorkommen war.

Für das aktuelle Untersuchungsprogramm wurde ein Untersuchungsbereich ausgewählt, der vom Tagbau des Vorkommens IV über die in der Schlussphase im Grubenfeld Weinbergwald Neu abgebauten Abbaubereiche Vorkommen VI und VI C-West bis hin zu einer nicht abgebauten Grafitlinse (Vorkommen VIII) nördlich des Tagbaus des Vorkommens VII reicht. Dieser langgezogene Untersuchungsbereich wurde deshalb ausgewählt, weil sich dort neben zwei rekultivierten Tagbauen auch zwei schmale, durch Schurftätigkeiten nachgewiesene, noch unverritzte Grafitlinsen befinden.

Die nachfolgende Zusammenstellung lagerstättenspezifischer Parameter bezieht sich ausschließlich auf diese letzten Abbaubereiche im Gebiet Weinberg/Weinbergwald Neu. Das Vorkommen IV wurde in einem großen Tagbau hereingewonnen. Bei diesem Vorkommen handelt es sich um einen liegenden Faltsattel, in dessen Schenkeln sich zwei Grafitlinsen tektonisch bedingt zu einem bis zu 20 m mächtigen Grafitstock vereinen (PICHLHÖFER, 1985). Die Grafitlinse fällt dabei mit 30-35° gegen E bis ESE ein. Im Gegensatz zu den anderen Vorkommen im Umfeld zeichnet sich der Grafit des Vorkommens IV durch eine geringe Pyritführung aus. Gegen SE schließt eine über 100 m lange, durch Schurfröschen nachgewiesene, geringmächtige Grafitlinse an, die aber nicht abgebaut wurde.

Die weiter südöstlich anschließenden Vorkommen VI und VI-C West wurden in mehreren Etappen mit 3 Teilabbauen A, B und C in den Jahren 1986-87 (A und B), 1989 (Restpfeiler A Nord und B Südost) und 1990-92 (C) tagbaumäßig ausgebaut (Abb. 4). Die letzten Abbautätigkeiten vor der endgültigen Schließung erfolgte hier Anfang 2000 im Bereich des Grafitlagers VI C-West. Insgesamt konnte in diesem Abbaubereich eine Gesamtmenge von rund 79.500 t Grob- und Feingrafit gefördert werden (HOFBAUER, 2001). Das rund 250 m südöstlich, bereits außerhalb des aktuellen Untersuchungsgebiets gelegene Vorkommen VII wurde in den Jahren 1966-1967 bzw. 1996-98 aufgeschlossen, wobei hier zwei getrennte Grafitlinsen unterschiedlicher Dimension tagbaumäßig abgebaut wurden. Diese zwei axial mit rund 30° gegen E bis SE einfallenden Grafitspindeln mit einer Länge von 100 bzw. 40 m sowie einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 8 m wurden in diesem Tagbau bis zu einer Tiefe von 18 bis 35 m unter GOK abgebaut, wobei stellenweise stärkere Vertaubungen (Paragneise) eingeschuppt waren. Die Gesamtfördermenge in diesem letzten Grafitabbau betrug rund 44 .000 t. Nach dem Abbau wurde der entstandene Tagbaueinschnitt mit dem im ‚Vorkommen VI‘ gelagerten Abraumaterial muldenförmig verfüllt und die Sohle planiert. Eine rund 270 m östlich des Vorkommens VI durch 5 Schurfröschen erfasste, NE-SW streichende Grafitlinse (Vorkommen VIII) ist auf einer

Länge von 100 m und einer Mächtigkeit von 1 bis 5 m aufgeschlossen (Potenzial 30.000 t). Dieses Vorkommen wurde vor der Betriebsschließung aber nicht mehr abgebaut.

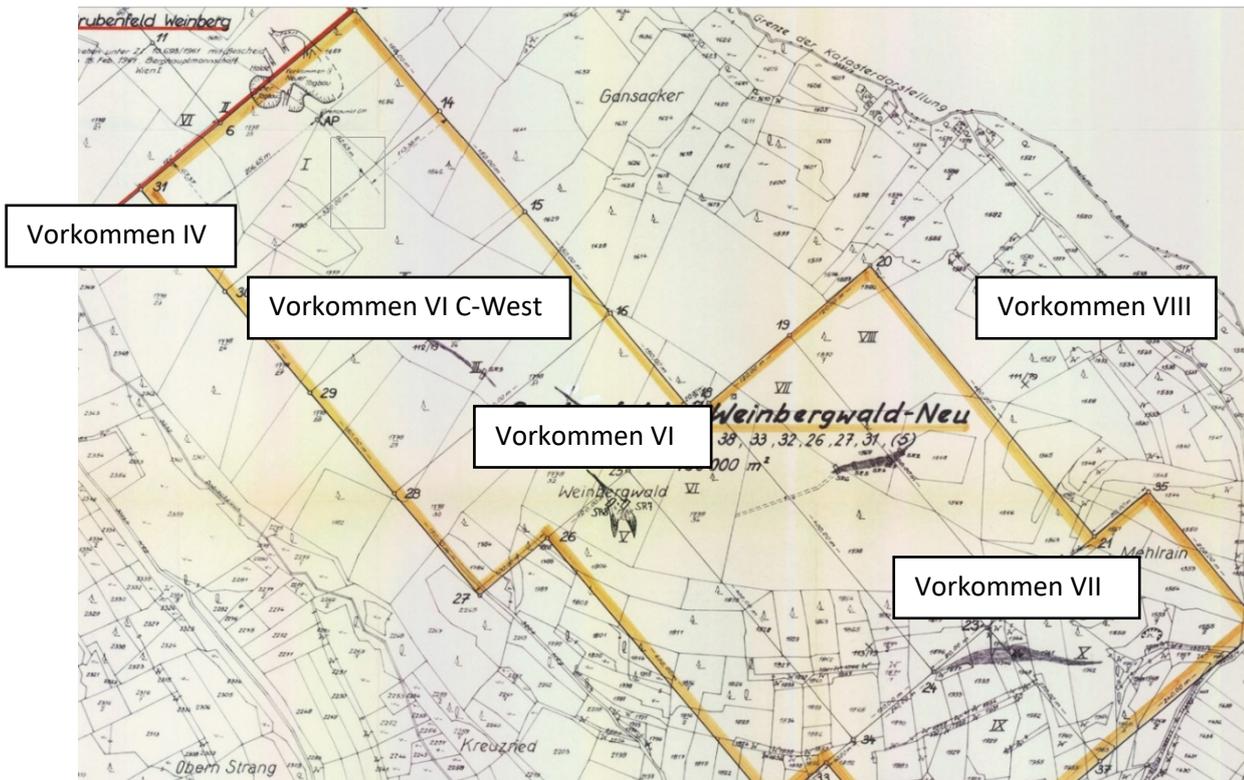


Abb. 4: Lagerungskarte der Gravitvorkommen und Abbaue im Grubenfeld ‚Weinbergwald-Neu‘ (Grubenmaße I bis X) (Lagerstättenarchiv Geol. B.-A.)

Aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen geht hervor, dass die oberflächennahen Lagerstättenteile der Weinberger Gravitvorkommen bis auf wenige Restpfeiler vollständig abgebaut wurden und damit im tagnahen Bereich nur noch wenige Rohstoffpotenziale verblieben. Die teilweise durch Bohrungen erkundete Raumlage der Gravitlinsen und der Verlauf der gravitthöffigen Bereiche über die Grubenfeldbereiche hinaus lassen aber eine weitere Erstreckung der Lagerlinsen gegen die Tiefe für äußerst wahrscheinlich erscheinen. Über die genaue Tiefenerstreckung der Gravitlinsen im Bereich der Lagerstättenreviere in Weinberg gibt es aber nur wenige überlieferte Informationen aus Kernbohrungen. PICHLHÖFER (1985) verweist in seinen montangeologischen Aufnahmen auf einige im Sohlenbereich des Tagbaus ‚Vorkommen IV‘ abgeteufte Kernbohrungen (Abb. 5). Demnach keilen die Gravitlinsen in dem abgebauten Tagbau-Bereich in einer Tiefe von 15-35 m unter der Tagbausohle aus. Unter Berücksichtigung einer Tiefersetzung der bestehenden Tagbausohle um 10 m kommt PICHLHÖFER (1985) auf eine gewinnbare Gravitmenge im Tagbau Vorkommen IV von mindestens 17.000 t. Eine weitere Vertiefung der Tagbausohle in diesem Bereich war aber abbautechnisch nicht mehr möglich. Bei der zu erwartenden Kostenstruktur scheidet jedoch auch eine Gewinnung dieser Tiefenfortsetzung im Untertagebau aus wirtschaftlichen Gründen aus. Ein zusätzlicher Grund für die damals geringe wirtschaftliche Relevanz der tiefer gelegenen Teile der Gravitlinsen im Lagerstättenbereich Weinberg war die mangelnde Eignung für den damaligen Hauptverwendungszweck als saure Zuschlagstoffe für die Hochofenindustrie. Die unverwitterten, tiefergelegenen Gravitpartien weisen nämlich eine intensive Pyritführung auf, während Pyrit in den oberflächennahen Bereichen bereits weitgehend in - für die Hauptanwendung weniger störende - Eisenhydroxid-Phasen umgewandelt ist. Eine aufbereitungstechnische Entfernung von Pyrit war zum damaligen Betriebszeitpunkt aber noch nicht möglich. Unter Berücksichtigung noch gewinnbarer Restvorräte im benachbarten Grubenfeld Weinberg

sowie der dort ebenfalls zu erwartenden weiteren Tiefenerstreckung der Grafitlinsen wurden die Vorkommen im Bereich des Weinbergs im Rahmen des Österreichischen Rohstoffplans als sicherungswürdig ausgeschieden (WEBER et al. 2012).

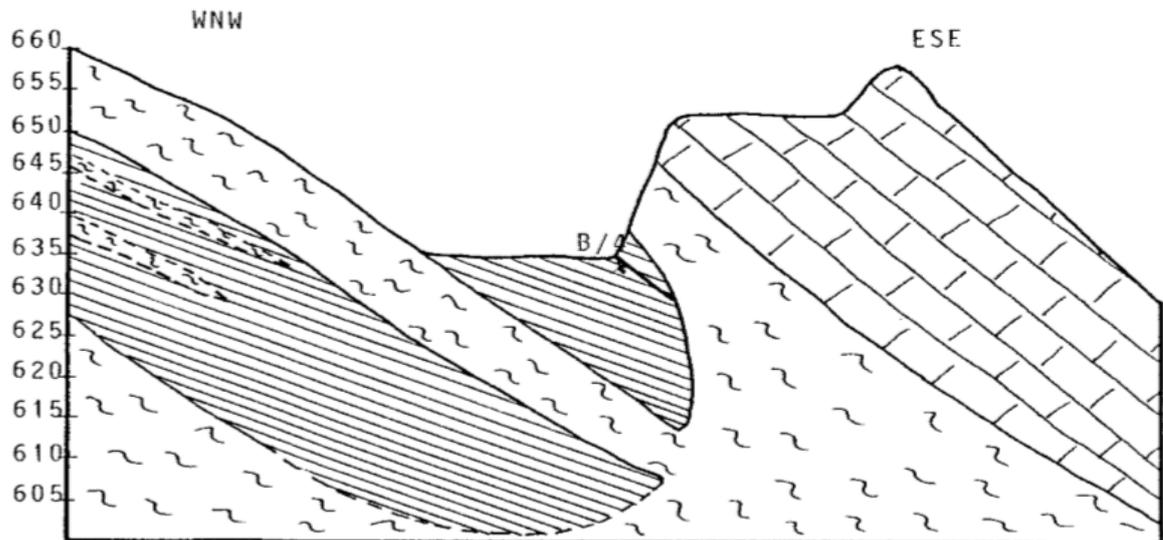


Abb. 5: WNW-ESE-Profil durch den Tagbau ‚Vorkommen IV‘ mit dem weiteren Tiefenverlauf der erkundeten Grafitlinsen unter der Tagbausoehle (aus: PICHLHÖFER, 1985)

Die Abb. 6 und 7 zeigen Situationsfotos aus dem Bergbaubereich. Abb. 6 die Abbauwand im Bereich des aufgelassenen Tagbaus und das Vorkommen VI C-West‘ mit Blickrichtung NE und Abb. 7 den NE-Teil des Tagbaus ‚Vorkommens IV‘ während der abschließenden Betriebsphase um 1984 (aus PICHLHÖFER, 1985)



Abb. 6: Abbauwand im Bereich des aufgelassenen Tagbaus ‚Vorkommen VI C-West‘ mit Blickrichtung NE



Abb. 7: NE-Teil des Tagbaus ‚Vorkommens IV‘ während der abschließenden Betriebsphase um 1984 (aus PICHLHÖFER, 1985)

3.2 Ergebnisse Eigenpotenzial (SP)

Im Jahr 2018 wurden erste SP Testmessungen am nordwestlichen Rand des Untersuchungsgebietes (Bereich der Halde) durchgeführt. Im November 2018 und im Jahr 2019 folgten 3 umfangreiche Messkampagnen, die schlussendlich den ganzen Bergrücken des Weinberges mit unterschiedlicher Punktdichte überziehen. Eine eingehende Betrachtung der methodischen Entwicklung und Bewertung findet sich in Kapitel 6.1. (Kapitel Eigenpotenzial).

Die Abb. 8 zeigt die Lage des Bereichs der SP Messungen (oben) der ersten Messkampagne, die im Bereich eines auf der geologischen Karte ausgewiesenen Graphitkörpers durchgeführt wurden. In Abb. 9 (unten) ist eine Isolinienkarte des elektrischen (Eigen)Potenzials [mV] in diesem Bereich dargestellt. Deutlich zeichnet sich der grafitführende Bereich als negative Anomalie ab.

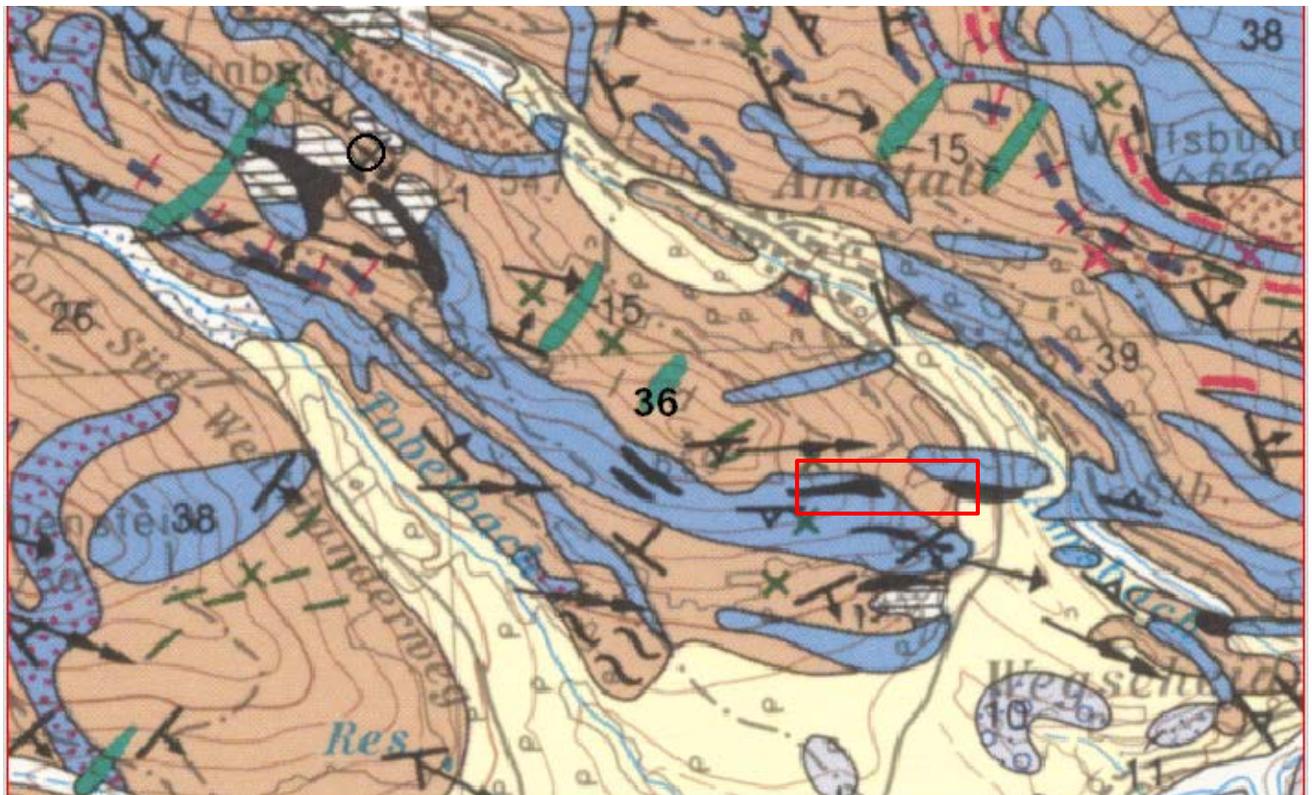


Abb. 8: Untersuchungsgebiet des Grafitabschnittes auf geolog. Karte (Fuchs, G., Fuchs, W., 1986)

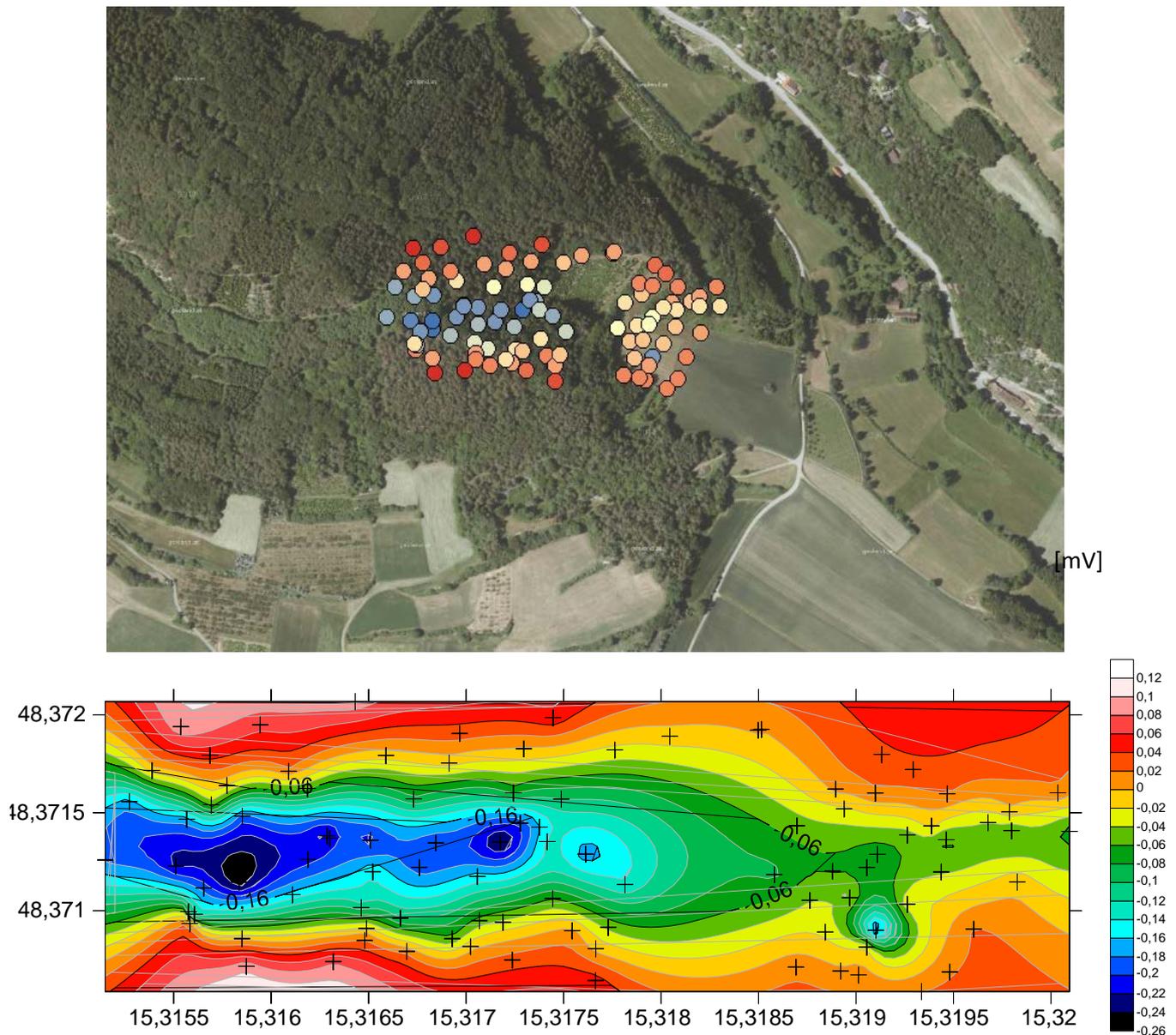


Abb. 9: Lage der Messpunkte SP (Messkampagne 1/2019) in Amstall (oben) (Google maps), Verteilung des elektrischen Potentials aus SP (unten)

Die Abbildungen 11, 12 zeigen die Lage der Messpunkte aller 3 Kampagnen auf dem Orthofoto (google maps) und der geolog. Karte (Fuchs, G., Fuchs, W., 1986). Grundsätzlich ist bei zeitlich unterschiedlichen Aufnahmen eine konstante Position der Referenzelektrode wichtig, um die Potentialdifferenz zu einem fixen Referenzpunkt zu erhalten. Im Fall der durchgeführten Messungen in Amstall mussten für die einzelnen SP Messkampagnen allerdings unterschiedliche Positionen für die Referenzelektrode gewählt werden. Daher sind die absoluten Werte der einzelnen Kampagnen untereinander nicht in ihren Absolutwerten vergleichbar. Außerdem beeinflussen vorhandene unterschiedliche Bodenverhältnisse der verschiedenen Messkampagne z.B. durch intensive Niederschläge das Eigenpotentialniveau. Dies ist bei der Betrachtung der Übersichtskarte der Isolinien der Eigenpotentialmessungen in Abb. 12 zu beachten. „Zur Erkennung und Eliminierung reliefbedingter Fließpotentiale sind Abhängigkeiten der Messwerte von der Messpunkthöhe zu untersuchen.“ (KNÖDEL, et. al, 2005). Die Höhenabhängigkeit der SP Daten der einzelnen Messkampagnen wurde entsprechend der in Abb. 10 dargestellten SP Messwerte in Abhängigkeit der Höhenlage dargestellt und nach der entsprechenden Trendlinie korrigiert.

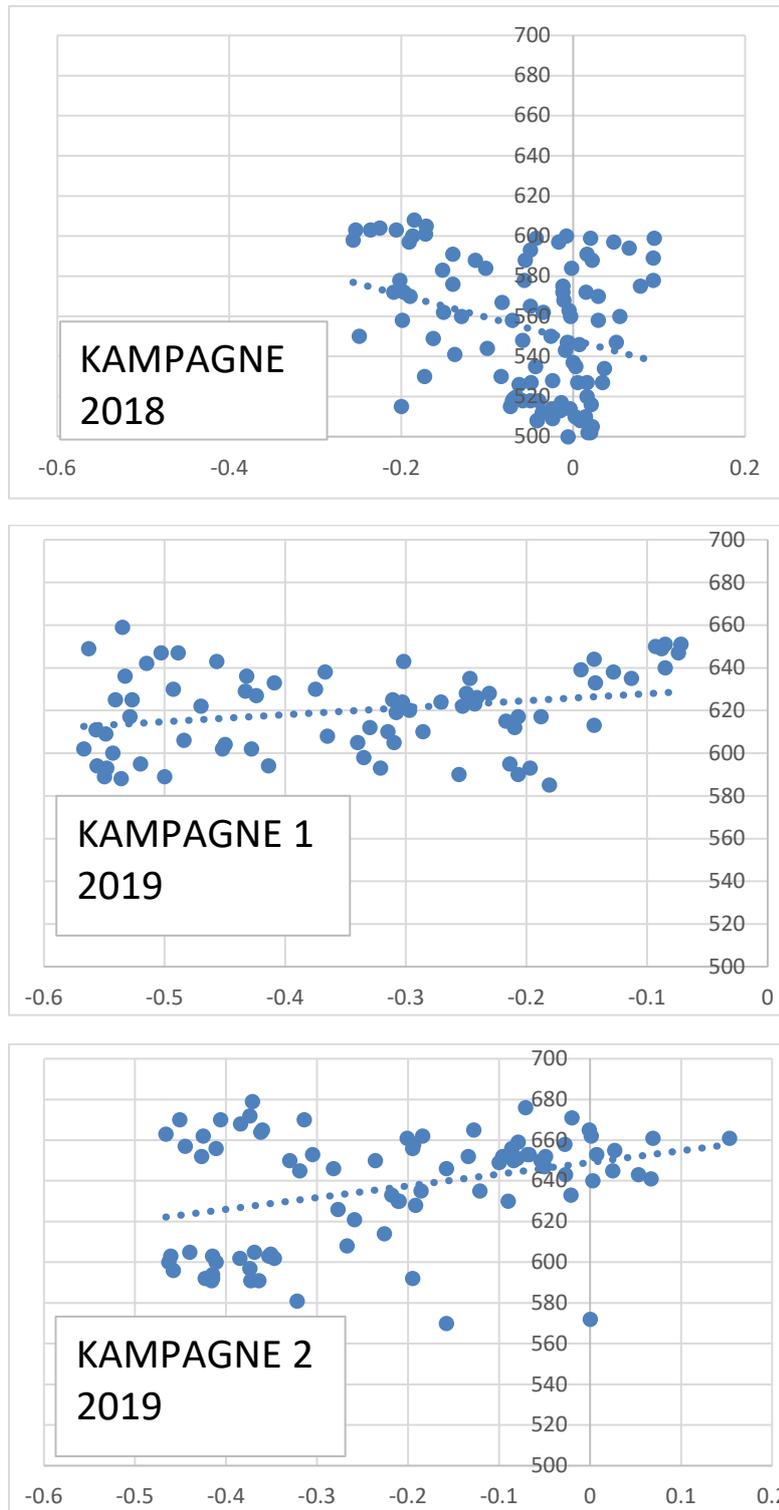


Abb. 10: Höhenabhängigkeit der einzelnen SP Messkampagnen mit Trendlinie

Abbildung 13 zeigt eine Isolinienkarte der Eigenpotenzialmesswerte, dabei wurden die höhenkorrigierten SP Werte als Isolinienkarten lagerichtig zueinander gelegt. Die Werte der 3 zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Kampagnen sind hier nicht auf gleichem Absolutniveau, trotzdem zeichnet sich der grafitführende Bereich sehr deutlich als negative SP Anomalie ab.

Das heißt, es lassen sich die grafitreichen Bereiche des Untergrundes als Anomalien mit deutlich negativen elektr. Spannungen ausmachen. Diese Abschnitte korrelieren sehr gut mit den in diesem Bereich kartierten Grafitlinsen. Die SP Messungen haben in diesem Fall einen wichtigen Anhaltspunkt für die Positionierung der geoelektrischen Messprofile geliefert (ebenfalls in den Abb. 11 und 12 eingezeichnet).

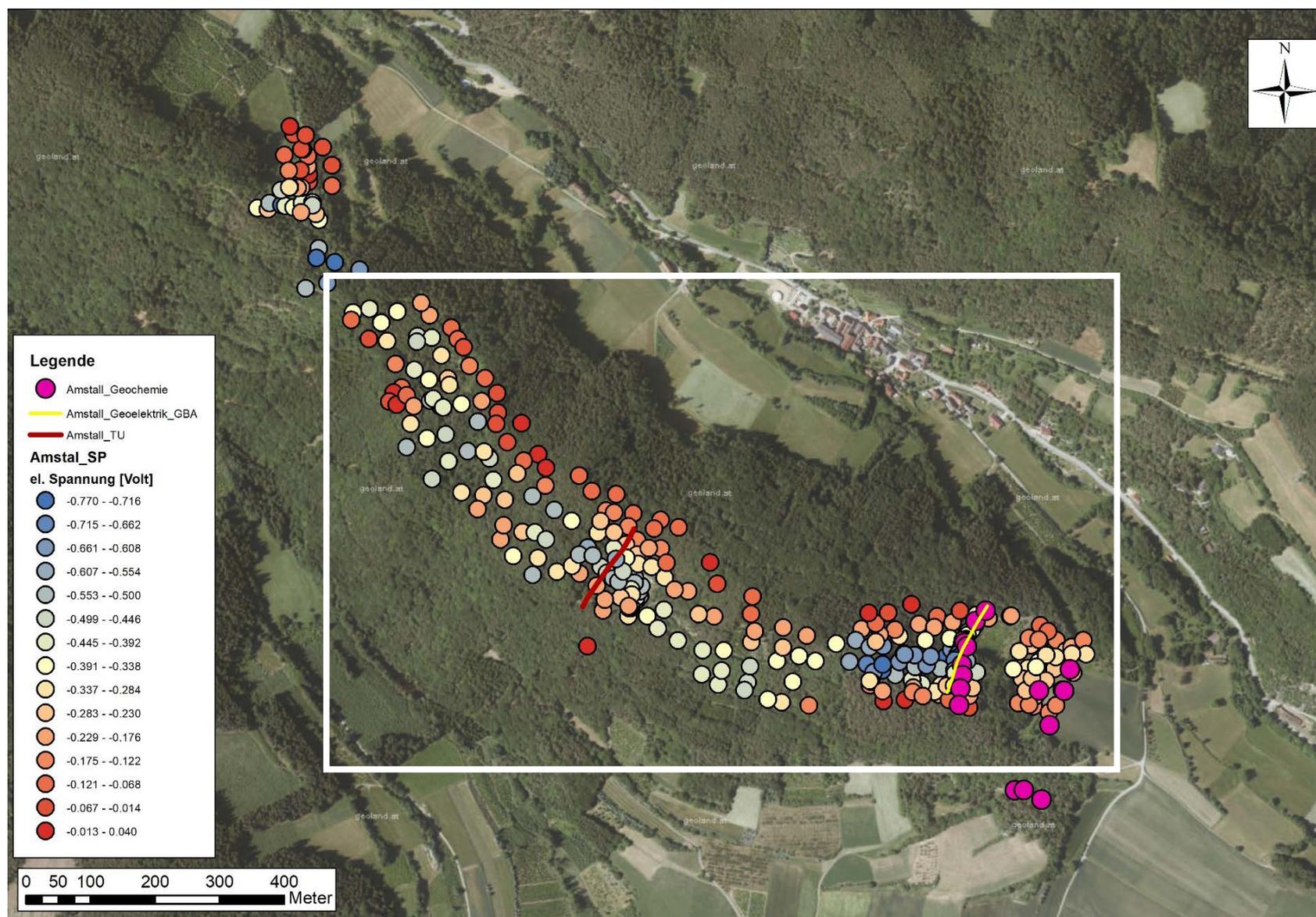


Abb. 11: Verteilung der Messpunkte SP im Messgebiet Amstall auf Orthofoto (google maps) — weißes Rechteck: Ergebnis als Isolinienplot in Abbildung 13)

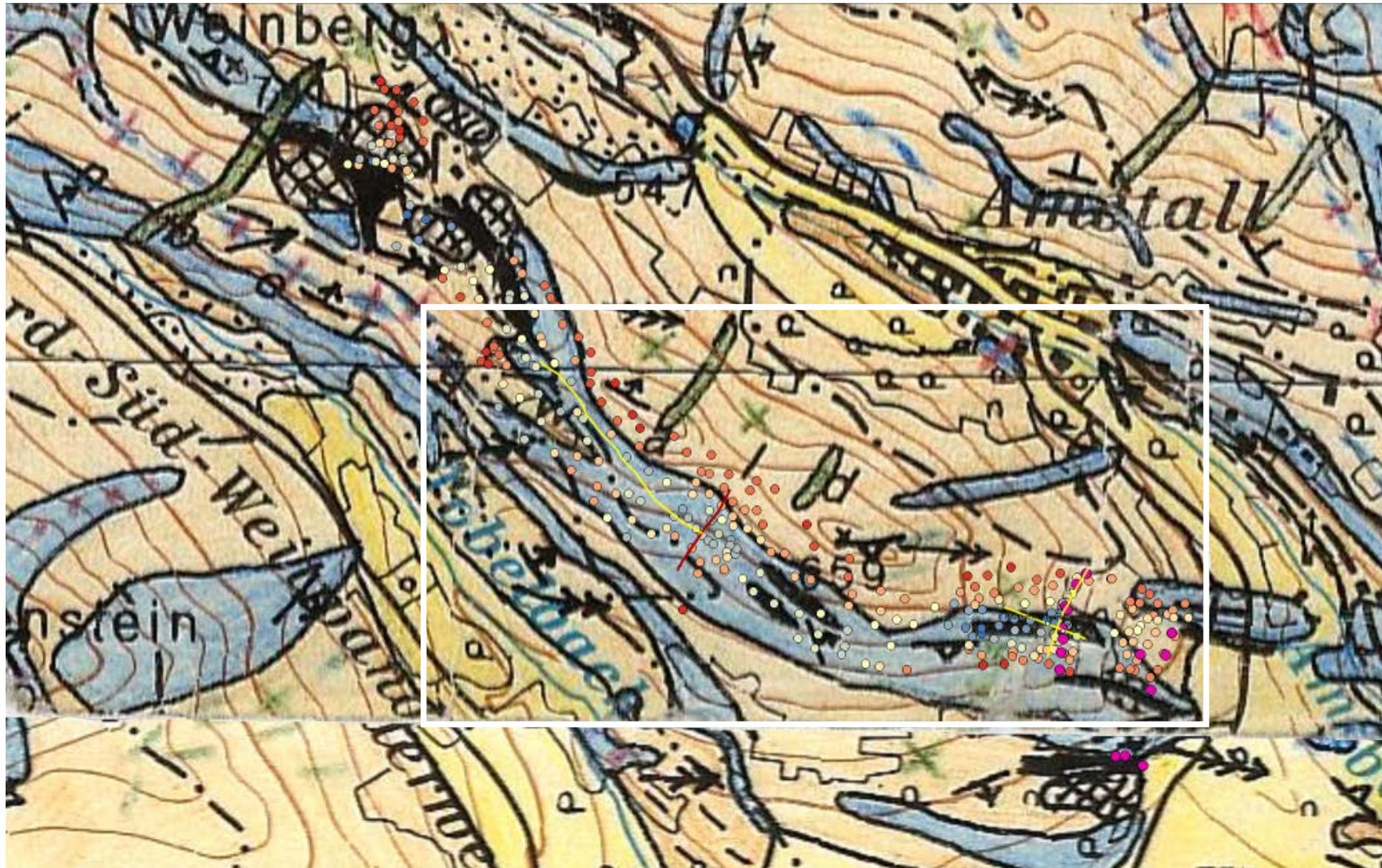


Abb. 12: Verteilung der Messpunkte SP im Messgebiet Amstall auf geologischer Karte (Fuchs, G., Fuchs, W., 1986) — weißes Rechteck: Ergebnis als Isolinienplot in Abbildung 13)

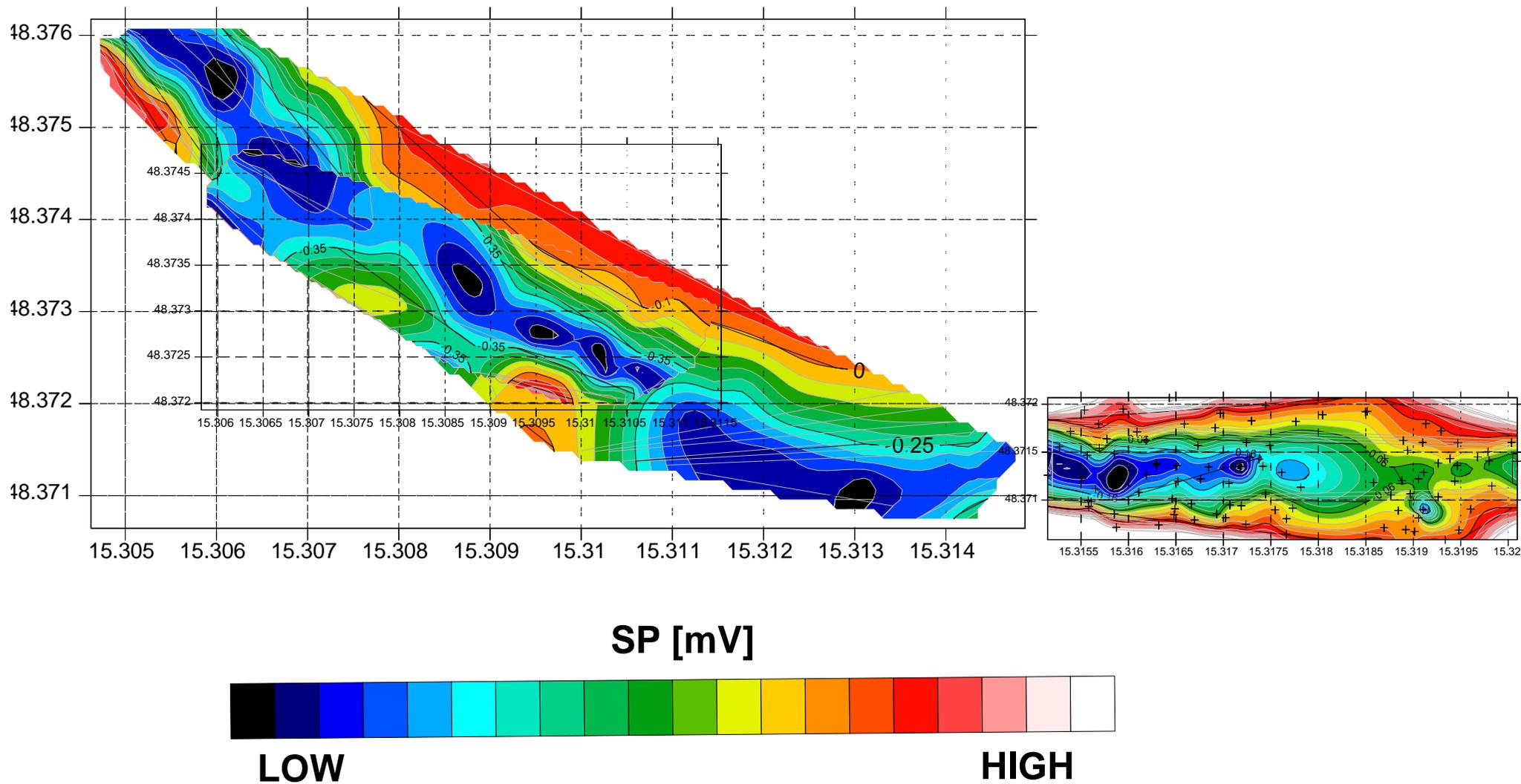


Abb. 13: Verteilung des Eigenpotenzials [mV] im Messgebiet Amstall

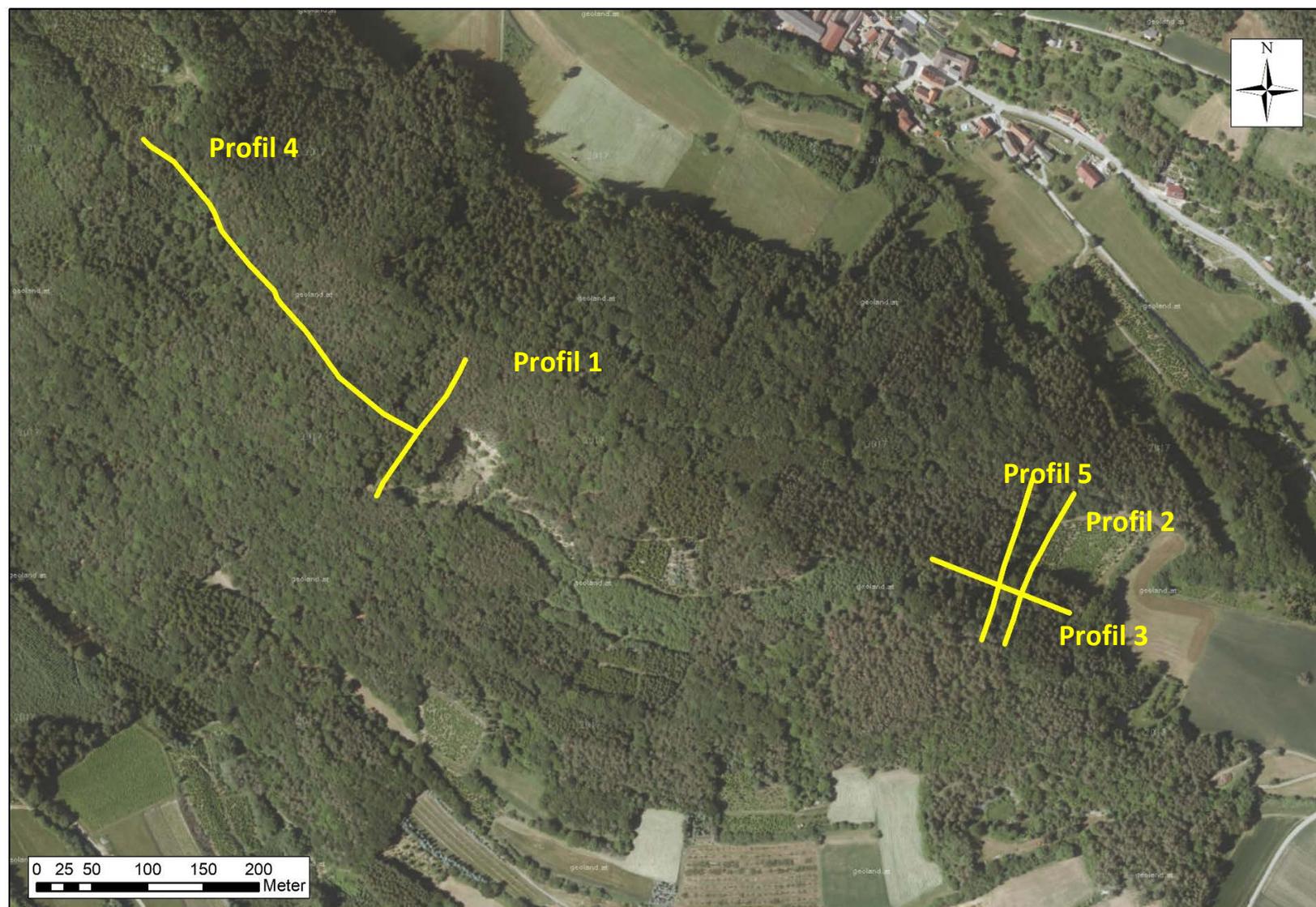


Abb. 14: Lageplan der geoelektrischen Profile in Amstall (auf ©google maps)

3.3 Ergebnisse Geoelektrik/Induzierte Polarisation (IP)

Zunächst wurde ein geoelektrisches Profil (Profil 1) im Nahbereich einer ehemaligen Abbaufront gelegt (in Abb. 14 sind die Positionen der geoelektrischen Profile eingezeichnet). Abb. 15 zeigt das Inversionsergebnis für das Profil P1, quer zum Streichen des NW-SE verlaufenden Grafitbereichs für den elektr. Widerstand (oben) und das Ergebnis der Polarisierbarkeit (unten). Sehr gut ist im elektr. Widerstand ab ca. Profilmeter 60 eine sehr niederohmige Anomalie unter einer ein paar Meter mächtigen Deckschicht zu erkennen. Zum Großteil korrespondiert dies mit dem Anomaliebereich der höchsten Polarisierbarkeiten. Eine Abschätzung der Mächtigkeit dieses grafitführenden Bereichs ist auf Grund der Auslagen/Mächtigkeitsgeometrie nicht möglich. Die an der gleichen Lage von der TU Wien durchgeführten geoelektrischen Messungen mittels FrequenzIP Messungen zeigten, v.a. für die tieferen Frequenzen (< 7.5 Hz) vergleichbare Ergebnisse.

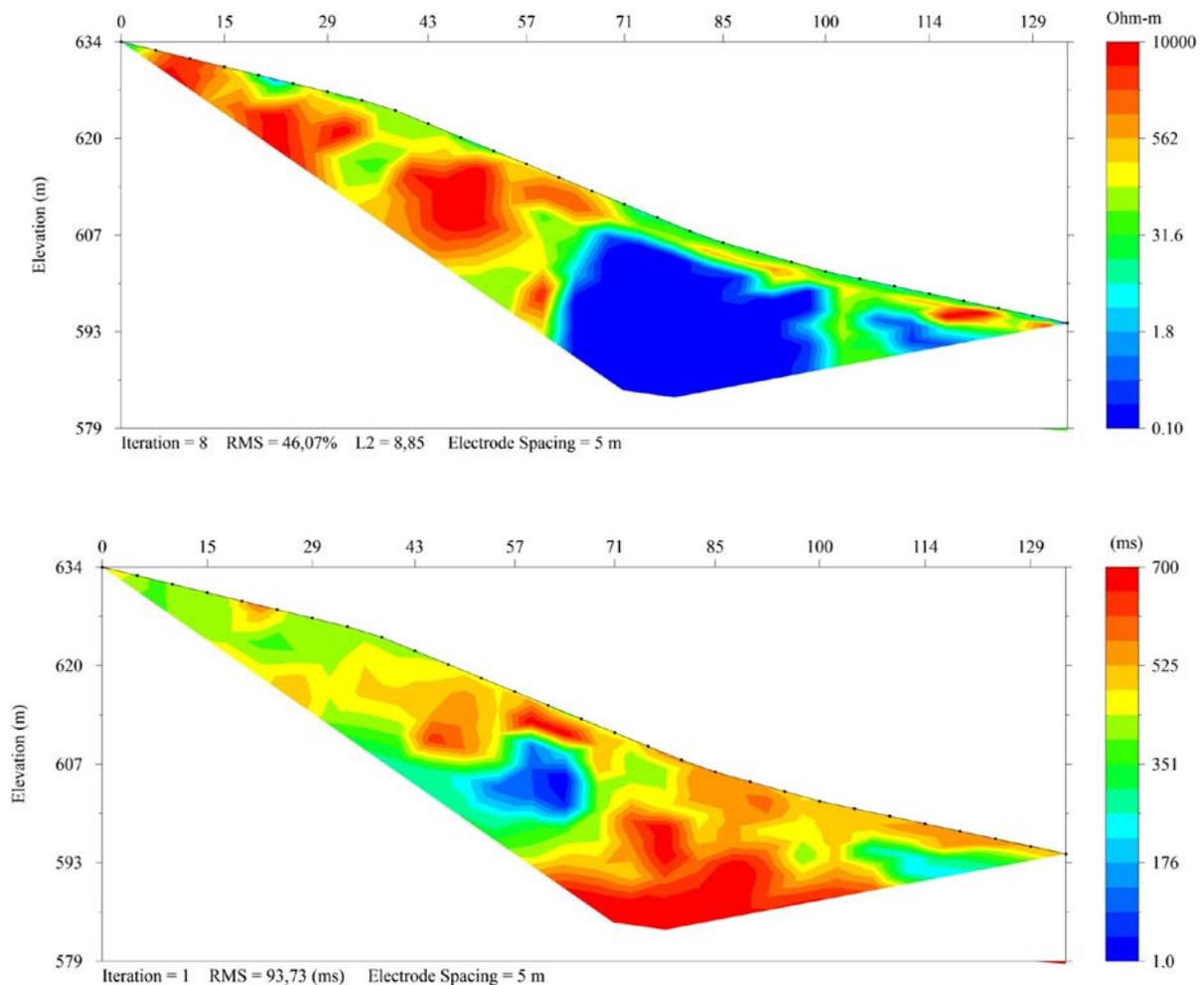


Abb. 15: Ergebnis des geoelektrischen Profils P1, elektr. Widerstand (oben), Polarisierbarkeit (unten)

Profil 2 wurde mit dem neu entwickelten Geomon4D-IP Messsystem der Geologischen Bundesanstalt gemessen. Ziel dieses Profils war es, die in den SP Daten deutlich zu erkennende stark negative Anomalie zu verifizieren, um somit einen Querschnitt der hier kartierten Grafitlinse zu erhalten. Das

Messprofil umfasste insgesamt 61 Elektroden mit einem Elektrodenabstand von 2.5 Metern. Neben der Standardmessung mit dem Geomon4D (elektr. Widerstand) und dem Geomon4D-IP (elektr. Widerstand und Polarisierbarkeit) wurden diverse Testmessungen mit dem neuen Messsystem (Geomon4D-IP) durchgeführt. Hierbei wurden sowohl verschiedene Elektrodenkonfigurationen als auch diverse Messeinstellungen (unterschiedliche Stromstärke, unterschiedlicher Spannungsbereich, unterschiedlicher zeitlicher Ablauf, etc.) getestet. In den Inversionsergebnissen in Abb. 16 bis Abb. 18 ist der Bereich der kartierten Grafitlinse (unabhängig vom eingesetzten Messsystem) als deutlich niederohmige Anomalie zwischen Profilmeter 30 und 65 zu erkennen.

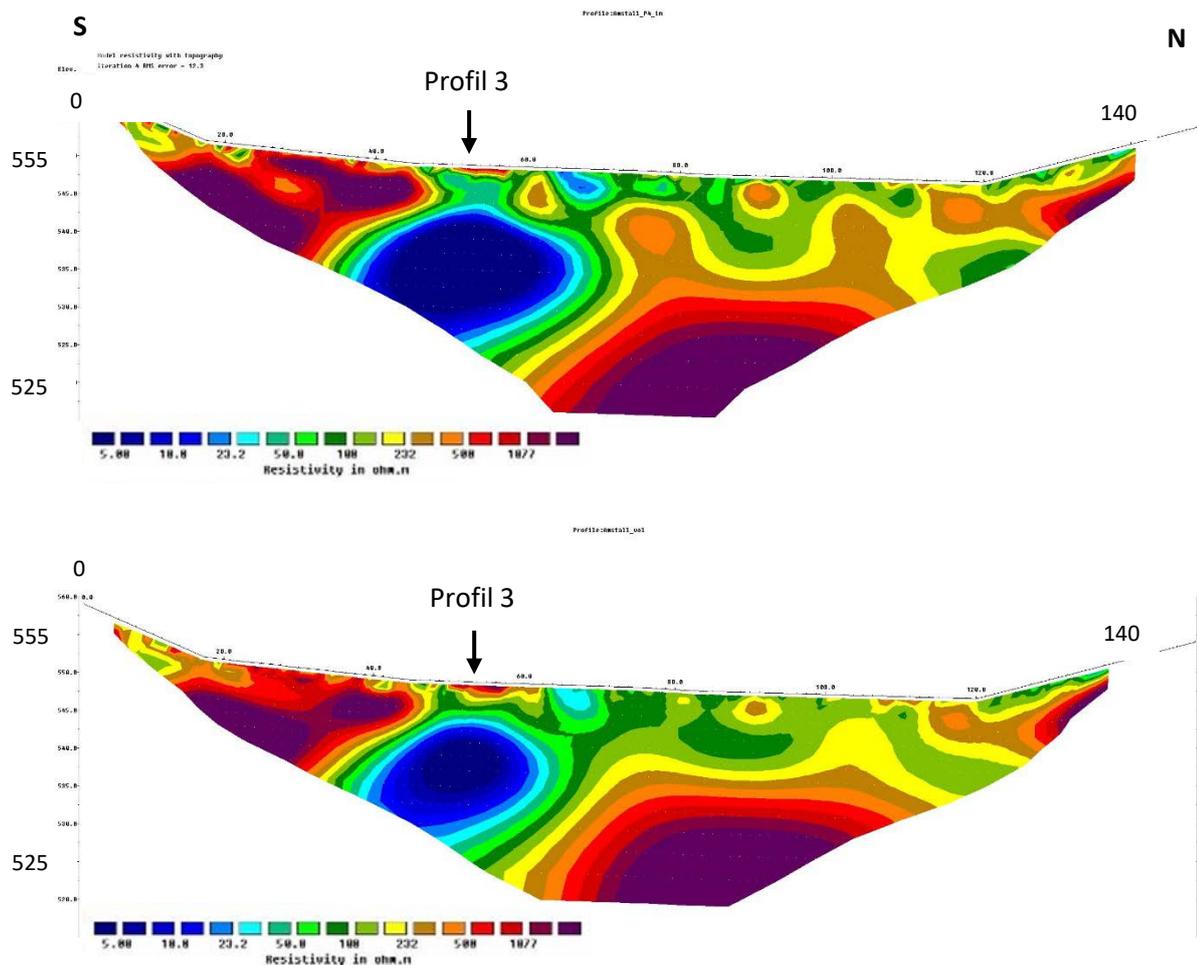


Abb. 16: Inversionsergebnis von Profil 2 in Amstall; oben: Geomon4D, unten: Geomon4D-IP.

Zudem wurde mit dem Geomon4D-IP eine IP Messung durchgeführt wobei die Dauer der Stromspeisung und die Aufzeichnung der Abklingkurve jeweils etwas mehr als 0.5 Sekunden betragen hat. Das entsprechende Ergebnis ist in Abb. 17 dargestellt. Diese Abbildung zeigt das Inversionsergebnis der integralen Aufladbarkeit über das gesamte gemessene Zeitfenster der Abklingkurve (0.5 s). Deutlich erhöhte Werte der Aufladbarkeit korrelieren bezüglich der horizontalen

Position entlang des Messprofils ganz klar mit dem niederohmigen Bereich der mit der vorhandenen Grafitlinse zu erklären ist. Der Maximalwert der Anomalie erscheint deutlich seichter als das Minimum des spez. elektr. Widerstandes. Der markante Teil der Anomalie der Aufladbarkeit reicht bis zu einer

Tiefe von ca. 10 m unter GOK. Wie die erhöhten Werte der Aufladbarkeit im südlichen Randbereich des Modells zu erklären sind ist noch unklar.

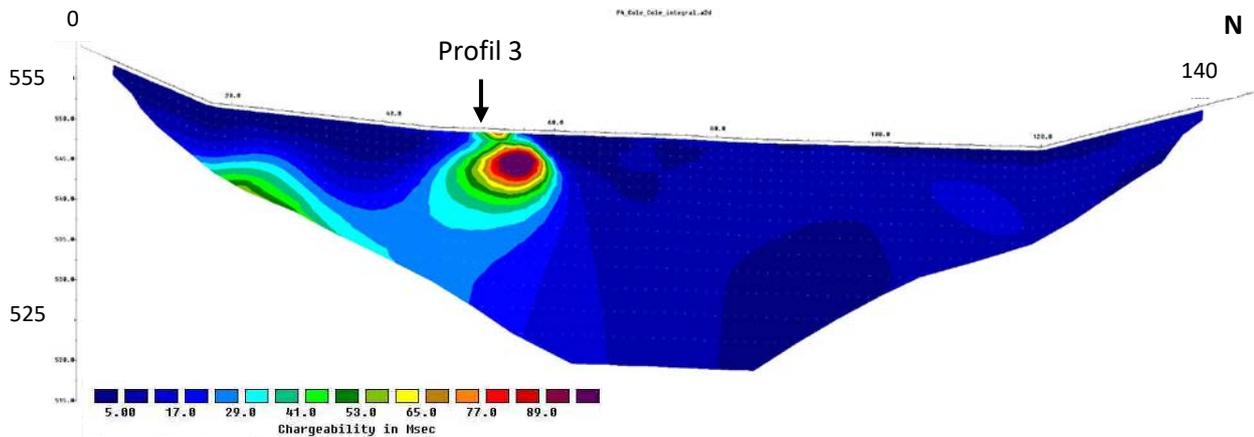
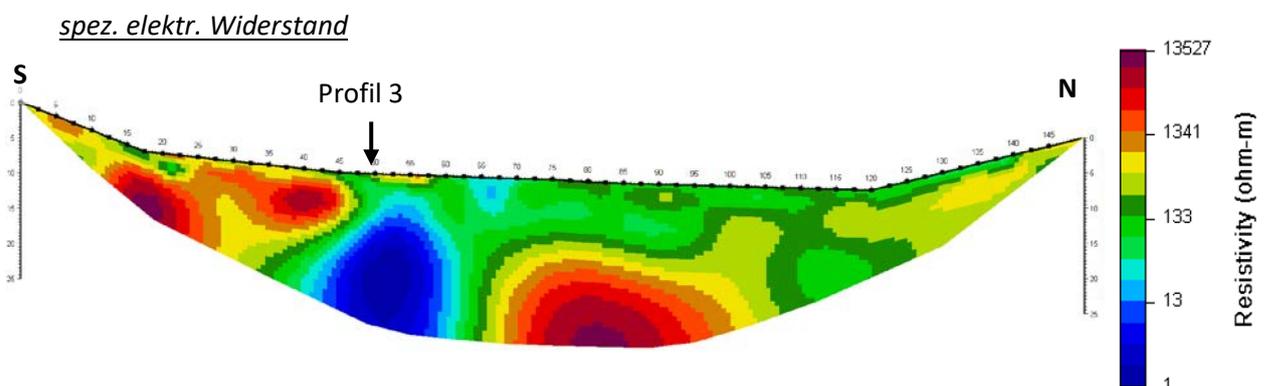


Abb. 17: Inversionsergebnis der IP Messung von Profil 2 ausgewertet mit Res2DInv; dargestellt ist das Modell der integralen Aufladbarkeit (Polarisierbarkeit)

Ein alternatives Inversionsergebnis der IP Messung ist in Abb. 18 dargestellt. Hier wurden die Messdaten mit der Software DC2DPro ausgewertet. Eine Eigenheit dieser Inversionssoftware ist, dass nicht die integrale Aufladbarkeit einfließt, sondern die Aufladbarkeit der zuvor definierten Zeitfenster (im konkreten Fall sind das 11 Zeitfenster mit unterschiedlicher Länge). Die unterschiedlichen Werte der Aufladbarkeit in den verschiedenen Zeitfenstern beinhalten natürlich zusätzliche Informationen über den Untergrund – so kann der zeitliche Verlauf der Abklingkurve berücksichtigt werden. Das Ergebnis ist recht gut mit dem aus Abb. 17 vergleichbar, mit dem Zusatz, dass man hier klar erkennen kann, dass der Effekt der Aufladbarkeit zum Großteil nach 160 ms (Zeitfenster 5) abgeklungen ist. Wie der Verlauf der Aufladbarkeit zwischen den verschiedenen zeitlichen Fenstern zu deuten ist (entspricht in der SIP verschiedenen Frequenzen) muss noch im Detail untersucht werden – im Moment liegt der Fokus bei den Zeitbereich-IP-Daten noch auf der integralen Aufladbarkeit und nicht bei der Detailbetrachtung der einzelnen Zeitfenster. Abb. 19 zeigt ein Situationsfoto des Profilmeters 100 und 120 inklusive des verwendeten Messequipments.



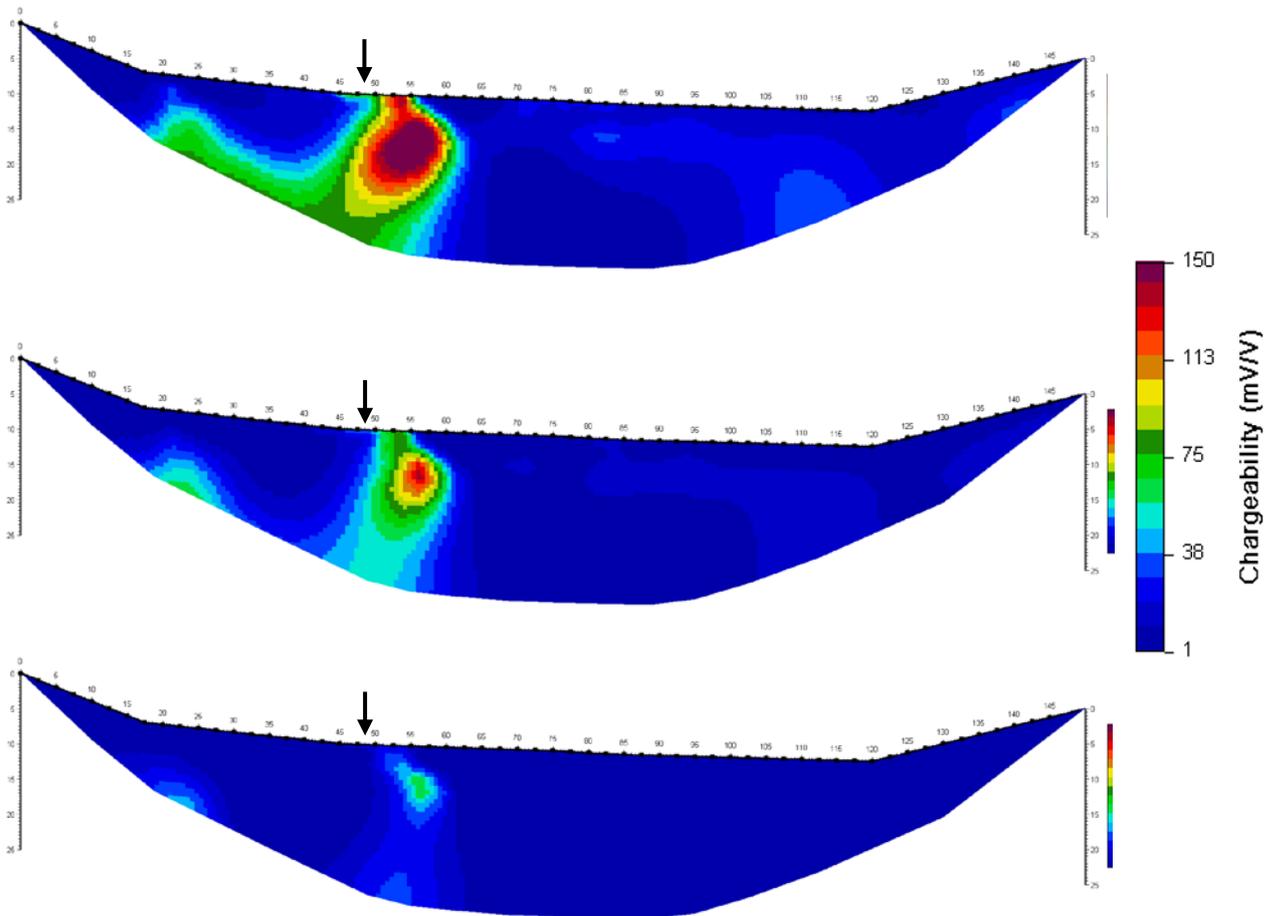
IP- Aufladbarkeit, Zeitfenster 1, Zeitfenster 5, Zeitfenster 11

Abb. 18: Inversionsergebnis der IP Messung von Profil 2 ausgewertet mit DC2DPro; Bild 1 (von oben nach unten) spez. elektr. Widerstand, Bild 2 Aufladbarkeit (Polarisierbarkeit) im Zeitfenster 1, Bild 3 Aufladbarkeit im Zeitfenster 5, Bild 4 Aufladbarkeit im Zeitfenster 11 (Zeitfenster 1: 10-30 ms nach Stromabschaltung, Zeitfenster 5: 120-160 ms nach Stromabschaltung, Zeitfenster 11: 460-550 ms nach Stromabschaltung).



Abb. 19: Situationsfoto der Messung Amstall (Profil 2).

Abb. 20 zeigt das Inversionsergebnis von Profil 3. Die Lage des Profils wurde so gewählt, dass die niederohmige Anomalie von Profil 2 etwa im rechten Winkel gekreuzt wird. Das Ergebnis zeigt eine heterogene Oberflächenschicht gefolgt von sehr niedrigen spez. elektr. Widerstand (unter 10 Ohmm) ab einer Tiefe von etwa 10 m unter GOK. Die Ausnahme bildet der südöstliche Bereich des Messprofils, hier erscheint in der Tiefe ein Bereich mit hohem spez. elektr. Widerstand (>200 Ohmm). Wie zu erwarten, verläuft das Profil im Streichen des grafitführenden Bereichs und eine laterale Begrenzung Richtung SO ist ab Profilmeter 95 zu erkennen. Das Hangende ist durch elektr. Widerstände von 50-200 Ohm-m charakterisiert. Dieser Bereich wird anhand von Profil 4 einer näheren Interpretation unterzogen.

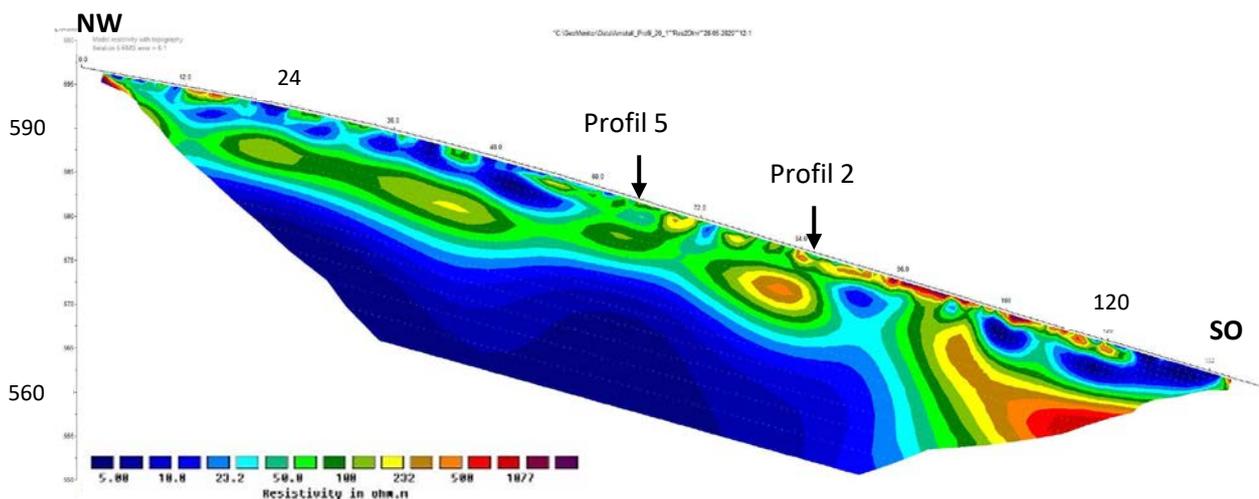


Abb. 20: Inversionsergebnis von Profil 3; dargestellt ist das Model des spezifischen elektrischen Widerstandes

Profil 5 wurde parallel zu Profil 2 gelegt und zeigt eine vergleichbare Charakteristik (zu Profil 2). Der grafitführende Bereich wurde ca. zwischen Profilmeter 50 und 60 angetroffen. Die Mächtigkeit kann aus dem Ergebnis des spez. elektr. Widerstandes nicht abgeschätzt werden, betrachtet man aber das Ergebnis der Polarisierbarkeit, so ist von einer Mächtigkeit von ca. 10 m auszugehen.

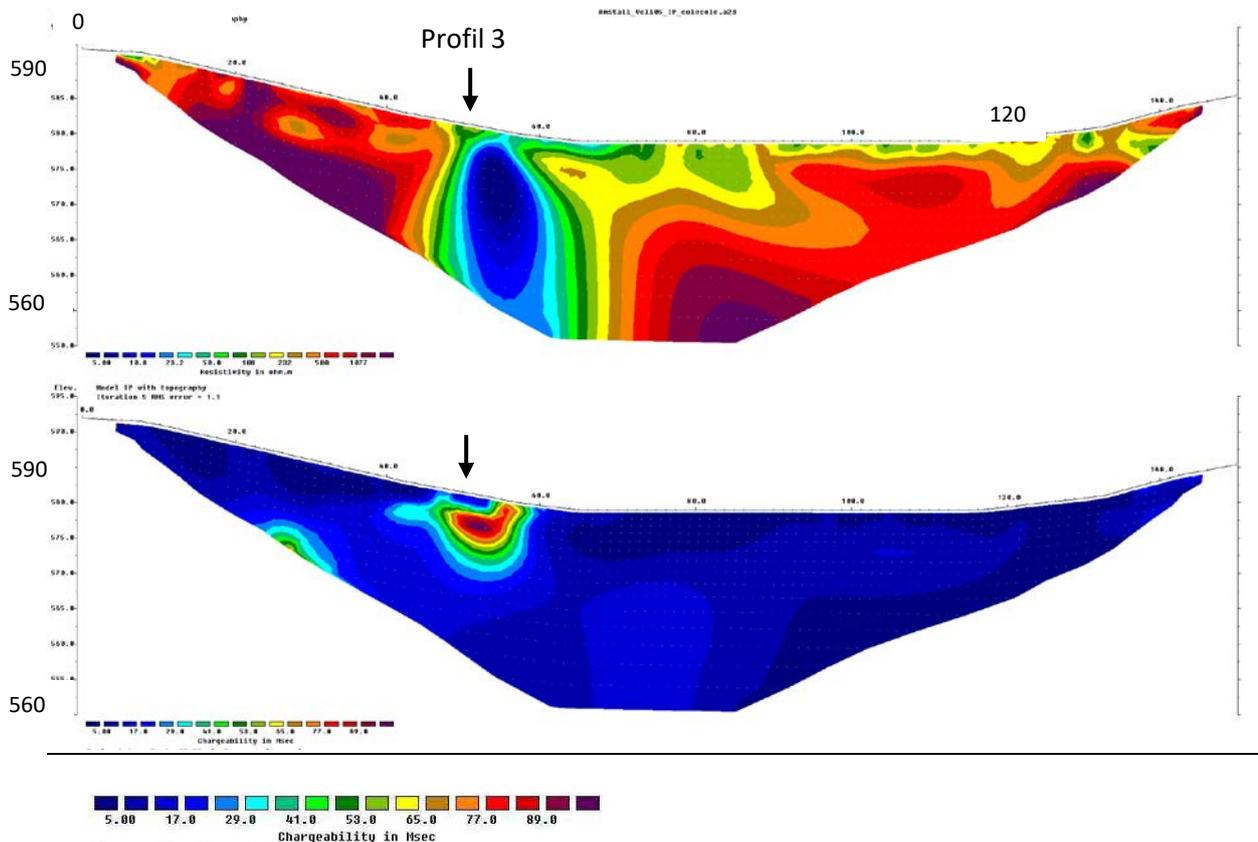


Abb. 21: Inversionsergebnis von Profil 5; dargestellt ist das Model des spezifischen elektrischen Widerstandes und der integralen Aufladbarkeit (Polarisierbarkeit)

Mit dem längeren Profil 4, das zwischen 2 Tagebaubereiche gelegt worden ist, wurde versucht den aus den SP-Daten abgeleiteten Bereich mit hohem Grafitgehalt zu erfassen und entsprechende Informationen über den Tiefenverlauf zu bekommen. Das Ergebnis in Abb. 22 zeigt sehr deutliche Widerstandskontraste. Ganz klar zu sehen ist eine relativ heterogene Oberflächenschicht mit unterschiedlicher Mächtigkeit (im Mittel etwa 20 m). Im Bereich vom Profilanafang (im NW) bis etwa Profilmeter 70 zeigt diese Oberflächenschicht zum Großteil Widerstandswerte von mehr als 180 Ohmm (Farbgebung gelb bis rot). Bis auf kleinräumige Anomalien zeigt der Rest der Oberflächenschicht durchwegs Werte des spez. elektr. Widerstandes von 30 bis 120 Ohmm. Der spez. elektr. Widerstand unter dieser Oberflächenschicht nimmt innerhalb von wenigen Metern sehr schnell ab und erreicht Werte kleiner als 10 Ohmm. Dieser Bereich muss ganz klar dem (unverwitterten) grafithaltigen Bereich zugeordnet werden. Das Ergebnis in Abb. 22 lässt keinen Schluss über eine etwaige Tiefenbegrenzung dieses grafitreichen Bereiches zu. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass durch den extrem niedrigen spez. elektr. Widerstand des grafithaltigen Material (bereits ab einer Tiefe von ca. 20 m unter GOK) der Informationsgehalt der Datenpunkte aus größerer Tiefe stark eingeschränkt ist. Einfache geoelektrische Modellrechnungen (siehe Kapitel Modellrechnung) zu dieser Untergrundsituation zeigen, wie stark die Auflösung der Messmethode für tiefere Bereiche durch eine darüber liegende

grafitreiche Schicht (sehr niedriger spez. elektr. Widerstand) eingeschränkt ist. Demnach können über Untergrundbereiche, die weit innerhalb der grafitreichen Schicht bzw. darunterliegen, mit der gewählten Messgeometrie (Profillänge/max. Eindringtiefe) keine klaren Aussagen getroffen werden. Dazu wäre ein Messprofil mit deutlich größerer Eindringtiefe, das bedeutet größeren Auslagenlängen, notwendig.

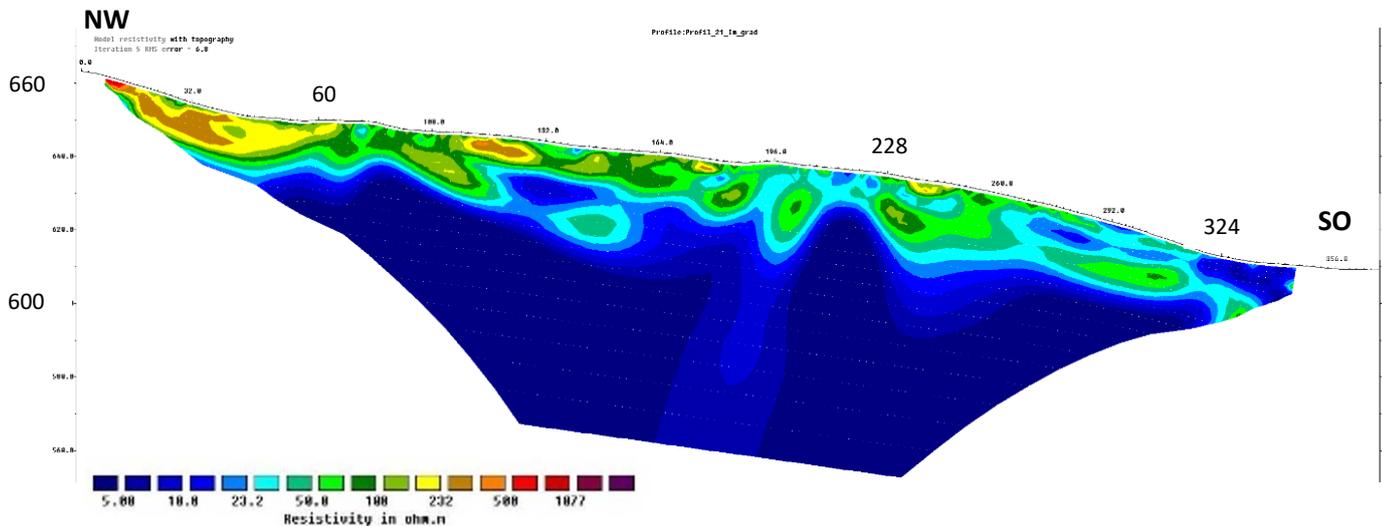


Abb. 22: Inversionsergebnis von Profil 4; dargestellt ist das Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes

In Abb. 23 ist ein weiteres Inversionsergebnis von Profil 4 mit dem Parameter elektr. Widerstand und der Polarisierbarkeit dargestellt. Da die Messdaten, die dem tieferen Untergrundbereich zuzuordnen sind mit einer starken Unsicherheit behaftet sind (siehe Modellrechnung) wurde der Datensatz entsprechend gefiltert, sodass nur die Datenpunkte aus den ersten 30 m unter GOK für die IP-Inversion herangezogen wurden. Ohne diese Einschränkung war für die IP Daten beim Inversionsprozess keine Konvergenz der Inversion zu erzielen. Die Verteilung des spez. elektr. Widerstandes (obere Darstellung in Abb. 23) ändert sich zum Ergebnis von Abb. 22 kaum (bis auf die eingeschränkte Eindringtiefe). Die Betrachtung der dargestellten Verteilung der Polarisierbarkeit/Aufladbarkeit (untere Darstellung in Abb. 23) zeigt ab Profilmeter 55 eine sehr heterogene Oberflächenschicht, die im Mittel doch als Bereich erhöhter Aufladbarkeit hervorsteht. Die einzelnen Anomalien mit Minimalwerten korrelieren sehr gut mit Bereichen, die einen hohen spez. elektr. Widerstand aufweisen. Der Umkehrschluss lässt sich weniger deutlich erkennen. Deutlich hervorzuheben ist allerdings, dass sich der hochohmige Bereich (oberflächennah) bei Profilanfang als deutliche Anomalie mit sehr geringer Aufladbarkeit auszeichnet. Diese Abschnitte können als NICHT grafitführend interpretiert werden. Eine vorläufige Interpretation geht dahin, dass das durch sehr niedrige elektr. Widerstände (< 10 Ohmm) gekennzeichnete Liegende den unverwitterten Grafitbereich anzeigt, während der durch etwas höhere elektr. Widerstände (50-200 Ohmm) Hangende Teil die Abschnitte des stark verwitterten Grafits charakterisiert. Die Mächtigkeiten betragen hier in etwa 20-30 m, dies würde auch den Abbauhöhen des Tagebaus – Bereiche des verwitterten Grafits, wo der vormals vorhandene Pyrit bereits umgewandelt wurde – entsprechen.

Hinsichtlich der Interpretation bedarf es aber weiterer Untersuchungen, um einen Zusammenhang zwischen der Aufladbarkeit, dem spez. elektr. Widerstand und der genauen Materialzusammensetzung des Untergrundes herauszuarbeiten.

Als Zusammenfassung der Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchungen kann gesagt werden, dass der elektr. Widerstand mit sehr geringen Werten (< 10 Ohmm) im Allgemeinen als unverwitterter Grafitbereich interpretiert werden kann, aus dem IP response, also der Polarisierbarkeit, v.a. aus den Resultaten der FrequenzIP Messungen (siehe Abb. 24) möglicherweise Hinweise auf Internstrukturen bzw. Grafitgehaltverteilung abgeleitet werden können. Dazu wären tiefere Bohrungen zur Validierung v.a. der Ergebnisse der Induzierten Polarisation erforderlich. Das würde bedeuten, dass der hier beschriebene Unterschied in den geoelektrischen Ergebnisparametern (spez. elektr. Widerstand und Aufladbarkeit) zwischen Deckschicht und darunterliegender Schicht hauptsächlich durch Verwitterung zustande kommt.

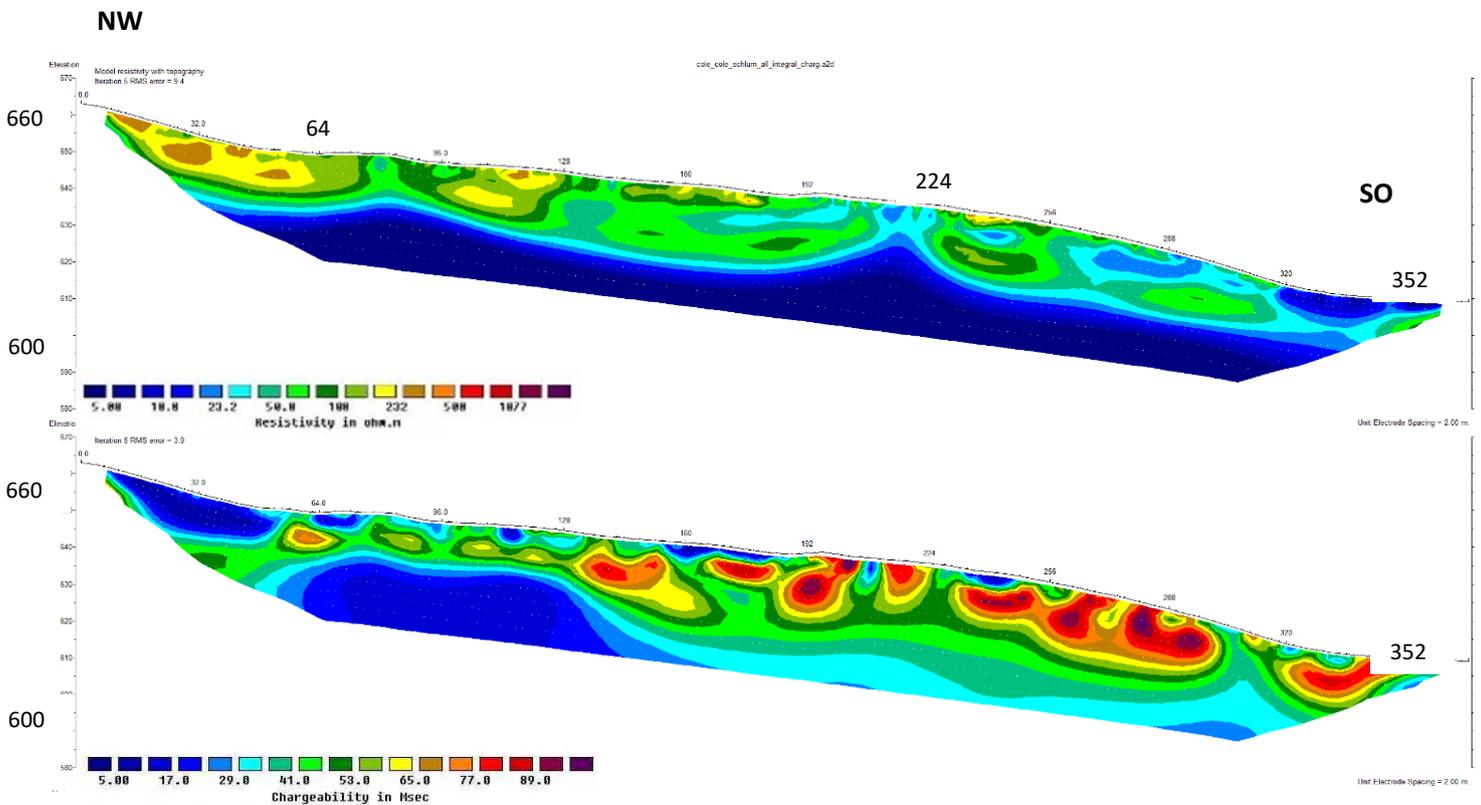


Abb. 23: Inversionsergebnis der IP Messung von Profil 4 ausgewertet mit Res2DInv; dargestellt ist das Modell des spez. elektr. Widerstandes und der integralen Polarisierbarkeit/Aufladbarkeit

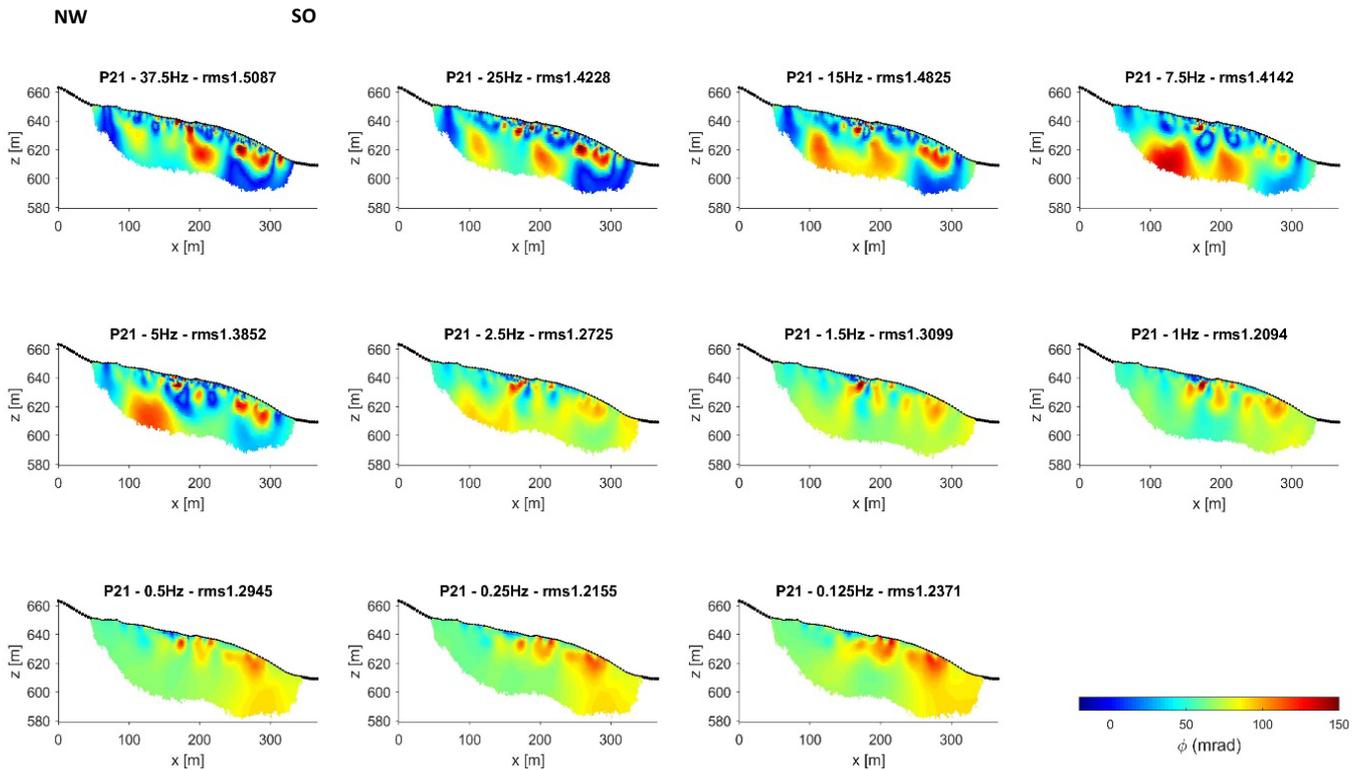


Abb. 24: Inversionsergebnis der IP Messung von Profil 4 der TU Wien; dargestellt ist die Phasenverschiebung, also die Polarisierbarkeit jeweils für unterschiedliche Frequenzen (Profilrichtung NW → SO)

3.4 Geoelektrische Modellrechnung

An Hand der bisher gezeigten Ergebnisse ist zu erkennen, dass v.a. beim Parameter elektr. Widerstand eine Mächtigkeitsabschätzung der liegenden grafitführenden Schicht in den meisten Fällen nicht möglich ist. Bei den vorhandenen geometrischen Randbedingungen (die durch die Auslagenlänge des geoelektrischen Profils bedingte maximale Eindringtiefe, Mächtigkeitsverhältnisse) ist in der geoelektrischen Inversion entweder das Liegende nicht zu erkennen oder die Mächtigkeit dieser Schicht wird deutlich überschätzt. Dies liegt daran, dass diese extrem leitfähige (sehr geringe elektr. Widerstände) Schicht den eingespeisten elektr. Strom bündelt und somit (fast) kein „Signal“ aus tieferen Bereichen zu erhalten ist. Um die geometrischen Voraussetzung für eine mögliche Abschätzung der Tiefenlage einer grafitführenden Schicht besser beurteilen zu können, wurden verschiedene geoelektrische Modellrechnung für unterschiedliche geometrische Situationen durchgeführt. Modellrechnung heißt in diesem Fall, dass man ein Modell der Widerstandsverteilung des Untergrundes vorgibt (basierend auf einem geologischen Modell bzw. durch Daten von Messungen in der näheren Umgebung) und anschließend den theoretischen Response einer geoelektrischen Messung (mit Konfigurationsparametern wie sie bei der Feldmessung verwendet werden, d.h. Elektrodenabstand, realistische Auslagenlängen, Elektrodenkonfigurationen) berechnet. Naturgemäß kann so ein Eingangsmodell nur ein sehr vereinfachtes Modell der wahren geologischen Situation darstellen, ist aber zur Beurteilung dieser speziellen Situation ausreichend. Grundsätzlich wird eine grafitführende, sehr leitfähige Schicht, mit variierenden Mächtigkeiten unter

einer Deckschicht (Grundmodell siehe Tab. 1) angenommen. Die jeweiligen Variationen der geologischen Modelle bzw. der Messgeometrien sind in Tab. 2 angeführt.

Die jeweiligen Ergebnisse zeigen die Abb. 25 bis 28. In den Abbildungen ist jeweils das theoretisch berechnete Widerstandsprofil (oben) zum abgebildeten geologischen Modell (Mitte) dargestellt. Darunter befindet sich das Ergebnis der geoelektrischen Inversion in Form einer 2-dimensionalen Verteilung der elektr. Widerstände als Profilschnitt (unten).

Mächtigkeit Überdeckung	Geolog. Formation	Elektr. widerstand	Anzahl Elektroden
24 m	Festgestein/Überdeckung	500 Ohmm	93
	Graphit	1 Ohmm	93

Tab. 1: geologisch/geoelektrisches Grundmodell für geoelektrische Modellrechnung

Nummer Beispiel	Mächtigkeit Graphitschicht	Elektroden abstand	Länge Profil
1	40 m	4 m	368 m
1_1	40 m	8 m	736 m
2	11 m	6 m	552 m
3	21 m	6 m	552 m

Tab. 2: Variationen des geologisch/geoelektrischen Grundmodells und der Messgeometrien für geoelektrische Modellrechnung

Betrachtet man nun die aus der Modellrechnung berechneten Ergebnisse, so ist bei Modell 1 (Abb. 25), dies entspricht in der Konfiguration dem in Amstall gemessenen Profils 5, klar zu erkennen, dass die Mächtigkeit der überlagernden Hangendschicht gut erfasst wird. Die Messgeometrie, d.h. die Auslagenlänge des geoelektrischen Profils ist aber eindeutig zu kurz, um die als unverwittert interpretierte Grafitschicht zu erfassen. In Abb. 26 erkennt man, dass erst bei einer Auslagenlänge von ca. 700m die Inversion einen Hinweis auf eine Unterkante der Grafitschicht liefert, die Geometrien sind aber nicht korrekt wiedergegeben, d.h. die zu interpretierende Mächtigkeit der Grafitschicht wird massiv überschätzt. Dasselbe gilt für die Ergebnisse der Modellrechnungen (Modell 2 und Modell 3, siehe Abb. 27 bzw. Abb. 28). Erst wenn die geometrischen Verhältnisse, wie Mächtigkeiten, Tiefenlage bzw. Auslagenlänge passen, kann man abschätzen, ob die Grafitschicht eine liegende Begrenzung, mit den vorher genannten Randbedingungen aufweist. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in Fällen, wo eine Schicht mit sehr geringen elektr. Widerständen (mit einer entsprechenden Überlagerung) über einer Schicht mit höheren elektr. Widerständen auftritt, der eingespeiste Inputstrom durch die besser leitende Schicht quasi gebündelt wird und nur wenig Strom durch die hochohmige Schicht ins Liegende gelangen kann. Dies lässt bei einer Standardauswertung die Mächtigkeit der leitfähigen Schicht um vieles zu hoch erscheinen. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse des elektr. Widerstandes immer zu berücksichtigen.

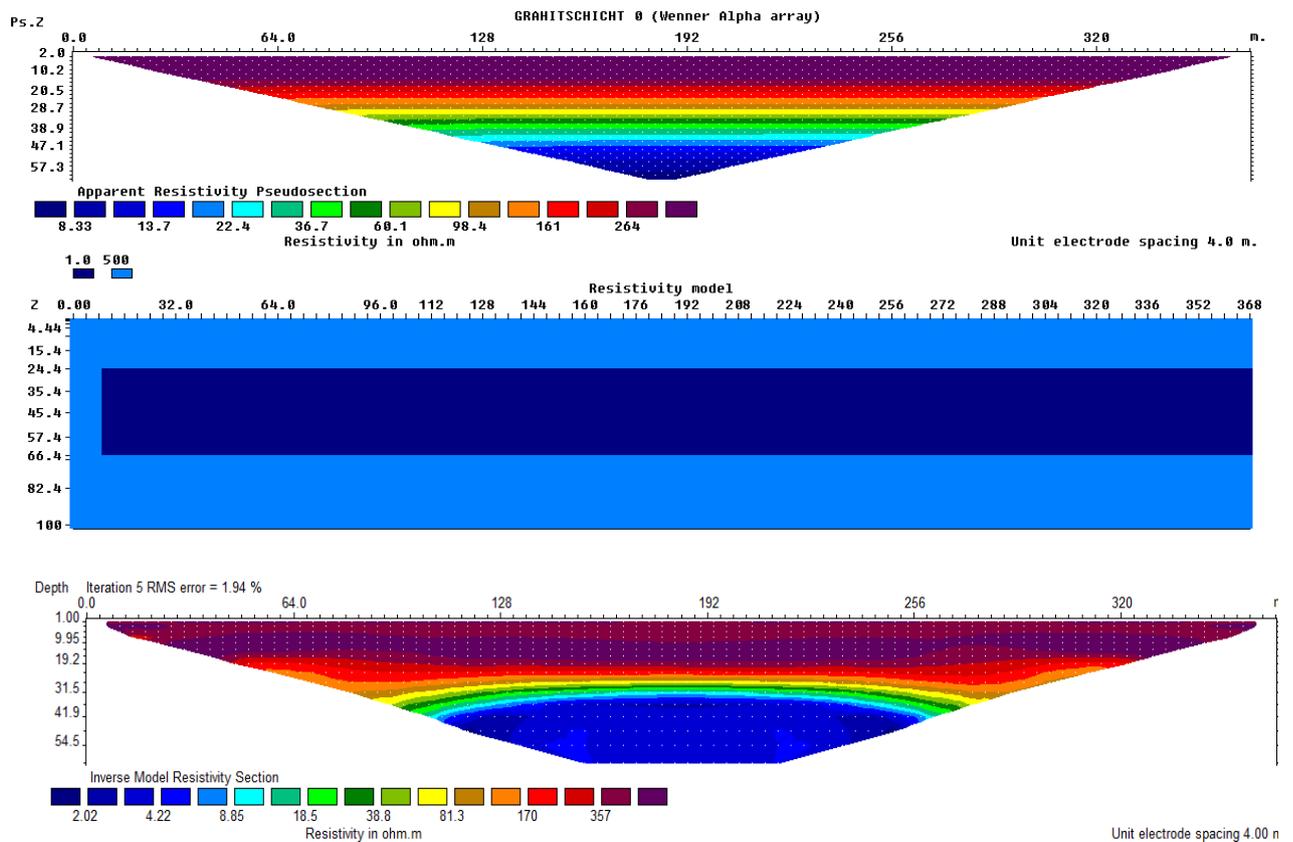
Graphit Beispiel 1:

Abb. 25: theoretische Verteilung der geoelektrischen Messwerte (oben) auf Basis des geoelektrischen/geologischen Modells (Mitte) und Ergebnis der geoelektrischen Inversionsrechnung (unten), Beispiel 1

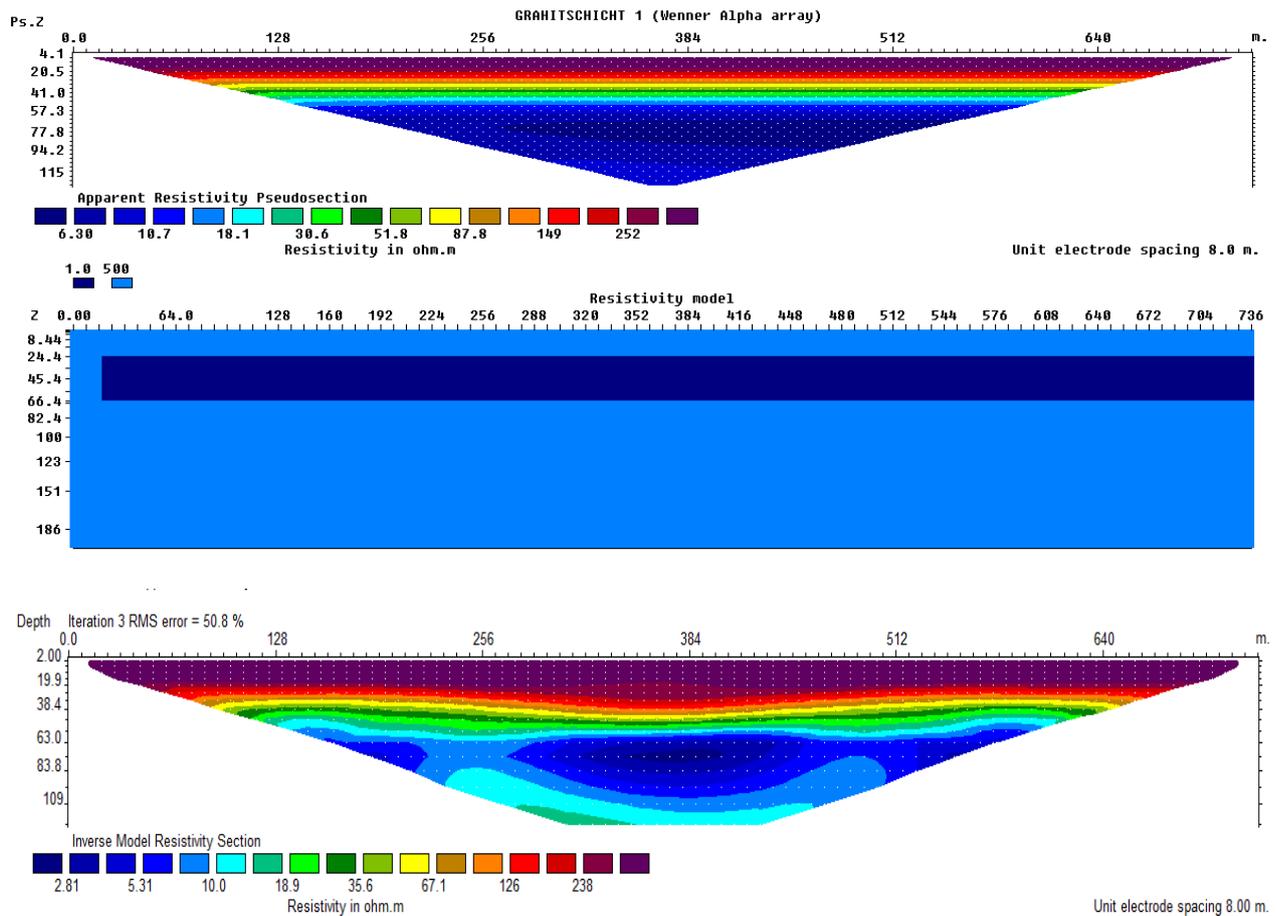
Graphit Beispiel 1 1:

Abb. 26: theoretische Verteilung der geoelektrischen Messwerte (oben) auf Basis des geoelektrischen/geologischen Modells (Mitte) und Ergebnis der geoelektrischen Inversionsrechnung (unten), Beispiel 1_1

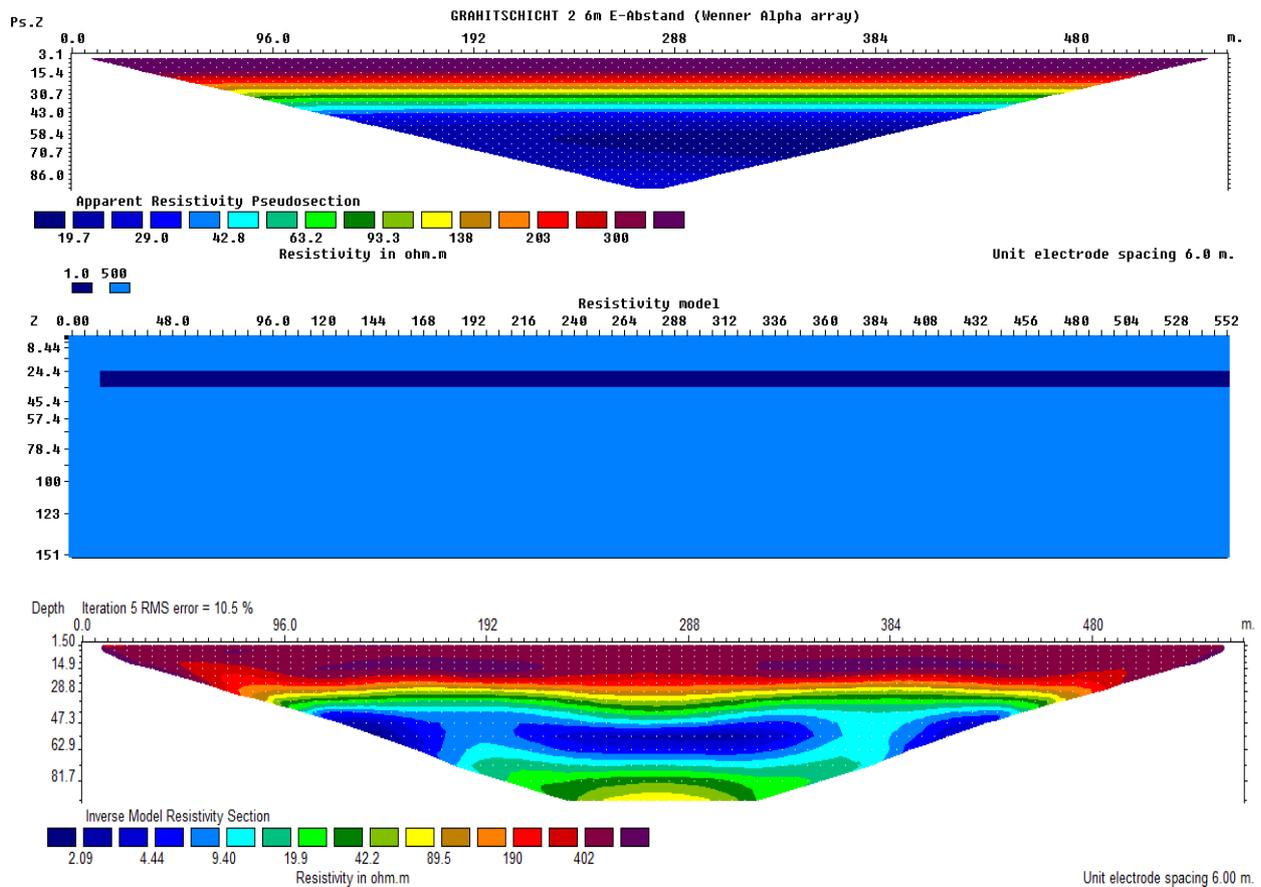
Graphit Beispiel 2:

Abb. 27: theoretische Verteilung der geoelektrischen Messwerte (oben) auf Basis des geoelektrischen/geologischen Modells (Mitte) und Ergebnis der geoelektrischen Inversionsrechnung (unten), Beispiel 2

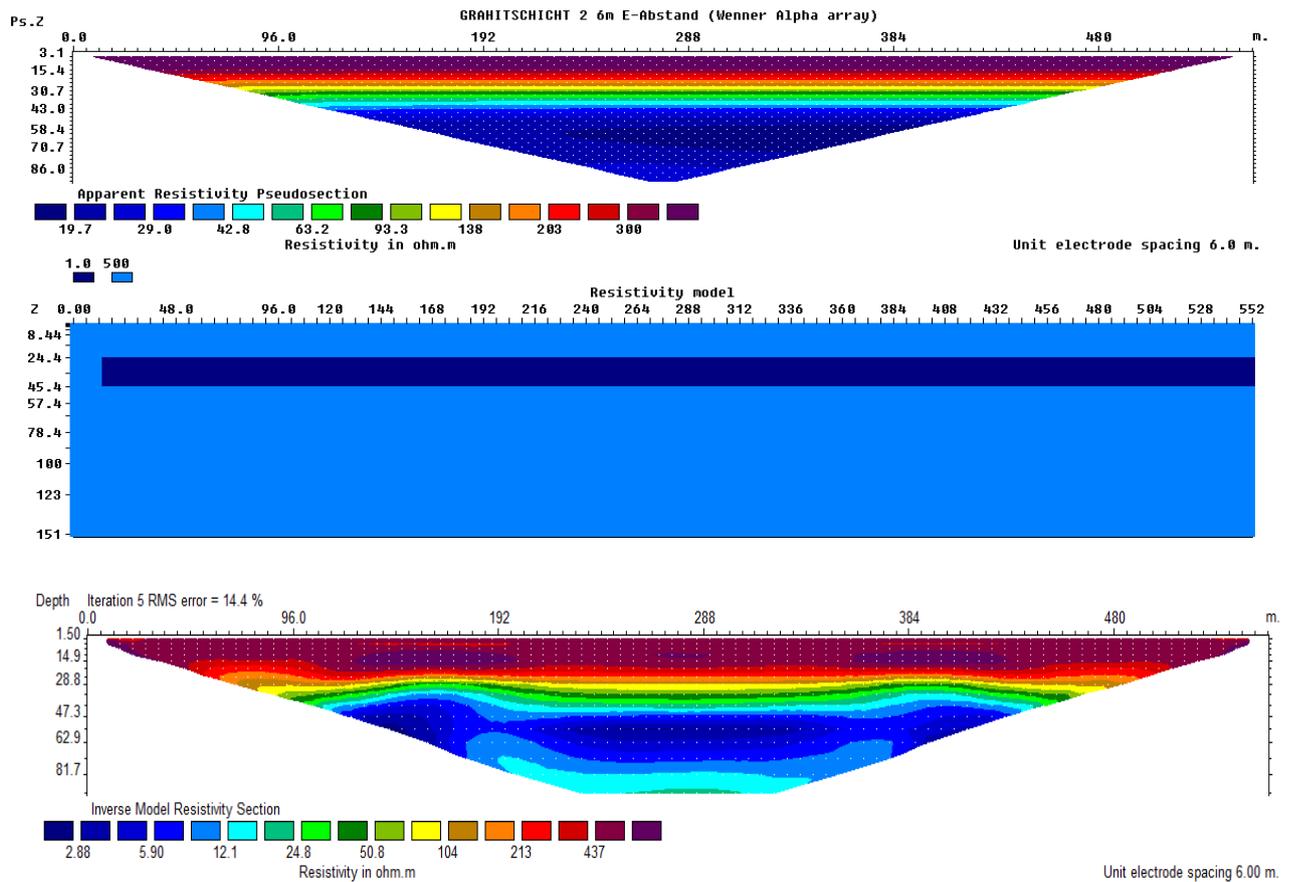
Graphit Beispiel 3:

Abb. 28: theoretische Verteilung der geoelektrischen Messwerte (oben) auf Basis des geoelektrischen/geologischen Modells (Mitte) und Ergebnis der geoelektrischen Inversionsrechnung (unten), Beispiel 3

3.5 Abschätzung des Lagerstättenpotentials

Ein erster Versuch für eine grobe Abschätzung des in Weinberg/Amstall vorhandenen Restpotenzials an grafitführenden Bereichen soll an 2 Lokationen (Bereich 1 und Bereich 2) versucht werden (siehe Abb. 29).

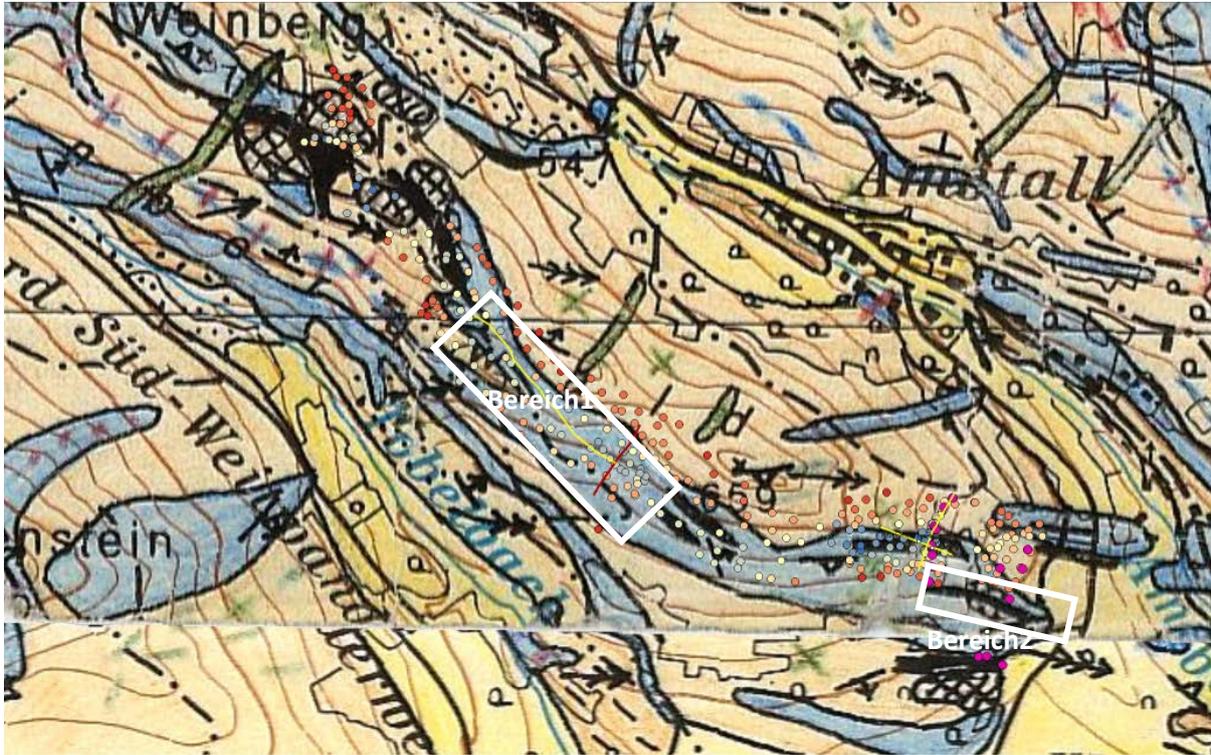


Abb. 29: Bereiche 1 und 2 für die Abschätzung des Lagerstättenrestpotenzials Weinberg/Amstall

Dafür wurden diese beiden Bereiche mittels den wie in Kapitel 3.3 interpretierten Geoelektrikprofilen und den Ergebnissen der SP Messungen als quaderförmige Geometrien berechnet. Ein so berechneter, oberflächen-parallel-er Modell-Quader kommt naturgemäß zu einem deutlich größeren Gesamtvolumen als das Volumen der tatsächlichen Grafitkörper, die meist unregelmäßige, linsenförmige Körper darstellen, die relativ abrupt sowohl im Streichen als auch im Einfallen auskeilen. Geoelektrik und SP im Streichen der konkreten Grafitlinse(n) „sehen“ also einen vertikalen Profilschnitt einer mittelsteil einfallenden Grafitlinse (daher auch die größere Mächtigkeit) und dies entspricht damit eigentlich keinem horizontal interpolierbaren Körper. Geologisch scheinen die Lagerstätten an der Oberfläche durch das Auftreten der Marmor (Grafitte sind dort linsenförmig eingeschaltet) begrenzt zu sein. Diese Grafitlinsen fallen mittelsteil gegen NE (Bereich 1), im S-Teil (Bereich 2) gegen SW ein. Die max. Tiefe des verwitterten Grafits bei Bereich 1 beträgt 20 bis max. 30 m, die max. Tiefe für Bereich 2 kann mit 10-15 m abgeschätzt werden. Die Anomaliebereiche, v.a. bei Profil 5, und damit der grafitführende Bereich der Grafitlinsen sind im Streichen der angenommen verwitterten Grafitlinsen nicht als durchgehend zu interpretieren, sondern es handelt sich, wie oben ausgeführt, wahrscheinlich um mehrere NW-SE-streichende Linsen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde in der Abschätzung das Volumen des eigentlichen Grafitlinsenanteils am berechneten Quadervolumen mit 30 % angesetzt. Dieser als grafitführend interpretierte Rest wurde dann weiter um den Faktor des eigentlichen, tatsächlich vorhandenen Grafitanteils und unter der Annahme einer

realistischen Ausbringung, der in Summe in den Grafitlinsen meist bei 40-50% liegt, weiter um diesen Faktor reduziert.

In Tab. 3 ist für den Bereich 1 zwischen den beiden ehemaligen Tagbauen eine Volumensabschätzung für ein verwertbares Restpotenzial für den verwitterten Grafitkörper anhand der Ergebnisse der Geoelektrikprofile Profil 1 und Profil 5 und den Ergebnissen der SP Messungen und der oben beschriebenen Annahmen angegeben. Das führt zu den in Tab. 3 abgeleiteten geometrischen Annahmen (Spalten 1, 2 und 3) und zu den daraus berechneten Tonnagen (Grafit mit einer Dichte von $2,25 \text{ t/m}^3$) (Zeile 1 Minimum, Zeile 2 Maximum).

Länge [m]	Breite [m]	Mächtigkeit [m]	Tonnage [t]
200	10	20	10800
200	30	30	48600

Tab. 3: Annahmen der Geometrien, Volumen und Kubatur (Min/Max) für Abschätzung des Lagerstättenpotentials für Bereich 1

Etwas anders stellt sich die Situation bei der Interpretation im Bereich 2 dar. Hier dürfte es sich um eine Grafitlinse handeln, deren Dimensionierung ebenfalls aus den oben erwähnten Messergebnissen abgeleitet und mit den Resultaten der geologischen Kartierung abgeglichen wurde. Da von der Hypothese ausgegangen wird, dass es sich hier um einen mehr oder weniger homogenen Linsenkörper handelt, würde unter dieser Annahme das Volumen auch dem verwertbaren Restpotenzial entsprechen. Tab. 4 zeigt die Annahmen und die Abschätzung für den Bereich 2:

Länge [m]	Breite [m]	Mächtigkeit [m]	Tonnage [t]
100	10	10	2700
100	15	15	6075

Tab. 4: Annahmen der Geometrien und Volumen (Min/Max) für Abschätzung des Lagerstättenpotentials für Bereich 2

Die getroffenen Annahmen zum Gesamtvolumen, v.a. für Bereich 1 sind natürlich hypothetischer Natur. Für eine genauere Modellierung des Lagerstättenpotenzials fehlen aber noch ergänzende Geometrieparameter, inklusive der Kalibrierung der Messdaten mit Ergebnissen von Bohrungen. Zusätzlich müssten zur besseren Auflösung der Geometrie der Grafitlinse mehrere Querprofile vermessen werden.

Daher sind diese Modellierungsversuche als erste Orientierungshilfe zur Abschätzung des Lagerstättenpotenzials anzusehen die noch durch ergänzende Untersuchungen validiert werden muss.

4. Geophysikalische Untersuchungen/Messgebiet Zettlitz

4.1 Geologie des Grafitbergbaus Zettlitz und weiterer Grafitvorkommen im Raum Zettlitz-Zettenreith-Wollmersdorf

Die Grafitkörper der Bunten Serie treten generell meist in unmittelbarer Nähe oder direkt zwischen Marmorlagen und Paragneisen in einer schmalen, etwa SSW-NNE streichenden Zone der Drosendorfer Decke auf und entsprechen meist linsen- bis lagerförmigen Tektoniten. Abb. 30 zeigt den Ausschnitt aus den beiden geologischen Karten 1:50.000 GK 7 (THIELE, O.; JENCEK, V. & MATEJOVSKA, O., 1987) und GK 8 (ROETZEL, R. & FUCHS, G., 2001). Grafitgesteine sind im Großraum Zettlitz-Wollmersdorf-Zettenreith in unterschiedlichen Ausbildungsformen entwickelt. Grafitschiefer bilden Zentimeter bis Meter mächtige Linsen und Bänder, die Grafitgneise bis Zehnermeter mächtige Zonen innerhalb der Paragneise. Der Grafit ist dabei entweder gleichmäßig verteilt oder an den Schieferungsflächen angereichert. Die Struktur der Grafitkörper ist tektonisch stark überprägt, so dass die Grafite meist tektonisch zu linsenförmigen Körpern ausgewalzt sind und damit sehr unregelmäßige Lagerstättenkörper bilden. Lokal erreichen die Grafitkörper bedeutende Mächtigkeiten, keilen aber oft unvermutet aus, was eine Ausrichtung der Lagerstätte im Abbau ziemlich erschwert. Neben den bergbaulich genutzten Vorkommen in diesem Gebiet treten hier auch viele kleinere, wirtschaftlich unbedeutende Grafitlinsen auf, die aufgrund der charakteristischen schwärzlichen Bodenfärbung auch in aufschlusslosen Gebieten kartierungsmäßig sehr gut erfassbar sind (Abb. 31.). Einige Typsituationen solcher geringmächtigen Grafitausbisse SW Wollmersdorf wurden im Rahmen des gegenständlichen Projektes für vergleichende Methodentests herangezogen. Im unmittelbaren Umfeld von Zettlitz, Zettenreith und Wollmersdorf befanden sich insgesamt vier ehemalige Grafit-Bergbaubetriebe. Die Abbautätigkeit wurde bereits Mitte des 19. Jh. begonnen, die endgültige Einstellung der Grafitgewinnung erfolgte 1978/79. Kleinere Abbautätigkeiten im größten Abbaubetrieb dieser Region (Bergbau Zettlitz) sind bereits ab 1855 dokumentiert. Zwischen 1927 und 1937 bestand hier ein Grafitabbau der Schwarzenbergschen Grafitwerke in Schwarzenbach (HOLZER, 1961). Die Neuaufschließung und die großtechnische Grafit-Gewinnung erfolgte schließlich durch die Firma Pryssok & Co.KG, die hier von 1958 bis 1965 im zeitweise größten österreichischen Grafitbergbau insgesamt 258.000 t Grafit förderte. 1965-1968 bzw. 1974-1978 bestand hier noch eine umfangreiche Haldengewinnung (40.000t).

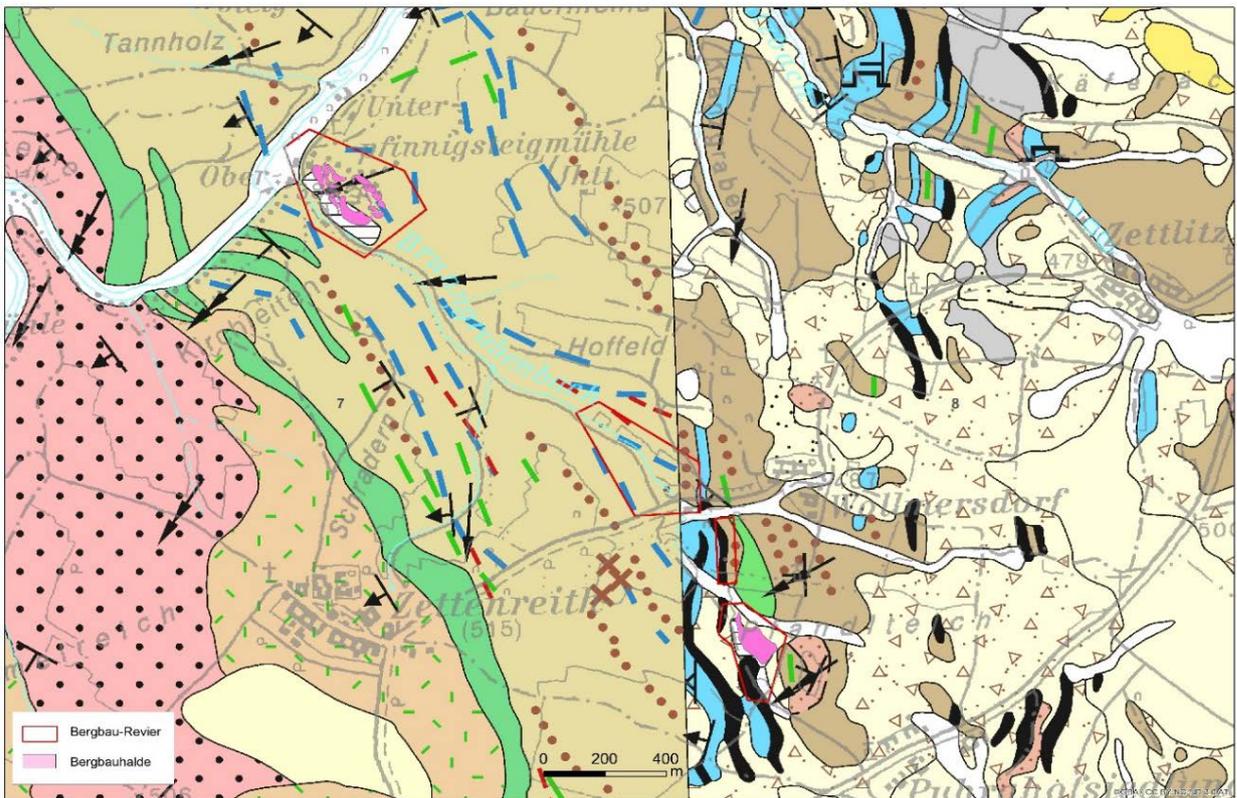


Abb. 30: Grafitvorkommen und Grafitbergbaue im Raum Zettlitz-Zettenreith-Wollmersdorf; Ausschnitt aus den geologischen Karten GK 7 (THIELE, O.; JENCEK, V. & MATEJOVSKA, O., 1987), GK 8 (ROETZEL, R. & FUCHS, G., 2001) und dem Bergbau-/Haldenkataster der GBA (rote Polygone)



Abb. 31: Luftbildausschnitt aus dem Gebiet SE Zettenreith mit markanten dunklen Bodenfärbungen im Bereich oberflächlich ausbeißender Grafitlinsen (Quelle: ESRI World Imagery)

Die Grafitlagerstätte Zettlitz ist der größte zusammenhängende Grafitkörper des Waldviertels und besteht aus einer in der Lagerstätte aufgeschlossenen Grafitlinse von etwa 300 m Gesamtlänge und

einer maximalen Breite von 150m. Die Grafitlinse streicht vorwiegend NW-SE und fällt meist mit etwa 30° gegen SW ein. Schiefergneise und Glimmerschiefer bilden das Hangende der Grafitlinse bzw. das Liegende des Kalkmarmors. Der Grafitkörper liegt im Abbaubereich direkt auf grobkörnigen Kalkmarmoren auf (vgl. Abb. 32). Der Kontakt zum Grafit ist im nordöstlichen Bereich des Tagbaus tektonisch überprägt. Ein weiteres Marmorband schließt unmittelbar SW des Brunngrabenbachs an. Möglicherweise handelt es sich dabei um den durch Störungen begrenzten Liegendschenkel einer gegen SW abtauchenden Muldenstruktur (vgl. Abb. 33). Im Tagbauaufschluss wirken die Kalkmarmore relativ homogen, zeigen durch variable Grafitführung mitunter auch eine markante Bänderung. Aus vergleichbaren anderen Grafit-Aufschlüssen im Raum Wollmersdorf ist ersichtlich, dass immer wieder auch geringmächtige grafitische Zwischenlagen im Kalkmarmor eingeschlossen sein können. Solche Zwischenlagen sind aber in den Marmorlagen im Tagbau Zettlitz nicht aufgeschlossen. Im oberen Teil der Lagerstätte Zettlitz sind einige dm- bis cm-starke, weiße bis gelbliche, stark zersetzte Aplitbänder aufgeschlossen, die den Grafit sowohl diskordant durchschlagen als auch schichtparallel eingeregelt sind.

Der Grafit tritt in den Grafitschiefern und Grafitgneisen großflinzig bis kleinflinzig-dicht, meist in Verwachsung mit Feldspat und Quarz auf. Bei den dichten Grafiten sind häufig für das Waldviertel typische brekziöse Strukturen (mit Quarz, Feldspat, Natrojarosit und Nontronit als Matrix) erkennbar. Der C-Gehalt der Grafitschiefer beträgt 27-35%; die der Fördergrafite 45-57% (ZECHNER, 1939). Der SiO₂-Gehalt liegt bei rund 30%, der S-Gehalt bei 0,5%. Begleitminerale in den Grafitschiefern sind Kyanit, Turmalin (V-reiche Varietät Dravit), Rutil, Zirkon, Apatit, Xenotim und Monazit (MÜLLER, 2016). Bemerkenswert ist die bereichsweise hohe Pyritführung an der Grenze zwischen Marmoren im Liegenden und quarzführenden Grafitschiefern. Während im oberflächennahen Bereich der Pyrit weitgehend in Eisenhydroxide bzw. -sulfate umgewandelt ist (siehe Abb. 34), dominieren in den tieferen Abschnitten der Grafitlinse noch weitgehend unverwitterte Pyrite.

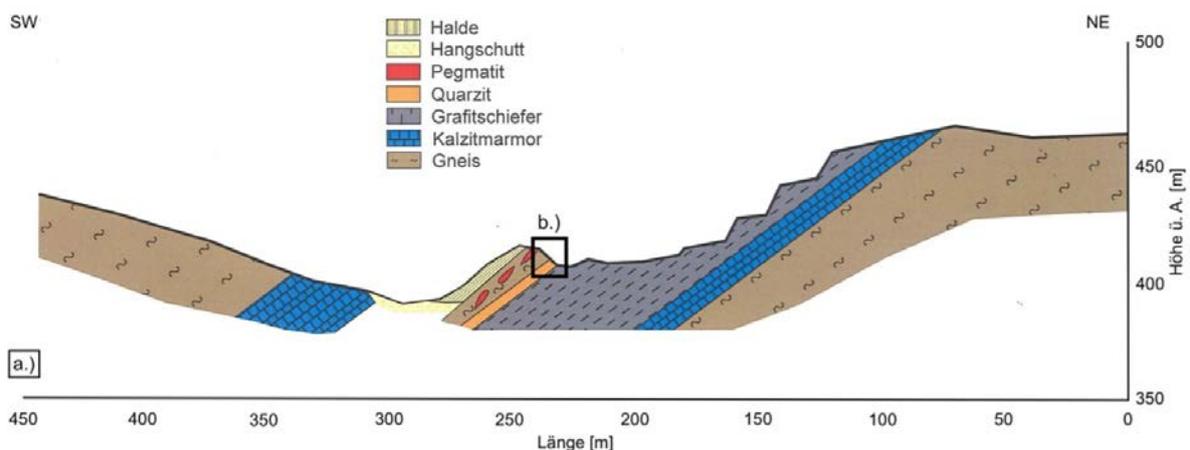


Abb. 32: NE-SW Profil durch den Bergbau Zettlitz (aus MÜLLER, 2016); zentraler Grafitkörper möglicherweise Kern einer nach SW abtauchenden Muldenstruktur, Foto: ca. 10m hohe Abfolge der nach SW einfallenden Formationen am nicht abgebauten Hügel

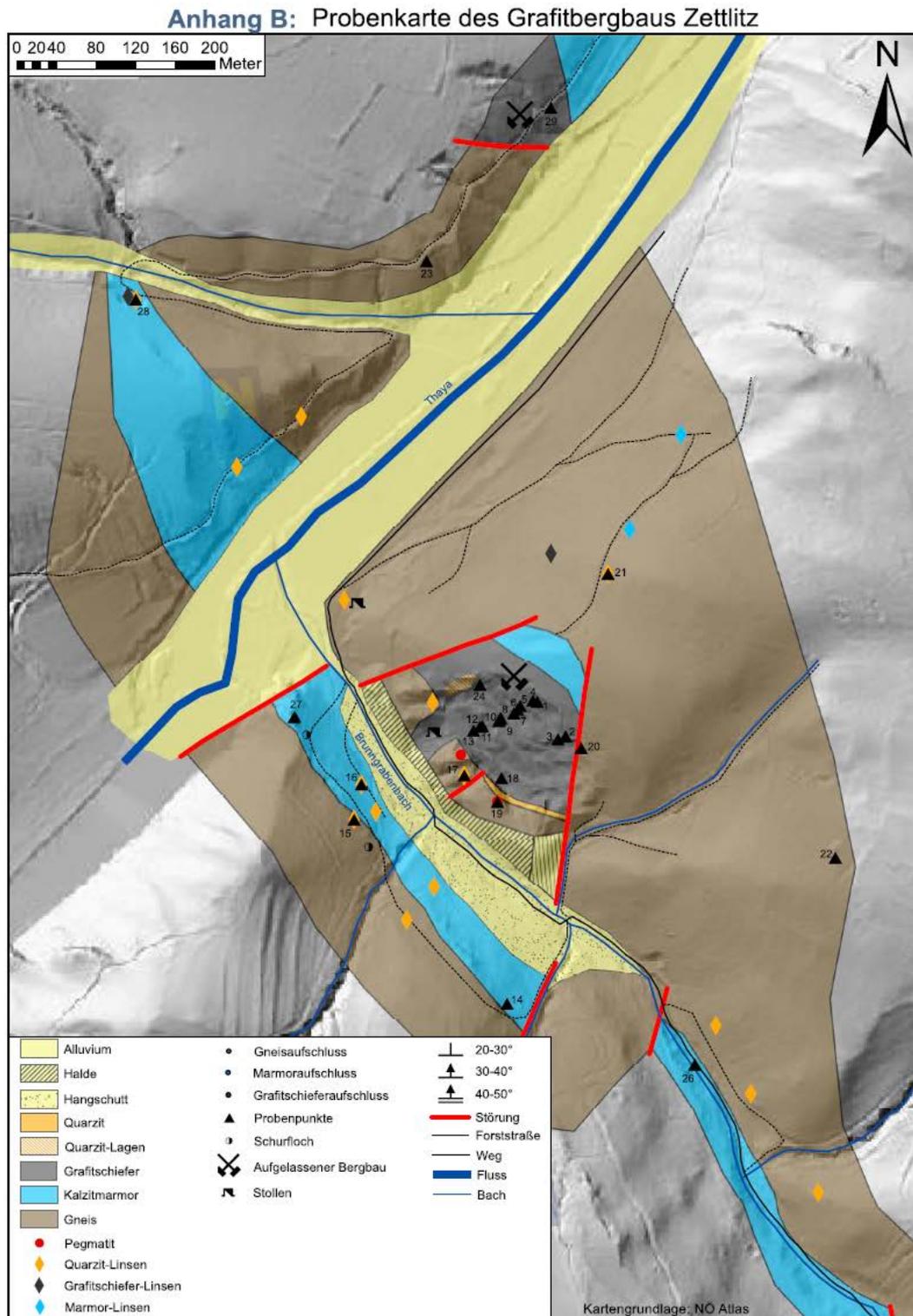


Abb. 33: geologische Detailkarte; zentraler Grafitkörper durch Störungszonen begrenzt (aus MÜLLER, 2016)



Abb.34: Grafitsschiefer im unteren Etagenbereich des ehemaligen Tagbaus mit ausgeprägter Sulfidverwitterung an den Klufflächen

Neben dem durchschnittlichen Haupteinfallen mit 30° gegen SW fallen die Grafite bereichsweise aber auch gegen WSW ein. Die geologische Detailaufnahme des Grafitbergbaus von HOLZER & HOFBAUER (1963) zeigt im aufgeschlossenen Lagerstättenbereich insgesamt fünf sattel- bis walzenförmige Aufwölbungen der Grafitsschiefer, bei denen das vorherrschende Strukturelement durch WSW- bis SW-tauchende Faltenachsen gegeben ist (vgl. Abb. 35). Diese relativ genaue Aufschlusskartierung (Stand 1963) der oberflächigen Grafitführung zeigt einen gegen W des Abbaus stark eingeeengten Grafitkörper, der sich unter der Talsohle wahrscheinlich nur in W bis NW-Richtung fortsetzt und der möglicherweise keine weitreichende Fortsetzung gegen Süden bis Südwesten besitzt. WEBER (1987) beschreibt im Gebiet der Lagerstätte ebenfalls einen markanten Faltenbau, in dem die Grafitsschiefer fensterförmig aufbrechen. Die tektonische Verformung der Grafitlinsen erfolgte demnach durch E-W-gerichtete tektonische Bewegungen. Dieser angedeutete Faltenbau konnte aber im Zuge der letzten geologischen Bearbeitung (MÜLLER, 2016) nicht verifiziert werden. MÜLLER (2016) geht entgegen der bisherigen Kartierungen im Bereich des Tagbaus von einem durch Störungen (Abschiebungen) im NW bzw. ESE begrenzten Lagerstättenkörper aus. Eine Fortsetzung gegen SW wird dabei aber nicht ausgeschlossen.

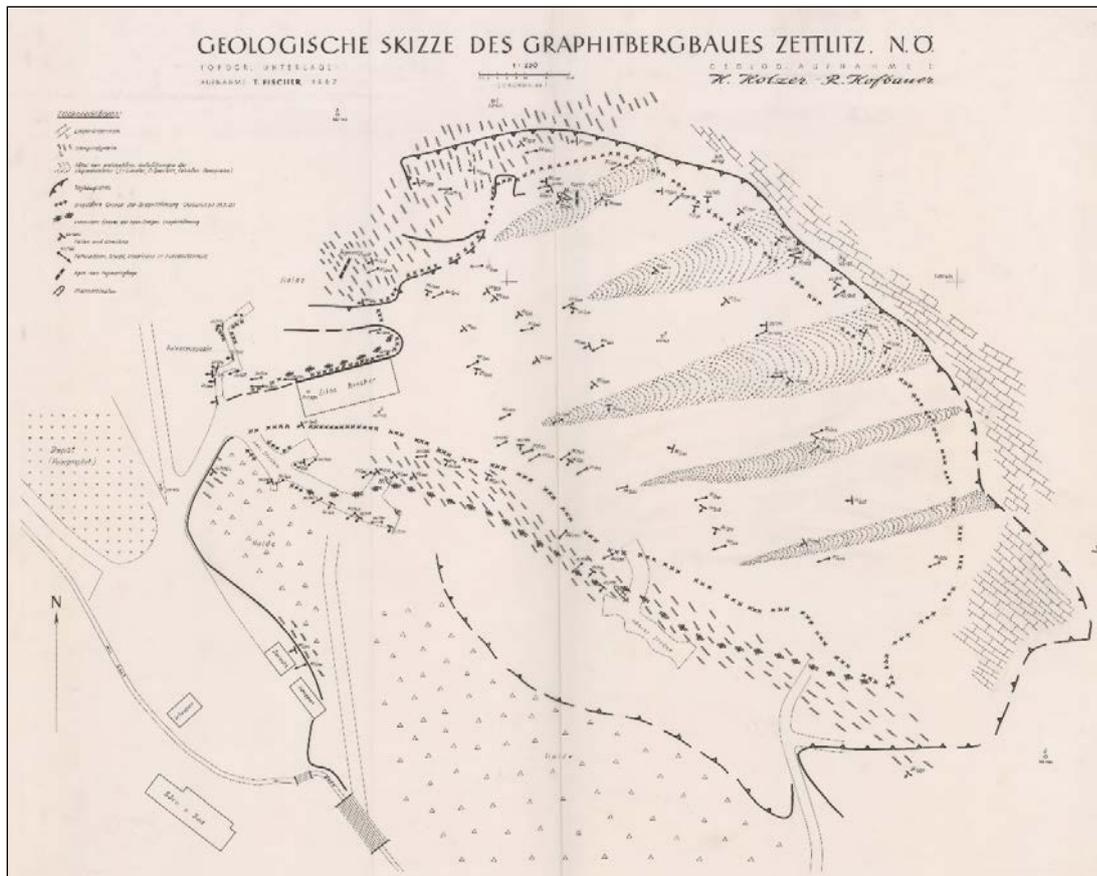


Abb. 35: Geologische Aufschlusskartierung des Grafitbergbaues Zettlitz (HOLZER & HOFBAUER, 1963)

Aufgrund der komplexen tektonischen Beanspruchung und der damit verbundenen unregelmäßigen Ausbildung des Lagerstättenkörpers ist der genaue Tiefenverlauf der Grafitlinse und deren weitere Fortsetzung gegen Westen aus den aktuellen Oberflächenbefunden ohne Bohraufschlüsse meist nur schwer prognostizierbar. Selbst in den Abbaubereichen sind nur bedingt Aussagen über den weiteren Verlauf im Untergrund möglich. Die Grafitkörper zeigen als Folge der wiederholten tektonischen Durchbewegung und Umkristallisationen zum Teil bemerkenswerte Verformungstypen mit erheblichen Mächtigkeitsschwankungen auf relativ kleinem Raum. Im Abbaubereich wurden maximale Mächtigkeiten von 12-15 m erreicht (POLEGEG et al., 1987). Die tagbaumäßige Förderung ging auf 4 Etagen vor sich. Die Lagerstätte wurde durch zwei Stollen (auf der Brecheretage bzw. 1. Etage) im Streichen ausgerichtet. Zur Erkundung der Lagerstätten wurden in den frühen Abbauphasen zudem mehrere Schurfschächte abgeteuft bzw. ab 1958 zahlreiche Kernbohrungen abgeteuft. Die nach Abschluss der Abbautätigkeit 1965 im Tagbau zurückgelassenen Grafit-Restpfeiler stehen u.a. auch im ursächlichen Zusammenhang mit der zunehmenden Pyritführung (unverwittert), die eine Bauwürdigkeit dieser Lagerstättenteile zum damaligen Zeitpunkt stark einschränkte. In der Bearbeitung der Lagerstätte durch MÜLLER (2016) wird von einer aktuell im Tagbau noch verfügbaren Grafit-Durchschnittsmächtigkeit von 8 m ausgegangen. Bezogen auf eine Bergbaufläche von rund 2 ha ergibt sich daraus ein Restpotenzial von 430.000 t Grafit-schiefern. Das entspricht bei einem durchschnittlichen TOC-Gehalt von 30 % etwa 130.000 t Rohgrafit. Nicht berücksichtigt in diesen Berechnungen ist die Fortsetzung der Grafitlinse unterhalb der ersten Tagbausohle.

Die Grafitlagerstätte Zettlitz ist unterhalb der Talsohle des Brunnbachgrabens offensichtlich noch weitgehend unverritz. Die weitere Erkundung der Tiefenfortsetzung der Lagerstätte in westlicher

Richtung war aus historischer Sicht aber kein strategisches Ziel des ehemaligen Bergbaus. Die Gewinnung des Grafits wäre in diesem Bereich nämlich ausschließlich im kostenintensiven Untertagebau möglich gewesen. Dazu kommen noch qualitative Vorgaben für den damaligen Haupteinsatzbereich des Grafits als Zuschlag für die Hochofenindustrie, was eine wirtschaftliche Verwertung der unverwitterten, pyritreichen Grafite unterhalb der Talsohle ausschloss. Aus der bekannten Aufschlusskonfiguration der Grafitlinse im Tagbau geht man von einem tektonisch stark eingeeengten Grafitkörper aus, der möglicherweise nur in Richtung W bis NW eine Fortsetzung unbekannter Dimension besitzt. Unter Einbeziehung eines kontinuierlichen Einfallens des Grafitkörpers von 35° in W-SW-Richtung und unter Annahme eines homogenen Grafitkörpers mit einfacher s-paralleler Geometrie ergäbe dies eine projizierte Tiefenlage des Grafitkörpers von rund 30 m unter der Talsohle. Es ist aber davon auszugehen, dass die Struktur des Grafitkörpers tektonisch sehr stark überprägt ist und dieser zu einem linsenförmigen, unregelmäßigen Lagerstättenkörper deformiert wurde. Das geologische E-W-Profil durch die Lagerstätte kann aber auch als tektonische Einmündung interpretiert werden. Der östlich des Brunnenbachgrabens im Liegenden des Grafits auftretende Kalkmarmor würde dann westlich des Brunnenbachgrabens das Hangende des Grafits bilden. Im diesem Fall wäre der Grafitkörper durch die Geometrie der Muldenstruktur in seiner westlichen Fortsetzung stark eingeeengt, da Kalkmarmor bereits unmittelbar westlich der Talbegrenzung ansteht. Die Ausdehnung der Grafitlinse unter der Talsohle wäre in dieser Konfiguration tektonisch bedingt dann doch deutlich reduziert.

4.2 Ergebnisse Messung Eigenpotenzial (SP)

Im Untersuchungsgebiet Zettlitz wurden für die SP- Messungen 3 Teilbereiche herangezogen (siehe Abb. 36). Bis auf einen flächig vermessenen Bereich bei Wollmersdorf, wo auch für die geochemische Analyse Bodenproben genommen wurden, erfolgten die SP Messungen ausschließlich entlang von Profilen.

In Abb. 37 sind SP Messpunkte des nordwestlichen Teilbereichs dargestellt. Klar zu sehen ist, dass die SP-Profile über den zuletzt aktiven Abbaubereich (nördliches SP-Profil) wie erwartet sehr niedrige Spannungswerte zeigen. Bei genauer Betrachtung ist auch zu sehen, dass eine laterale Abgrenzung der grafitreichen Bereiche (innerhalb der beiden Störungen) anhand der SP Werte möglich ist. Im Gegensatz dazu zeigen die SP-Werte entlang des an der Straße gelegenen Profils (Talsohle) aufgrund der hier vorhandenen Überdeckung der grafitführenden Schicht (basierend auf dem geologischen Schnitt von Abb. 32 zumindest 30-40 m) keine entsprechenden Anomalien. Daran zeigt sich, dass bei entsprechend kleinräumigen Störkörpern eine möglichst geringe Überdeckung vorherrschen sollte, um entsprechend eindeutige Signaturen in den SP-Werten erkennen zu können.

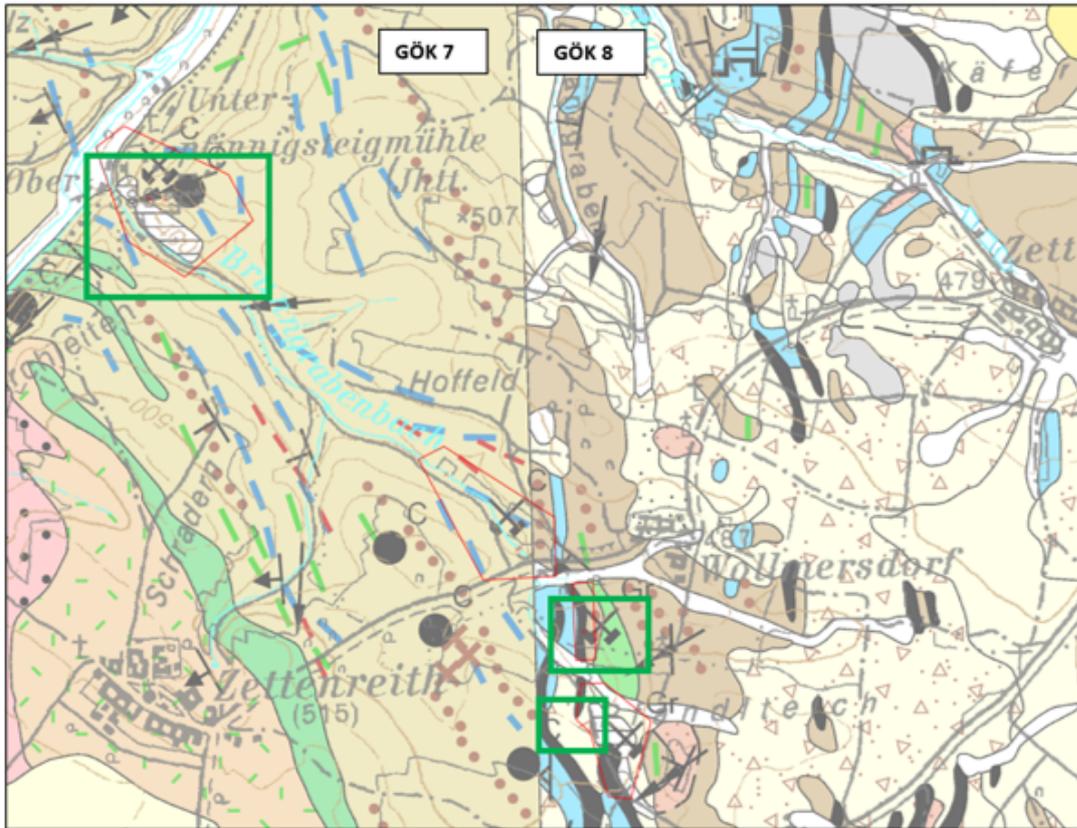


Abb. 36: Lage der Untersuchungsgebiete im Raum Zettlitz auf GK 7 und GK 8 (THIELE, O.; JENCEK, V. & MATEJOVSKA, O., 1987; ROETZEL, R. & FUCHS, G., 2001)

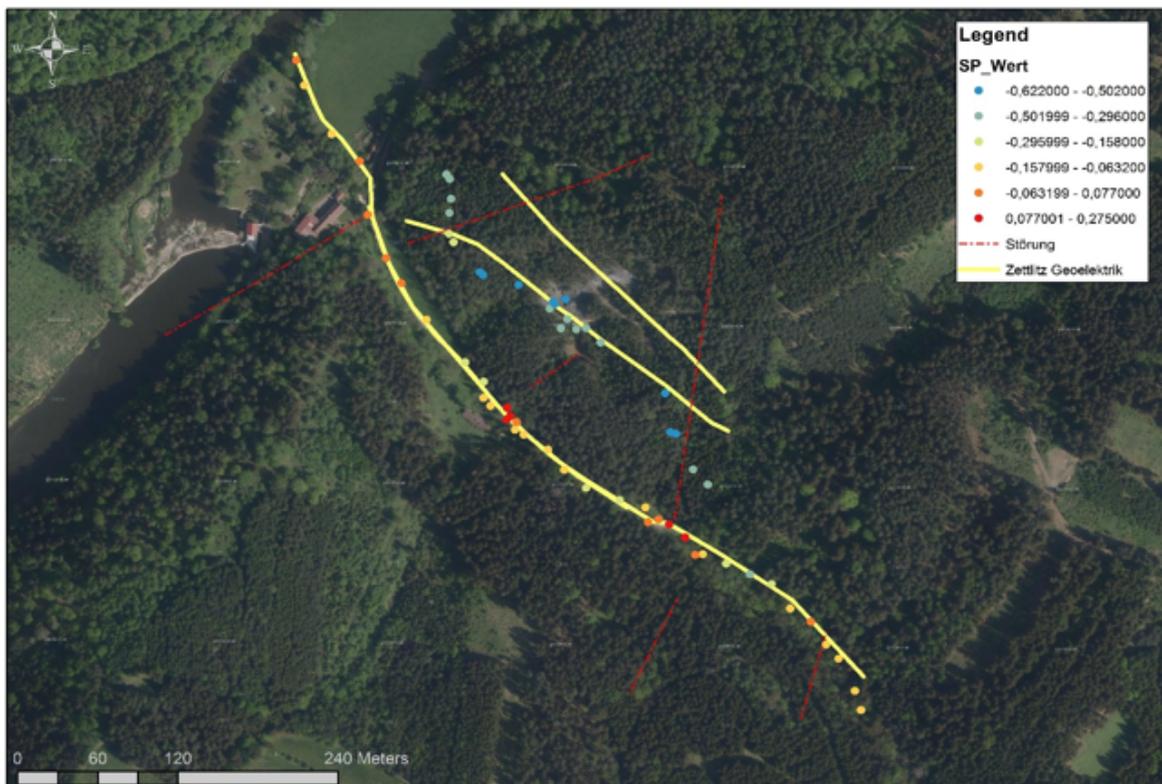


Abb. 37: Lageplan der SP-Messpunkte und der geoelektrischen Messprofile im Bereich des nordwestlichen Untersuchungsgebietes



Abb. 38: Lageplan der SP-Messpunkte und der geoelektrischen Messprofile im Bereich der beiden südlichen Untersuchungsgebiete

Die SP-Messpunkte in den beiden südlichen Teilbereichen des Untersuchungsgebietes wurden in mehreren zeitlich weit auseinander liegenden Messkampagnen akquiriert. Zudem wurde keine einheitliche Referenzelektrode verwendet. Daher sind die absoluten Werte der SP Messung in Abb. 38 nicht von Relevanz. Es ist vielmehr die Änderung von höheren zu niedrigeren Werten (unabhängig vom absoluten Wert) für einzelne Teilbereiche zu betrachten. Der Vergleich zur Lage der kartierten Grafitlinsen zeigt eine sehr gute Korrelation mit (relativ) niedrigen SP Werten. Zudem konnte im Bereich der flächigen SP-Messpunktaufnahme eine gute Übereinstimmung mit den geochemischen Analysen hergestellt werden. Auf Basis der SP Anomalien wurden die entsprechenden Positionen der geoelektrischen Messprofile festgelegt.

4.3 Ergebnisse Geoelektrik/Induzierte Polarisation (IP)

Im Untersuchungsgebiet Zettlitz (NÖ) wurde, gemeinsam mit der TU Wien, im Bereich des zuletzt aktiven Grafitabbaus eine umfangreiche Messkampagne (IP Messungen im Frequenzbereich) durchgeführt. In Abb. 39 ist die Lage der 3 Profile dargestellt. P1 befindet sich außerhalb des ehemaligen Abbaubereichs, P2 und P3 wurden in 2 verschiedenen Abbauetagen parallel zur Abbaufont gemessen. Ziel war eine (zumindest) laterale Abgrenzung der grafitführenden Bereiche.

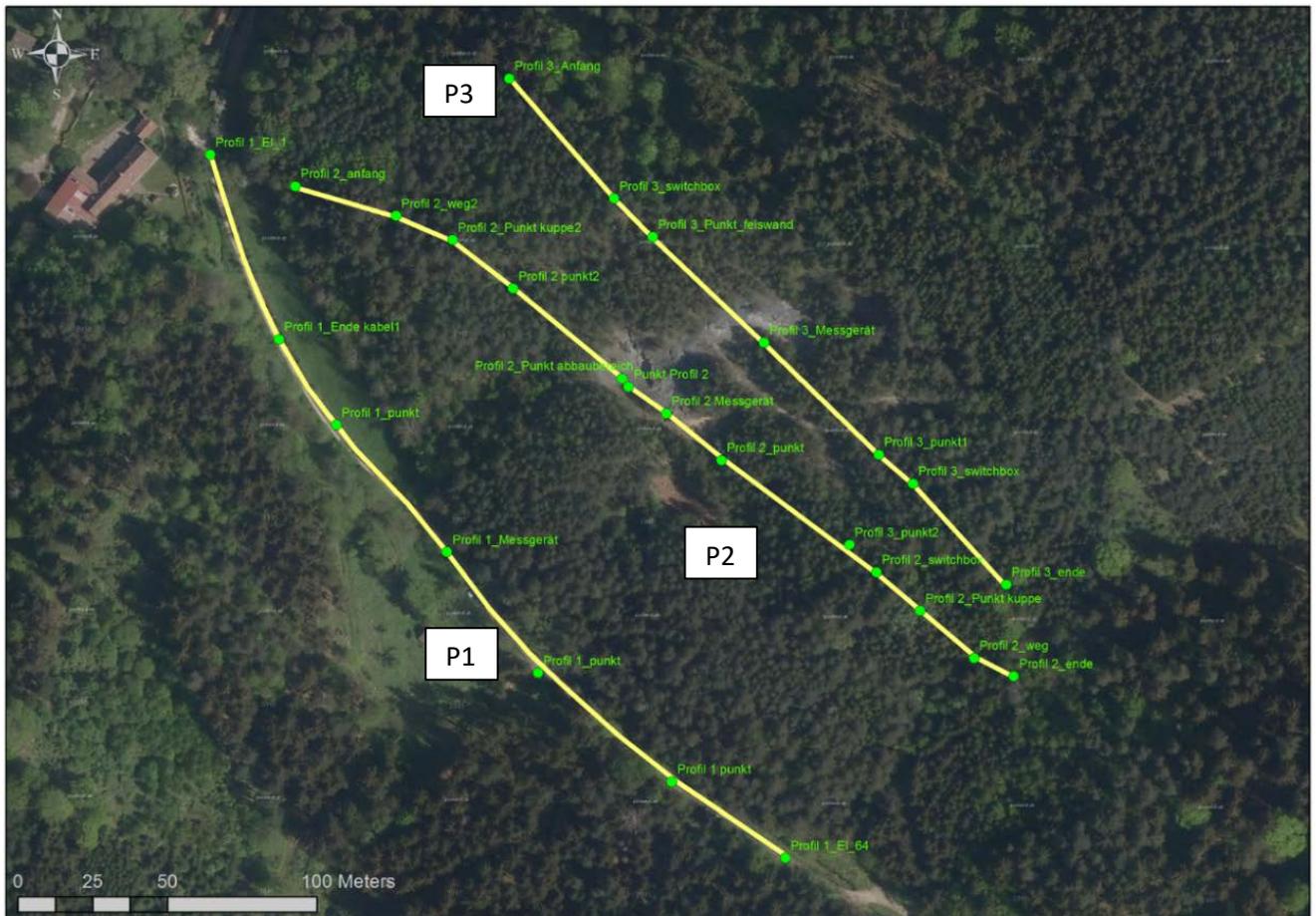


Abb.39: Lage der geoelektrischen Profile im Untersuchungsgebiet Zettlitz (zuletzt aktiver Abbaubereich)

Alle in diesem Teil des Untersuchungsgebietes erfolgten IP-Messungen im Frequenzbereich (SIP) wurden durch die Arbeitsgruppe Geophysik der TU Wien mit einer MPT DAS-1 Apparatur durchgeführt. Zusätzlich wurden Labormessungen des IP Frequenzeffektes (Messungen zwischen 0,01 und 10,000 Hertz (Hz)) an synthetischen Proben zur Charakterisierung und damit eines besseren Verständnisses des elektr. Responses von grafithaltigem Material durchgeführt. Ein detaillierter Bericht zu den geoelektrischen Untersuchungen der AG Geophysik der TU-Wien befindet sich im Anhang.

Im Weiteren werden die ersten Interpretationen für die in Abb. 39 dargestellten geoelektrischen Profile beschrieben. In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 40 bis Abb. 42) der einzelnen Profile ist das Inversionsergebnis, elektr. Widerstand links und Phasenverschiebung aus der SIP Messung, rechts dargestellt.

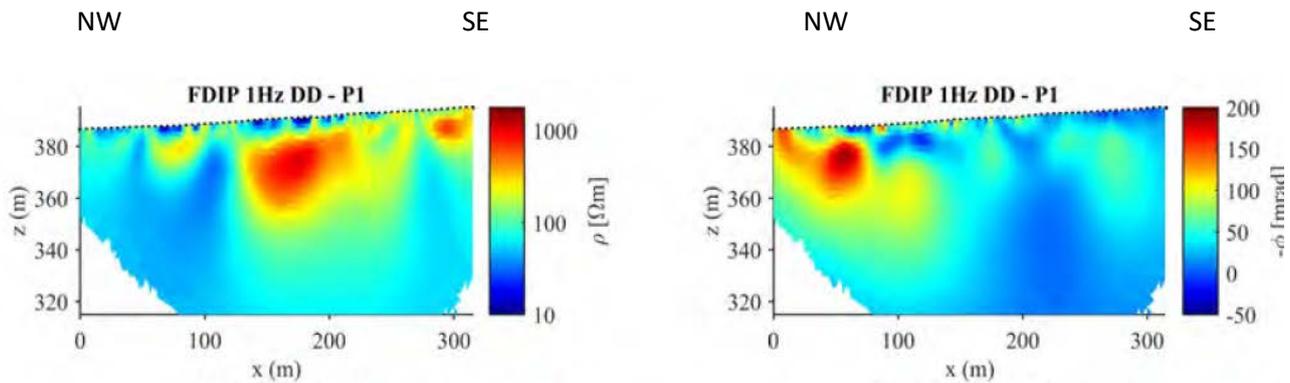


Abb. 40 : SIP Ergebnis für Profil P1 - elektr. Widerstand (links) und Phasenverschiebung (rechts) bei 1 Hz

Das Profil 1 (P1) wurde entlang des Brunnenbaches zur Erkundung der Tiefenfortsetzung des Grafitvorkommens in westlicher Fortsetzung zum Abbaubereich angesetzt. Strukturdaten aus dem ehemaligen Tagbau lassen eine Tiefenfortsetzung in westlicher Richtung durchaus für möglich erscheinen. Unter Einbeziehung eines kontinuierlichen Einfallens des Grafitkörpers von 35° in W-SW-Richtung ergäbe dies eine projizierte Tiefenlage des Grafitkörpers von rund 30 m unter der Talsohle. Dies würde aber einen homogenen Grafitkörper mit einfacher s-paralleler Geometrie voraussetzen, wie durchwegs in den bekannten E-W-Profilen durch die Lagerstätte angedeutet (vgl. MÜLLER, 2017). Die Struktur der Grafitkörper im Raum Zettlitz ist jedoch tektonisch sehr stark überprägt, so dass der Grafit offensichtlich tektonisch zu einem linsenförmigen Körper ausgewalzt ist und damit einen sehr unregelmäßigen Lagerstättenkörper bildet.

Der genaue Tiefenverlauf dieser Grafitlinsen lässt sich aus den aktuellen Oberflächenbefunden aufgrund der komplexen tektonischen Beanspruchung ohne Bohraufschlüsse meist nur schwer prognostizieren. Selbst in den Abbaubereichen sind nur bedingt Aussagen über den weiteren Verlauf dieser Grafitlinsen im Untergrund möglich. Die weitere Erkundung der Tiefenfortsetzung der Lagerstätte in westlicher Richtung war aus historischer Sicht kein strategisches Ziel des ehemaligen Bergbaus. Die Gewinnung des Grafits wäre in diesem Bereich nämlich ausschließlich im kostenintensiven Untertagebau möglich gewesen. Dazu kommen noch qualitative Vorgaben für den damaligen Haupteinsatzbereich des Grafits als Zuschlag für die Hochofenindustrie. Im oberflächennahen Bereich sind die störenden Pyrit-Beimengungen durch die Verwitterung weitgehend in unterschiedlich Hydroxidphasen umgewandelt, während ab der tiefsten Sohle des Tagbaus verstärkt unverwitterte Pyriteinschlüsse im Grafit auftreten.

Aus den Erfahrungen bei anderen Grafitlagerstätten der Bunten Serie ist bekannt, dass Grafitkörper als Folge der wiederholten tektonischen Durchbewegung und Umkristallisationen zum Teil bemerkenswerte Verformungstypen mit erheblichen Mächtigkeitsschwankungen auf relativ kleinem Raum zeigen. Aus der bekannten Aufschlusskonfiguration der Grafitlinse im Tagbau geht man von einem tektonisch stark eingegengten Grafitkörper aus, der möglicherweise nur in Richtung NW eine Fortsetzung unbekannter Dimension besitzt.

Die Verteilung des spez. elektr. Widerstandes im Messprofil P1 zeigt über die gesamte Profillänge sehr unterschiedliche Muster. Während im NW-Drittel des Messprofils (10-150 m) ab einer Teufe von 380 m SH mit Ausnahme einer seicht gelegenen, etwas höherohmigen Anomalie (60-90 m) fast durchwegs sehr niederohmigen Bereiche dominieren, überwiegen im Südteil des Profils im selben Tiefenbereich teilweise sehr hochohmige Strukturen. In der Profildarstellung der Phasenverschiebung zeigt sich eine

extrem hohe Anomalie (bis zu 200 mrad) vor allem im Bereich zwischen den Profilmeter 40 und 70. Der etwas tiefer gelegene Bereich (20-45 m u. GOK) im Profilschnitt zwischen 60 und 150 m wird seitens der Geophysik als mögliche Fortsetzung des im Tagbaubereich aufgeschlossenen Grafit interpretiert. Die höheren Absolutwerte ($-\Phi > 50$ mrad) zu Beginn des Profils, wo in der geologischen Karte eigentlich Kalzitmarmor ausgewiesen ist, wären als Grafitzwischenlagen innerhalb des Marmors interpretierbar. Der stark deformierte und wahrscheinlich linsenförmig auskeilende Grafit dürfte in seiner westlichen Fortsetzung vor allem auf den nordwestlichen Abschnitt des Profils beschränkt sein. Obwohl der Grafitkörper im SW-Bereich des Tagbaus ein durchschnittliches Einfallen gegen SW zeigt, könnte hier zudem eine weitere Fortsetzung der Lagerstätte tektonisch abgeschnitten sein. Das geologische E-W-Profil durch die Lagerstätte kann aber auch als tektonische Einmündung interpretiert werden. Der östlich des Brunnenbachgrabens im Liegenden des Grafit auftretende Kalkmarmor würde dann westlich des Brunnenbachgrabens das Hangende des Grafit bilden. Im Fall einer solchen Situation wäre der Grafitkörper durch die Geometrie der Muldenstruktur in seiner westlichen Fortsetzung stark eingengt, da Kalkmarmor bereits unmittelbar westlich der Talbegrenzung ansteht. Genauere Informationen zum Liegenden des Grafit lassen sich aus den IP-Messungen jedoch nicht ableiten. Die Bereiche mit höheren Widerstandswerten im SE-Bereich des Profils P1 dürften aber mit den vorherrschend in diesem Bereich auftretenden Gneisen korrelieren. Laut GK 7 (THIELE et al., 1987) sind parallel zum Talbereich aber auch immer wieder geringmächtige Marmorlagen eingeschaltet, an deren Kontakten zu den Gneisen sehr häufig weitere geringmächtige Grafitlinsen auftreten. Inwieweit solche geologische Situationen durch niederohmige Strukturen in diesem Profil ab etwa Profilmeter 260 wiedergegeben sind, kann ohne weitere Geländebefunde derzeit noch nicht beurteilt werden. Seitens der Geophysik werden auch mögliche Einflussfaktoren von unkonsolidiertem, grafitreichen Hangschuttmaterial aus dem Tagbaubereich diskutiert.

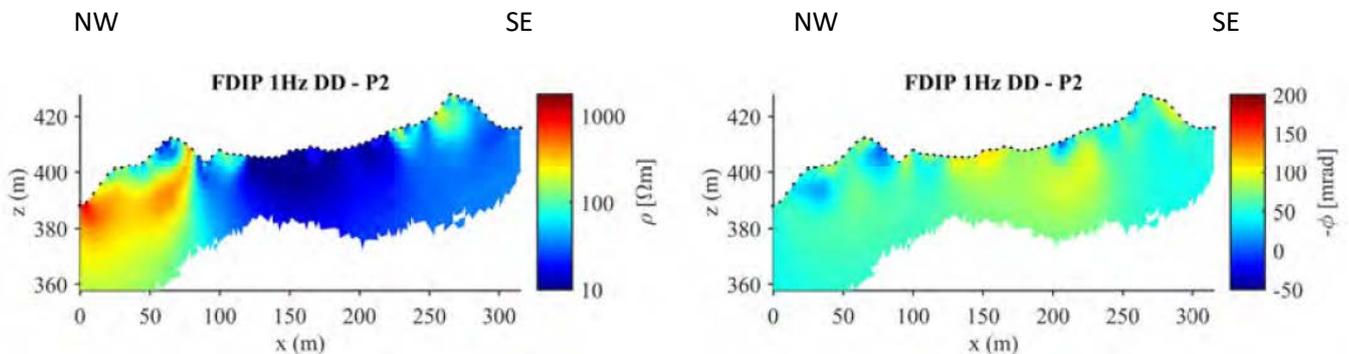


Abb. 41 : SIP Ergebnis für Profil P2 - elektr. Widerstand (links) und Phasenverschiebung (rechts) bei 1 Hz

Zwischen 120 und 250 m ist der Grafitkörper im Profil 2 sehr markant mit niedrigen Widerstandswerten indiziert. In diesem Bereich des Tagbaus sind laut vorhandenen Archivunterlagen noch Grafit-Restmächtigkeiten von über 8 m (max. 15 m) zu erwarten. Der niederohmige Bereich im Profil P2 (Abb. 41) dürfte im Gegensatz zur nachgewiesenen Grafitmächtigkeit mit indizierten Mächtigkeiten bis 30 m deutlich überdimensioniert sein (vgl. Kapitel 3.4). Der Einfluss der Pyritverwitterung und die Migration von Eisenhydroxiden innerhalb des Grafitkörpers dürften hier ebenfalls Ursache für die gemessenen geringen elektrischen Widerstandswerte sein. Das ist möglicherweise auch der Grund, warum die Grenze zu den liegenden Kalkmarmoren in diesem Messprofil nicht indiziert ist. Der im NW-Teil des Profils durch eine Störungszone (MÜLLER, 2016) begrenzte, hangende Gneis ist im Profil hingegen sehr

gut erfasst. Die steilstehende Kontaktfläche zwischen Grafitkörper und Gneis lassen hier eher eine steilstehende Störungszone vermuten.

Im IP-Effekt bei 1 Hz erkennt man innerhalb der indizierten Grafitlinse noch einige komplexe Internstrukturen. Diese Strukturen widerspiegeln möglicherweise die mehrphasigen Deformationsprozesse innerhalb des Grafitkörpers. Die Grafitkörper sind meist tektonisch zu linsenförmigen Körpern ausgewalzt und bilden damit sehr unregelmäßige Lagerstättenkörper mit variablen Grafitausbildungen. Die geologische Detailaufnahme des Grafitbergbaus von HOLZER & HOFBAUER (1962) zeigt im Bereich des Profils P2 insgesamt fünf sattel- bis walzenförmige Aufwölbungen der Grafitschiefer, die den Mustern in der Phasenverschiebung entsprechen könnten. Diese internen Strukturen werden verstärkt in den Ergebnissen der 2. Messkampagne mit unterschiedlichen Pulsängen wiedergegeben. Die geologische Überlagerung durch Gneise am SE-Ende des Profils weist anders als zum Profilbeginn im NW nur intermediäre Widerstandswerte auf.

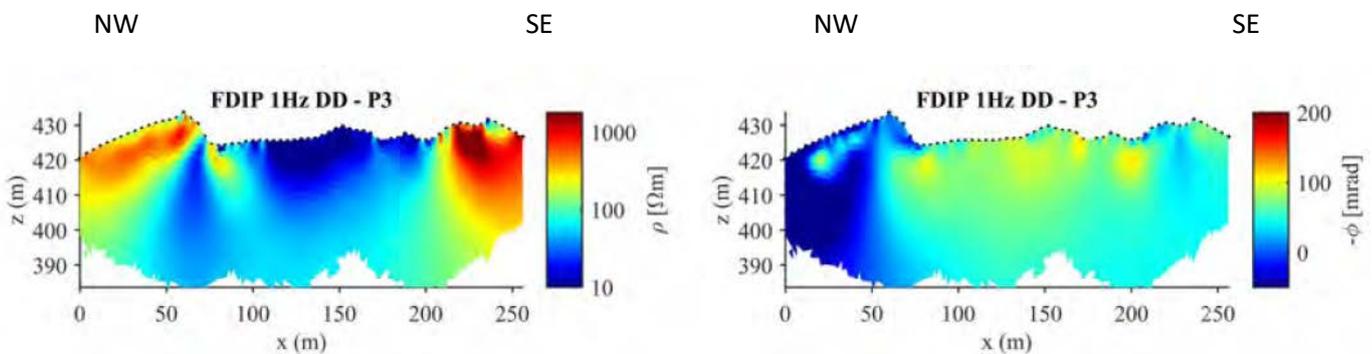


Abb. 42 : SIP Ergebnis für Profil P2 - elektr. Widerstand (links) und Phasenverschiebung (rechts) bei 1 Hz

Das Profil P3 wurde im oberen Etagenbereichen des Tagbaus angesetzt. Die Grafitlinse wird in diesem Profil zwischen Profilmeter 80 und 220 m durch sehr geringe Widerstände ebenfalls sehr gut erfasst. Die Basis des Grafitkörpers (Kalkmarmore) ist in diesem Messprofil ebenso wie in Profil P2 nicht eindeutig indiziert. Diskrepanzen gegenüber der geologischen Karte von MÜLLER (2016) ergeben sich hinsichtlich der Überlagerung durch Gneise am NW-Ende des Profils P3. Während die Situation am SE-Ende des Profils mit sehr hohen Widerstandswerten sehr gut erfasst ist, korrespondieren die Messergebnisse am NW-Ende des Profils nicht mit der geologischen Karte von MÜLLER (2018). Die gemessenen anomalen Werte reichen im Profil bis zu Profilmeter 57, während die in der geologischen Karte ausgewiesene Grenze zum Gneis rund 30 m NW davon liegt. In der geologischen Detailaufnahme von HOLZER & HOFBAUER (1962) geht aber eindeutig hervor, dass die Gneisüberlagerung bis zur Tagbaugrenze weiterreicht. Das entspricht dann wieder sehr gut den gemessenen Ergebnissen für den elektrischen Widerstand in Profil P3. Der mittelsteil gelegene, höherohmige Anomaliebereich entspricht in diesem Profilabschnitt zudem nicht unbedingt einer steilen Störungszone wie in der Karte von MÜLLER (2016) ausgewiesen, sondern korrespondiert eher mit einem fensterförmigen Aufbruch einer Grafitlinse, wie auch von WEBER (1987) schon vermutet. Der Grafit-höfliche Bereich befindet sich im Profil P3 zwischen Profilmeter 57 und 208, wobei dieser bis etwa 15m unter GOK reicht. Die Absolutgehalte im IP-Effekt sind für den ausgewiesenen Grafit-höflichen Bereich sehr hoch ($-\Phi > 100$ mrad). Innerhalb dieses Bereichs sind interne Muster angedeutet, die möglicherweise mit den bereits erwähnten komplexen Deformationsprozesse und damit verbundenen Inhomogenitäten innerhalb des Grafitkörpers zusammenhängen.

Zur Reduktion messtechnischer Störfaktoren (elektromagnetische Kopplungseffekte) und damit zur besseren Detailauflösung wurde der niederohmige Profilabschnitt im aufgeschlossenen Grafittagbau nochmals mit einer neuen Messkonfiguration vermessen. Die Messungen wurden mit unterschiedlichen Pulslängen (0,25 s, 0,50 s, 1,0 s) durchgeführt. Im elektrischen Widerstand zeigen sich bei den unterschiedlichen Pulslängen keine signifikanten Unterschiede. Bei der Phasenverschiebung aus der IP-Messung nehmen die absoluten Werte der Phasenverschiebung jedoch mit zunehmender Pulslänge zu. Im Bereich des geologisch indizierten Grafitkörpers werden die Internmuster im Grafitkörper in diesen Messprofilen deutlich sichtbar. Die von HOLZER & HOFBAUER (1962) im NE-Bereich des Tagbaus beobachteten insgesamt 5 walzenförmige Aufwölbungen mit WSW- bis SW-tauchenden Faltenachsen werden vom Messprofil in etwa senkrecht angeschnitten. Die unterschiedlichen absoluten Werte bei der Phasenverschiebung mit zunehmender Pulslänge könnten möglicherweise stofflich variablen Grafitzusammensetzungen entsprechen. Die Variationsbreite der Grafite in Zettlitz reicht von extrem hochreinen Grafiten über Grafite mit einem hohen Anteil an unverwittertem Pyrit (Liegendbereich) bzw. verwittertem Pyrit (Hangendanteil) bis hin zu Grafiten mit geringmächtigen Marmorzwischenlagen. Die Ergebnisse und weitere Resultate von ergänzenden Messkampagnen sind in dem im Anhang befindlichen Endbericht der TU Wien, AG Geophysik beschrieben.

Abb. 39 zeigt den Lageplan der geoelektrischen Profile (und der Ergebnisse der SP Messungen) im Untersuchungsgebiet Wollmersdorf.



Abb.43: Lageplan der geoelektrischen Profile im südlichen Untersuchungsgebiete bei Wollmersdorf inklusive Darstellung der SP-Messpunkte

Das geoelektrische Profil P5 (Abb. 44 zeigt eine detaillierte Lage des Profils P5 und Werte der SP Kartierung) wurde einmal mit einer Auslage von 61 Elektroden (Elektrodenabstand 3 m) und ein zweites Mal mit nur 42 Elektroden mit gleichen Elektrodenabstand gemessen. Das Ergebnis des ersten Datensatzes ist in Abb. 45 dargestellt.



Abb.44: Detaillageplan des geoelektrischen Profils P5 inklusive Darstellung der SP-Messpunkte

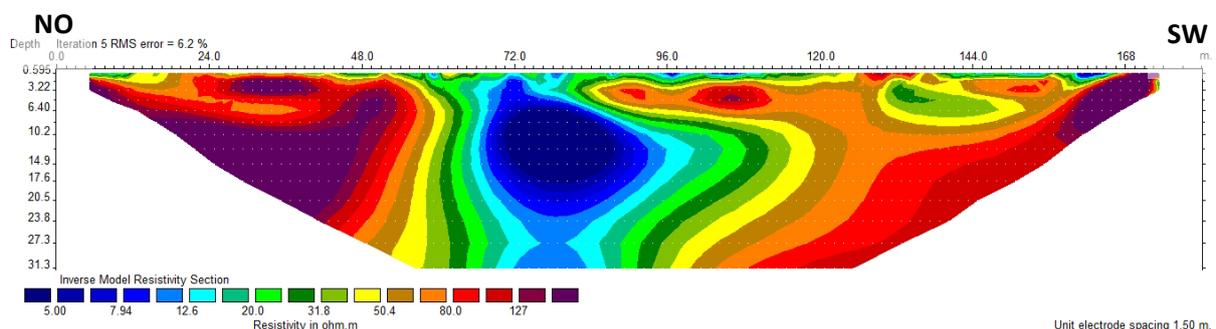


Abb. 45: Inversionsergebnis von Profil P5; dargestellt ist das Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes, Ergebnis Geomon4D (61 Elektroden)

Hierfür wurde das Messsystem Geomon4D verwendet wodurch nur der spez. elektr. Widerstand bestimmt werden kann (kein IP Effekt). Das Ergebnis zeigt eine klar abgegrenzte Anomalie mit sehr niedrigen spez. elektr. Widerstand, deren Lage einerseits sehr gut mit dem Minimum in den SP-Werten und andererseits mit der kartierten Grafitlinie korreliert. Daher kann der Bereich mit niedrige spez.

elektr. Widerstand eindeutig dem grafitreichen Bereich zugeordnet werden. Im abgebildeten Ergebnis (Abb. 45) deutet sich auch an, dass der grafitreiche Bereich auch in vertikaler Richtung anhand des spez. elektr. Widerstand abgegrenzt werden kann. Hier sollten allerdings die Erkenntnisse aus der einfachen Modellrechnung aus Kapitel 3.4 berücksichtigt werden, wonach genaue Aussagen über Untergrundbereiche unter der grafitreichen Schicht problematisch sein können.

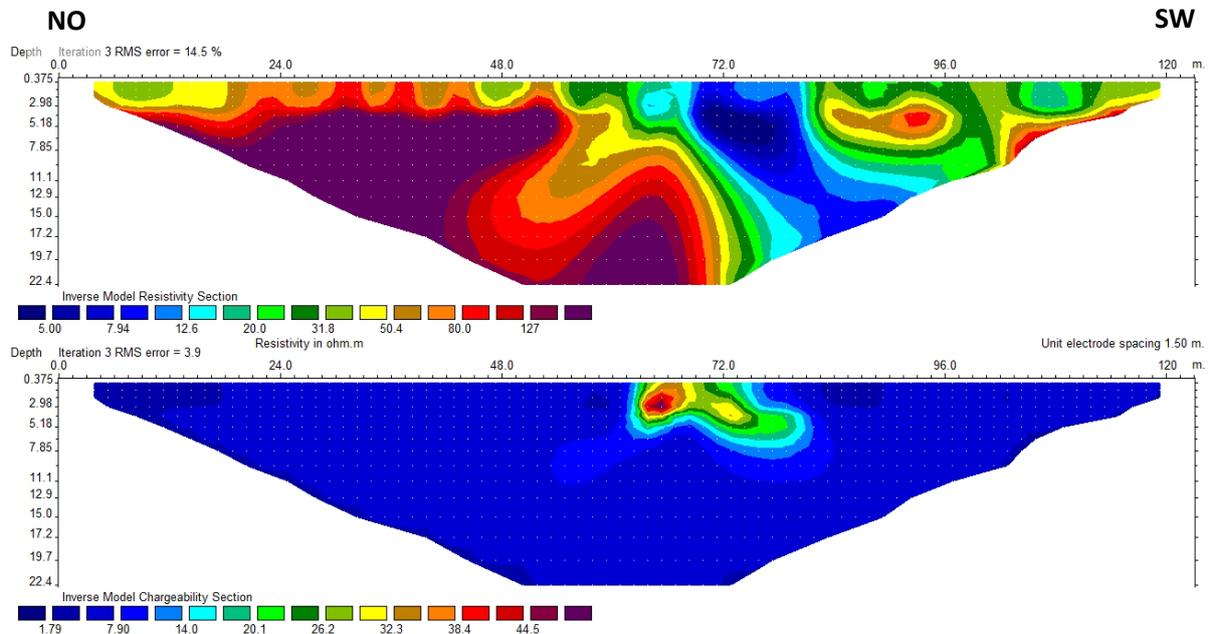


Abb. 46: Inversionsergebnis von Profil P5; dargestellt ist das Model des spezifischen elektrischen Widerstandes und die integrale Aufladbarkeit (gemessen wurde mit dem Messsystem AGI Super Sting)

In Abb. 46 ist das Ergebnis des zweiten Datensatzes von Profil P5 dargestellt. Hier wurde das Profil auf 42 Elektroden bei gleichbleibendem Elektrodenabstand reduziert, wodurch sich der Betrachtungsbereich einfach auf die ersten 123 Profilmeter von Abb. 45 reduziert. Der Einsatz des AGI Super Sting© ermöglichte es in diesem Fall eine IP Messung durchzuführen, wodurch das Ergebnis in Abb. 46 auch das Model der integralen Aufladbarkeit beinhaltet. Die Verteilung des spez. elektr. Widerstandes zeigt bei Berücksichtigung des reduzierten Messbereichs (im Vergleich zu Abb. 45) kaum nennenswerte Unterschiede – auch hier kann der Bereich der kartierten Grafitlinie ganz klar der Anomalie mit niedrigen spez. elektr. Widerstand zugeordnet werden. Das Ergebnis der integralen Aufladbarkeit zeigt auch in diesem Bereich eine deutliche Anomalie, die allerdings ganz klar auf den oberflächennahen Bereich beschränkt ist – eine ähnliche Charakteristik wurde auch bei Messprofilen im Untersuchungsgebiet Amstall/Weinberg beobachtet. Auch hier bleibt mangels genauere Tiefeninformation, die Frage offen ob der stark grafithaltige Bereich nur auf die Anomalie der integralen Aufladbarkeit beschränkt ist, oder ob diese hauptsächlich den verwitterten grafithaltigen Bereich darstellt (siehe dazu Interpretation von Profil 2, 4 und 5 im Untersuchungsgebiet Amstall/Weinberg).

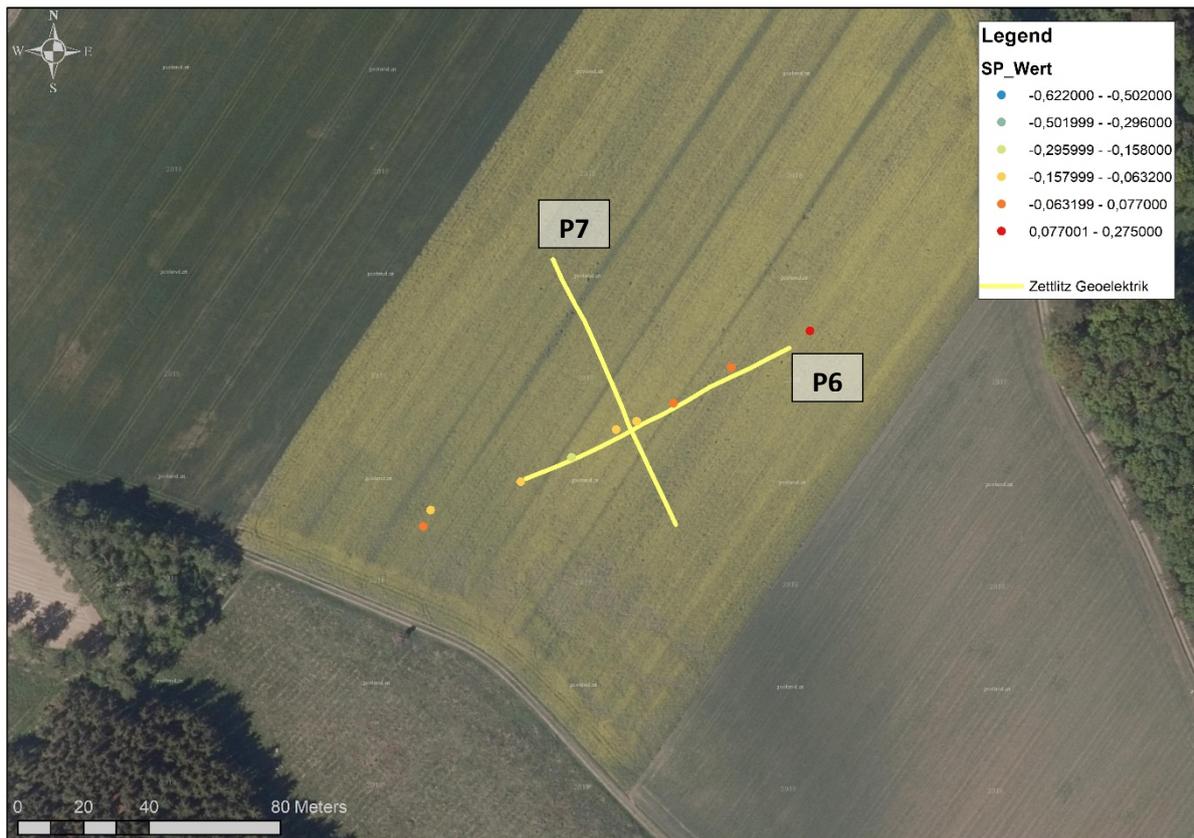


Abb. 47: Detaillageplan der geoelektrischen Profile P6 und P7 inklusive Darstellung der SP-Messpunkte

Diese beiden Messprofile wurden ebenfalls im Bereich einer kartierten Grafitlinse positioniert. Das Ziel der 90° zueinander stehenden Profile war es, Informationen über eine etwaige Anisotropie des spez. elektr. Widerstandes zu bekommen. Die Lage und ein Situationsfoto zeigen die Abbildungen 47 und 48. Aus Zeitgründen konnte nur bei Profil 6 (rechtwinklig zum Streichen der kartierten Grafitlinse) zusätzlich zur Widerstandsmessung eine IP-Messung mit dem neuen Messsystem Geomon4D-IP durchgeführt werden – somit ist nur für dieses Profil auch eine Verteilung der Aufladbarkeit des Untergrundes verfügbar.

Die Inversionsergebnisse von Profil 6 und 7 (nur spez. elektr. Widerstand) sind in Abb. 49 dargestellt. Profil 6 zeigt zwei markante Anomalien mit niedrigen spez. elektr. Widerstand im nordöstlichen und südwestlichen Bereich des Messprofils. Im Zentralen Bereich erstreckt sich eine Zone mit relativ hohen Werten des spez. elektr. Widerstandes. Geht man davon aus, dass die Bereiche der niederohmigen Anomalien dem grafitreichen Untergrundbereich zuzuordnen sind, wurde die kartierte Grafitlinse nicht wie gewünscht mit dem zentralen Bereich des Messprofils erfasst. Um dennoch eine gute Vergleichbarkeit der tiefenabhängigen Widerstandsverteilung der beiden Kreuzungsprofile am Kreuzungspunkt zu bekommen, wurde Profil 7 nicht zentral in den Bereich der niederohmigen Anomalie im südwestlichen Bereich von Profil 6 gelegt, sondern soweit Richtung NO verschoben damit die maximale Eindringtiefe von Profil 6 verfügbar ist. Das Ergebnis von Profil 7 zeigt ganz deutlich, dass der Bereich der Kreuzungspunkte sehr gut vergleichbar ist und die kartierte Grafitlinse nur im nordwestlichen Bereich des Profils optimal erfasst wird (sehr niedrige Werte des spez. elektr. Widerstandes).



Abb. 48: Situationsfoto der Feldmessung von Profil 6 und Profil 7

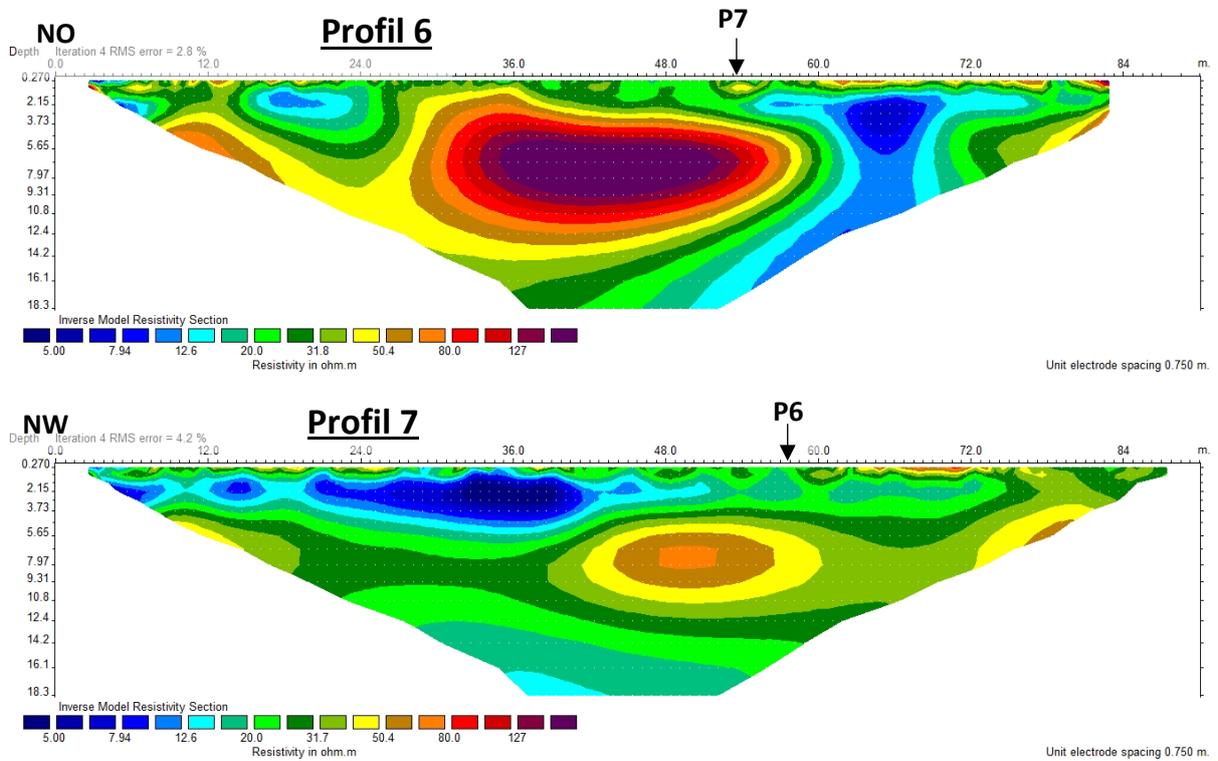


Abb. 49: Inversionsergebnis von Profil 6 und Profil 7; dargestellt ist das Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes und die jeweiligen Kreuzungspunkte der beiden Messprofile

Die niederohmige Anomalie scheint hier im Gegensatz zu Profil 6 (Anomalie im SW) recht klar in ihrer Tieferenstreckung begrenzt zu sein, allerdings muss auch hier wieder auf die Ergebnisse der Modellrechnung aus Kapitel 3.4 verwiesen werden. Hinsichtlich der Richtungsabhängigkeit des spez. elektr. Widerstandes scheint es hier keine signifikanten Unterschiede zu geben, wenn man die Minimalwerte des spez. elektr. Widerstandes zwischen den beiden Profilen vergleicht. Allerdings muss gesagt werden, dass für die exakte Bestimmung einer etwaigen Anisotropie mit Sicherheit Labormessungen notwendig sind und anhand der Feldmessung nur eine erste Abschätzung erfolgen kann. Hier zeigt sich, dass keine Richtungsabhängigkeit zu beobachten ist.

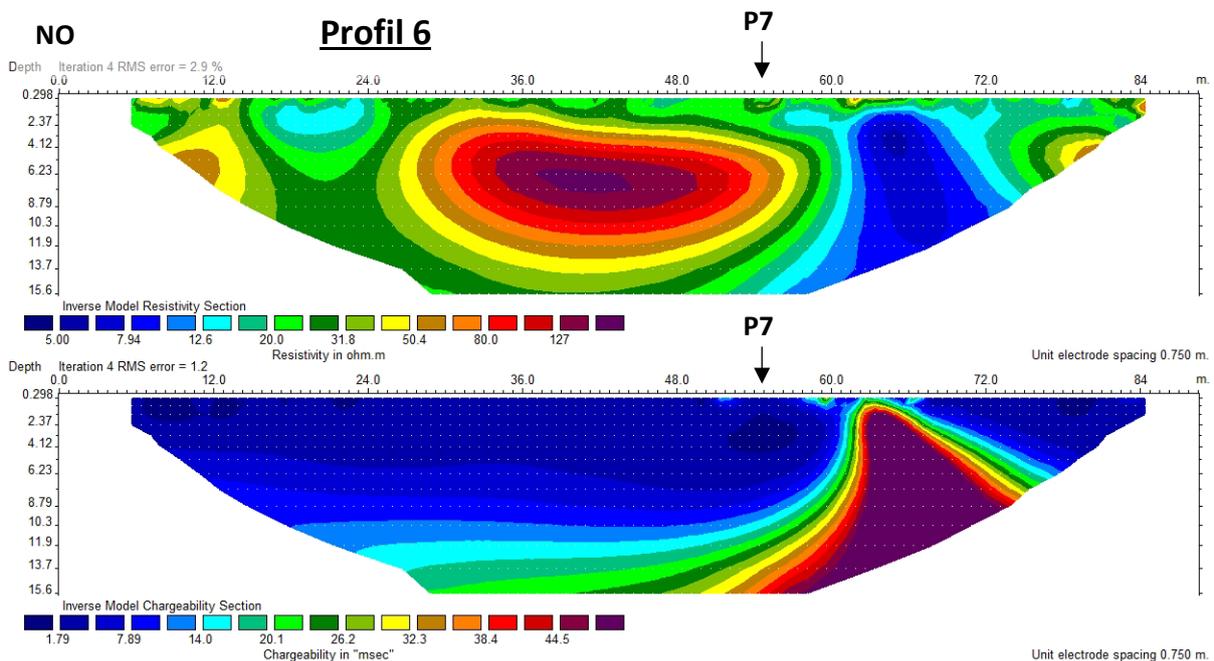


Abb. 50: Inversionsergebnis von Profil P6; dargestellt ist das Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes und die integrale Aufladbarkeit (gemessen wurde mit dem Messsystem Geomon4D-IP, wobei der IP im Zeitbereich über eine Periode von 1s aufgezeichnet wurde)

Die Darstellung der Verteilung des spez. elektr. Widerstandes in Abb. 50 unterscheidet sich in einigen Bereichen ein wenig von jener aus Abb. 49 (obere Darstellung). Der Hauptgrund dafür liegt in einer anderen Messpunktverteilung (und vor allem in der reduzierten Anzahl der Messpunkte aufgrund der langen Messdauer der IP-Messung), die auch dazu führt, dass eine geringere maximale Eindringtiefe erreicht wird. Im Großen und Ganzen sind die dominanten Widerstandsstrukturen jedoch gut vergleichbar. Die Darstellung der Aufladbarkeit auf Basis der IP Messung zeigt eine massive Anomalie, die auf den Bereich des sehr niedrigen spez. elektr. Widerstandes im SW des Profils beschränkt ist. Dieser Bereich entspricht dem der kartierten Grafitlinse. Im Gegensatz zu den anderen Messprofilen, bei denen die integrale Aufladbarkeit betrachtet wurde, zeigt die Anomalie hier keine erkennbare Tiefenbeschränkung. Da sich die Anomalie eher im Randbereich des Profils befindet ist hier eine gesicherte Aussage allerdings schwierig – dennoch kann davon ausgegangen werden, dass sich der Bereich der hohen Aufladbarkeit nicht nur auf die Oberfläche beschränkt. Für eine verbesserte Interpretation wäre hier eine Wiederholungsmessung notwendig, bei der das Profil die kartierte

Grafitlinse im zentralen Bereich erfassen müsste und es wäre auch (anhand der vorliegenden Ergebnisse) eine höhere maximale Eindringtiefe anzustreben.

4.4 Ergebnisse Abschätzung des Lagerstättenpotenzials

Für die Abschätzung des Restpotenzials in Zettlitz können die Ergebnisse der geoelektrischen Profile, speziell die Profile 2 und 3 auf den oberen Abbauetagen, mit deren Tiefeninterpretation herangezogen werden. Diese entsprechen, wie bereits in Kapitel 4.2, in etwa den aus den Bohrungen gewonnen Teufen. So kann man für die Abschätzung des Restlagerstättenpotenzials (bezogen auf eine Bergbaufläche von rund 2 ha) den bereits in Müller (2016) mit 130.000 t Rohgraphit angeführten Wert, als durchaus realistisch heranziehen.

Nicht berücksichtigt in diesen Berechnungen ist die Fortsetzung der Grafitlinse unterhalb der ersten Tagbausohle, da dort eine Tiefenabschätzung auch aus der Geophysik nicht eindeutig war.

5. Geochemische Untersuchungen Messgebiete Weinberg-Amstall/Zettlitz

5.1 Ausgangslage und Problemstellung zur geochemischen Prospektion/Exploration von Grafitvorkommen

Während geophysikalische Prospektionsmethoden international zum Standardtool bei der Prospektion von Grafitmineralisationen zählen, werden geochemische Prospektions-/Explorationsmethoden relativ selten bei der Suche nach Grafitvorkommen eingesetzt. Diese geochemischen Untersuchungsmethoden konzentrieren sich vor allem auf die Ermittlung der Kohlenstoff-Gehalte bzw. anwendungsspezifischer Störelemente in Grafit-höflichen Zonen. Im Zuge der Diskussion zur sicheren Versorgung mit kritischen Rohstoffen in der EU sind aber auch andere Spurenelementgehalte in den Grafiten und deren Begleitphasen Gegenstand von rohstoffwirtschaftlichen Überlegungen geworden.

Möglichkeiten der geochemischen Prospektion von Grafiten in Österreich wurden am Beispiel von Grafitvorkommen in der Bunten Serie bereits 1984 testweise untersucht (HOLZER & PROCHASKA, 1985), ohne dass dabei aber signifikante Prospektionsparameter in Gesteinen, Böden und Bachsedimenten ableitbar waren. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden aber nicht alle für die Grafite der Bunten Serie charakteristischen Spurenelemente untersucht, sondern lediglich Ni, Co, Cu, Zn und Sr. Die Aussagekraft dieser Untersuchungen für die Anwendbarkeit geochemischer Prospektionsmethoden war dadurch von vornherein deutlich limitiert. In Ergänzung zum geophysikalischen Hauptteil des aktuellen Projekts sollen daher auf Basis bodengeochemischer Messprofile und einem erweiterten Elementspektrum die Einsatzmöglichkeiten von geochemischen Prospektionsmethoden testweise in zwei ausgewählten Untersuchungsgebieten (Wollmersdorf/Zettlitz, Weinsberg/Amstall) nochmals überprüft werden. Die Planung der bodengeochemischen Profile steht dabei in enger Abstimmung mit dem Messprogramm der geophysikalischen Arbeiten in den beiden Testgebieten. Mit bodengeochemischen Prospektionsmethoden können im Wesentlichen oberflächennahe Grafitkörper samt Verwitterungszone erfasst werden. Als Testgebiete sollen daher Typsituationen im Bereich von Grafitvorkommen und deren Umfeld ausgewählt werden.

Aus den in der Geologischen Bundesanstalt verfügbaren geochemischen Analysen von Grafitproben der aus dem Drosendorf-Deckensystem (Bunten Serie) und den aus der aktuellen Literatur zusammengestellten Spurenelementanalysen geht jedoch auch hervor, dass zum Teil relativ große regionale Unterschiede in den Elementverteilungen auftreten können und dadurch häufig auch keine einheitlichen, großflächigen Trends bei der Spurenelementverteilung erkennbar sind. Für den gezielten Einsatz geochemischer Prospektionsmethoden im Bereich der Grafitvorkommen der Bunten Serie ergibt sich daher unter Berücksichtigung aller verfügbaren geologischer und geochemischen Daten eine Reihe von einengenden Faktoren:

- Die geochemische Variabilität der Grafite in der Bunten Serie widerspiegelt vor allem die komplexen Bildungsbedingungen mit teilweise sehr unterschiedlichen geochemischen Faziesbereichen und offensichtlich breitgestreuten Redoxbedingungen sowie

Stoffmobilisationen bei der Grafitisierung und metamorphe Überprägung. Dadurch bedingt zeigen die Spurenelementverteilungen der Grafite in der Bunten Serie teilweise regional relativ große Unterschiede

- Entsprechend der geochemisch unterschiedlichen Rahmenbedingungen lassen sich nur bedingt überregionale Leitparameter für das gesamte Grafit-Verbreitungsgebiet innerhalb der Bunten Serie definieren. Eine Anpassung an regional auftretenden geochemischen Mustern kann damit erforderlich sein.
- Böden über den Grafitlagerstätten zeigen in den bisherigen Untersuchungen nicht dasselbe Spurenelementmuster wie die Festgesteine, da in Grafiten angereicherten Elemente (z.B. Co, Ni) durch Verwitterungsprozesse abgeführt werden können. Eine genaue Kenntnis der möglichen Verwitterungsprozesse ist für den Erfolg großflächiger bodengeochemischer Prospektionsmethoden daher unabdingbar.

Um gezielt geochemische Prospektionsmethoden in den vorgesehenen Testgebieten überhaupt einsetzen zu können, ist vorweg ein umfassendes Detailwissen über die Geochemie, insbesondere des Spurenelementchemismus der Grafitgesteine notwendig. Der Hauptfokus des geochemischen Teils des gegenständlichen Projekts liegt daher neben den methodischen Tests im Bereich der beiden ausgewählten Testgebiete vor allem auch in der kritischen Sichtung und Auswertung der verfügbaren geochemischen Daten von Grafitvorkommen im Waldviertel, um daraus valide Indikatoren für die bodengeochemische Prospektion von Grafiten ableiten zu können.

5.2 Test bodengeochemischer Prospektionsmethoden im Bereich ausgewählter Grafitvorkommen des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie)

5.2.1 Spurenelementchemismus der Grafite

Um gezielt geochemische Prospektionsmethoden einsetzen zu können, ist vorweg ein umfassendes Detailwissen über die Geochemie, insbesondere des Spurenelementchemismus der Grafitgesteine notwendig. Die Grafite des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie) werden als Produkt einer metamorphen Überprägung von Sapropelen interpretiert. Die häufige Assoziation der Grafite mit Marmor deutet auf die Genese in kleinen, sapropelitischen Becken auf einer küstennahen Karbonatplattform hin (MÜLLER, 2016). Die Gesamtzusammensetzung der Grafitgneise der Bunten Serie gleicht der von durchschnittlichen Schwarzschiefern, die nicht mit Metallen angereichert sind (SCHRAUDER, 1991; WAGNER, 2009; MÜLLER, 2016). Im Gegensatz zu den Grafiten der Grauwackenzone sind die Grafite der Bunten Serie reich an sedimentogenen Beimengungen sowie an Sulfiden (Pyrit, Pyrrothin). Örtliche Anreicherungen von Buntmetallmineralisationen werden aber auch als Folge hydrothermalen Aktivitäten interpretiert (WEBER et al., 1997).

Aus den im Rahmen früherer Projekte nachanalytisierten Grafitproben der Geologischen Bundesanstalt (SCHEDL et al., 2016) und den aus aktuellen Literaturquellen zusammengestellten Spurenelementanalytik geht hervor, dass es aufgrund der faziellen Unterschiede der Ablagerungsmilieus zum Teil doch erhebliche regionale Unterschiede im Spurenelementchemismus gibt (Tab. 5, Abb. 50 und 51). In Gesamtbetrachtung der vorhandenen Analysendaten sind daher auch keine einheitlichen Trends in den Spurenelementverteilungen erkennbar. Die Verteilungsmuster ausgewählter Elemente (V, Cr, Co, Ni, Cu, As, Mo) in den untersuchten Grafiten weisen jedoch in der Grundtendenz große Ähnlichkeiten zu rezenten Schwarzschiefern auf (VINE & TOURTELOT, 1970). Grafitführende Metamorphite der Bunten Serie sind gegenüber dem Durchschnitt von Tonschiefern

deutlich an den Elementen C, S, Co, Ni, Se, V, Mo und Cu angereichert, die hier vor allem an das organogene Material gebunden sind (JANDA & SCHROLL, 1960; SCHRAUDER, 1991). Vor allem die Elemente V, Mo und Ni sind für Sapropelite charakteristisch. Die Co-Maxima in den ausgewählten Grafitgesteinen der Bunten Serie erreichen 241 ppm, liegen aber sonst zum Teil unter den Durchschnittsgehalten von Peliten (WAGNER, 2009). Der beobachtete Maximalwert an B in Grafiten liegt bei 745 ppm (Zettlitz, WAGNER, 2009), wobei aber nur von rund der Hälfte der verfügbaren Grafit-Analysen auch B-Gehalte vorliegen. V (Maximalwert 198 ppm) und Mo (Maximalwert 13,2 ppm) liegen in den zur Verfügung stehenden Grafit-Analysen meist höher als in durchschnittlichen Schwarzschiefern, Cr (Maximalgehalt 61 ppm) in allen Proben darunter. Je nach Art und Zusammensetzung des Ausgangsgesteins (Grafitquarzit, Grafitschiefer, Grafitgneis) kann der Chemismus der Grafit-führenden Gesteine innerhalb der Bunten Serie entsprechend größeren Schwankungen unterliegen (Abb. 51). So können die Gehalte von As, B, Co, Cu, Li und Ni bis zu zwei Zehnerpotenzen variieren (WAGNER, 2009) (vgl. auch Abb. 52).

Der Kohlenstoffgehalt der Grafite aus verschiedenen Literaturquellen liegt zwischen 30 % und 63 %, der S-Gehalt zwischen 0,02 und 9,43 % (WAGNER, 2009). Die Grafite mit S-Gehalten > 8 % zeigen deutliche Sulfidführung bis hin zu massiv ausgebildeten Pyrit-Lagen (z.B. Weinberg). Aus Untersuchungen an Sulfidkonzentraten ist bekannt, dass in diesen Phasen beträchtliche Anreicherungen an As, Co, Cu und Ni sowie Cr auftreten. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass entsprechende Verteilungsmuster in sulfidreichen Grafitgesteinen diesen Elementanreicherungen in den Sulfidphasen entsprechen.

	As	B	Ba	Be	Bi	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	La	Li	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Rb	Sc	Sn	Sr	U	V	W	Y	Zn	Zr
07/2001-1001	7,4		476,3	0,5	0,5	28,3	1,4	35,5	0,5		8,2	1,5	9,3	15,4	1,2	14,0			2,9	3,1	51,8	0,8	1,0	32,3	2,5	266,2	2,7			217,5
07/2001-1002	27,4		196,5	2,0	0,5	25,8	62,9	27,4	0,8		9,9	1,1	2,5	11,4	1,9	7,9			71,6	4,4	50,6	0,5	1,1	74,2	2,8	104,0	2,7			55,0
08/2003-1001	21,2		134,3	0,8	0,1	30,9	0,8	15,2	0,5		7,6	1,0	3,8	17,4	0,7	15,6			4,9	2,1	6,7	0,7	0,7	122,0	1,8	70,3	4,4			90,6
08/2005a-1001	0,9		79,7	0,8	0,5	17,3	1,8	15,4	0,5		5,1	0,5	1,2	10,5	2,1	3,8			32,5	3,4	27,9	2,1	0,7	101,4	1,8	49,8	0,5			26,4
036/2004-1001	5,7		187,4	0,5	0,5	42,4	0,5	17,5	0,6		5,0	1,0	4,3	29,5	1,4	8,9			1,6	2,3	41,5	1,7	0,8	38,3	3,8	94,1	1,6			99,1
036/2008-1001	2,4		69,2	0,8	0,5	18,6	1,0	24,3	0,5		6,0	0,5	1,5	14,3	1,1	2,4			3,6	9,1	2,2	0,8	0,5	77,2	2,4	164,1	1,8			32,3
036/2011-1001	1,4		89,0	1,7	0,5	51,1	1,8	83,1	0,9		15,6	1,0	5,3	26,4	4,2	11,2			4,1	2,7	42,2	0,9	1,0	15,2	16,8	384,0	4,3			133,0
036/2020-1001	1,0		454,8	1,4	0,7	25,4	5,1	50,2	1,3		14,4	0,5	3,1	16,2	10,9	6,0			13,2	9,2	73,9	1,1	1,3	63,9	4,4	303,1	2,2			70,8
036/2025-1001	2,5		290,3	1,3	0,5	5,6	0,5	21,9	0,6		6,1	0,5	2,6	3,5	1,9	2,9			1,8	1,2	54,2	1,2	0,7	9,0	0,7	78,3	1,4			60,3
054/2005-1001	0,9		181,7	2,1	0,5	107,6	71,2	75,4	2,8		14,5	0,7	2,4	58,4	20,5	0,5			226,9	12,5	69,2	2,2	0,8	59,4	5,3	172,7	0,5			49,3
3620131001	1,0		16,0			50,0	4,0	1,0	8,0	31,0				30,0			20,0	23,0	55,0	6,0	54,0			176,0	18,0	76,0		74,0	6,0	187,0
3620131002	25,0		13,0			88,0	39,0	99,0	5,0	20,0				48,0			18,0	32,0	105,0	5,0	21,0			79,0	9,0	197,0		79,0	2,0	133,0
Weinberg	5,7	205,0	185,0				25,0	61,0		19,0	12,0	0,7			8,3	11,0			67,0	4,5	27,0			35,0	2,0	198,0			8,6	57,0
Amstall SE 2	5,4	80,0	39,0				241,0	50,0		94,0	18,0	1,5			1,0	13,2			85,0	6,2	12,0			64,0	4,3	123,0			3,6	139,0
Mühdorf 2	3,7	7,0	134,0				2,0	16,0		13,0	7,0	0,6			1,7	10,4			7,0	1,1	24,0			44,0	0,3	50,0			4,6	42,0
Trenning 2	3,2	22,0	473,0				13,0	48,0		43,0	14,0	0,8			3,4	4,9			9,0	4,4	92,0			76,0	1,2	175,0			3,5	68,0
Zettlitz 2	3,8	745,0	359,0				14,0	33,0		20,0	9,0	0,8			0,5	6,6			33,0	3,1	72,0			69,0	1,0	84,0			14,1	58,0
Hengstberg 2	5,2	43,0	244,0				6,0	32,0		57,0	18,0	1,5			8,1	1,8			23,0	4,8	44,0			102,0	6,5	86,0			22,1	126,0
Loja 2	3,0	5,0	806,0				49,0	50,0		155,0	13,0	0,4			51,4	12,9			218,0	14,4	70,0			99,0	1,8	143,0			18,9	59,0
Zettlitz 1	20,0	7,0		0,3			10,0	80,0		0,7	7,0	10,0				8,0			10,0	7,0						350,0			1,0	150,0
ZE 04.2	37,3		195,0	0,3		34,1	2,1	4,0	0,2	3,0	3,3		0,7	15,5	0,4	2,2	0,2	13,7	2,0	0,0	28,0	3,6	2,0	79,0	4,5	23,0	0,0	38,9	0,4	25,0
ZE 07.1	3,9		384,0	1,2		144,0	1,6	79,0	0,5	0,0	16,7		4,5	72,7	0,4	5,6	16,8	56,5	1,5	3,9	76,0	6,9	2,0	80,0	9,9	330,0	0,6	56,8	0,0	161,0
ZE 10.1	4,3		220,0	0,5		49,5	1,2	64,0	0,6	12,0	8,7		1,4	24,5	2,2	3,1	3,9	18,7	0,9	0,0	77,0	8,7	2,0	52,0	3,6	190,0	0,1	11,4	0,0	45,0
ZE 13.3	5,3		687,0	1,9		128,1	5,1	31,0	1,3	36,0	12,2		3,8	65,9	0,8	4,1	7,5	49,9	4,5	0,3	163,0	8,7	2,0	154,0	5,7	150,0	0,3	47,3	0,0	137,0
ZE 29.1	0,0		370,0	0,7		36,2	3,0	39,0	1,7	2,1	10,3		1,6	18,3	3,3	0,1	5,2	14,8	3,8	4,6	62,0	8,7	2,0	761,0	3,1	169,0	1,3	15,8	6,5	66,0
Schwarzschiefer		50,0	300,0	1,0			10,0	100,0		70,0	20			30		10			50	20,0		10,0		200,0		150		30,0	300,0	70
Tonschiefer	13,0	100,0	580,0			82,0	19,0	90,0			19	1,6	5	43	66	2,6			68	20,0	140,0			300,0	3,7	130			95,0	160

Tab. 5: Spurenelementchemismus ausgewählter Grafitproben des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie) im Vergleich mit durchschnittlichen, nicht metallangereicherten Schwarzschiefern (VINE & TOURTELOT, 1970) bzw. Tonschiefern (WEDEPOHL, 1971).

Datenquellen:

SCHEDL et al. (2016)

07/2001-1001 und 1002 Zettlitz
 08/2003-1001 Autendorf
 08/2005a-1001 Ober-Thumeritz
 036/2004-1001 Doppl
 036/2008-1001 Schneeberg
 036/2011-1001 Elseneth
 036/2020-1001 Straßreith
 036/2025-1001 Pöbring

WAGNER (2009)

Weinberg
 Amstall SE-2
 Mühdorf 2
 Trenning 2
 Hengstberg 2
 Loja 2
 Zettlitz 1 und 2

MÜLLER (2016)

ZE 04.2, ZE07.1, ZE 10.1, ZE 13.3, ZE 29.1 Zettlitz

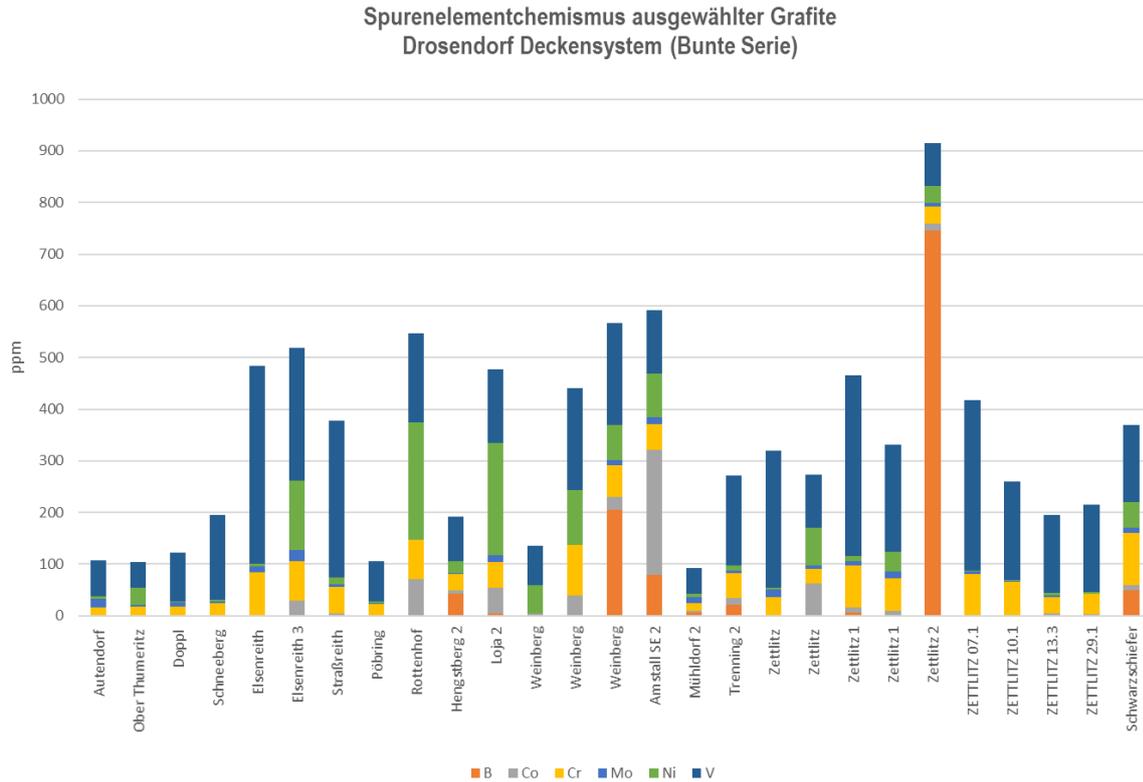


Abb. 51: Spurenelementchemismus ausgewählter Graphitproben des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie) und Durchschnittsgehalte rezenter Schwarzschiefer nach VINE & TOURTELOT (1970)

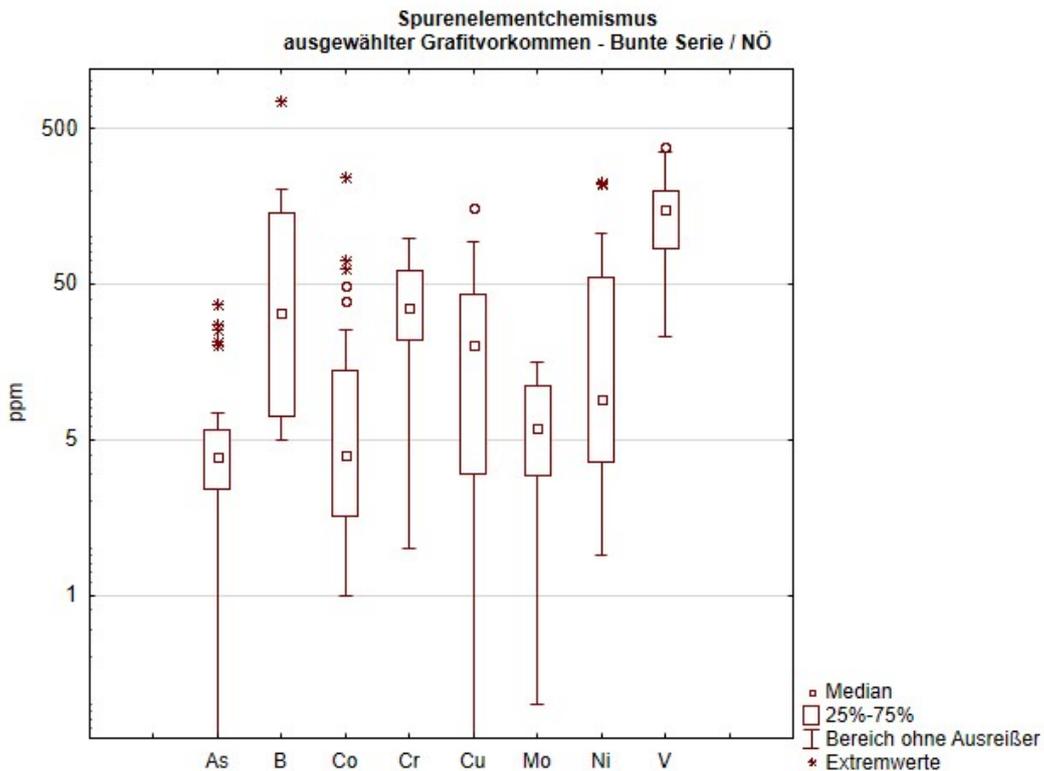


Abb. 52: Box-Plots-Darstellung Graphit-typischer Spurenelementgehalte in ausgewählten Graphitproben des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie)

5.2.2 Datenauswertung im Hinblick auf die Ableitung/Vorauswahl von geochemischen Prospektionsindikatoren

Zur Ableitung geeigneter Indikatorelemente für die geochemische Prospektion von Grafitvorkommen im Bereich des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie) wurden einerseits die flächendeckend vorhandenen Daten aus der bundesweiten geochemischen Basisaufnahme (THALMANN et al., 1989) und andererseits alle verfügbaren Analytikdaten zu Grafiten aus dem Bereich der Bunten Serie verwendet.

Die univariate Auswertung von Haupt- und Spurenelementen aus der geochemischen Basisaufnahme lässt in den überwiegenden Fällen noch keine signifikanten geochemischen Trends im Bereich der Grafitvorkommen erkennen. Beim Hauptelementchemismus besteht lediglich bei Magnesium eine gute Korrelation mit dem Auftreten von Grafiten in der Bunten Serie, was durch die Bindung der Grafitvorkommen an Marmoreinschaltungen gut erklärbar ist.

Bei den Spurenelementen liegt eigentlich nur bei Vanadium eine mehr oder minder gute Korrelation zum Verbreitungsgebiet von Grafiten vor. Alle anderen -auch die für Grafite bzw. Schwarzschiefer signifikant geltenden Spurenelemente- zeigen hingegen höchstens in Lokalbereichen Übereinstimmungen (vgl. Abb. 53). Als überregionale Prospektionsindikatoren sind sie daher nur bedingt geeignet.

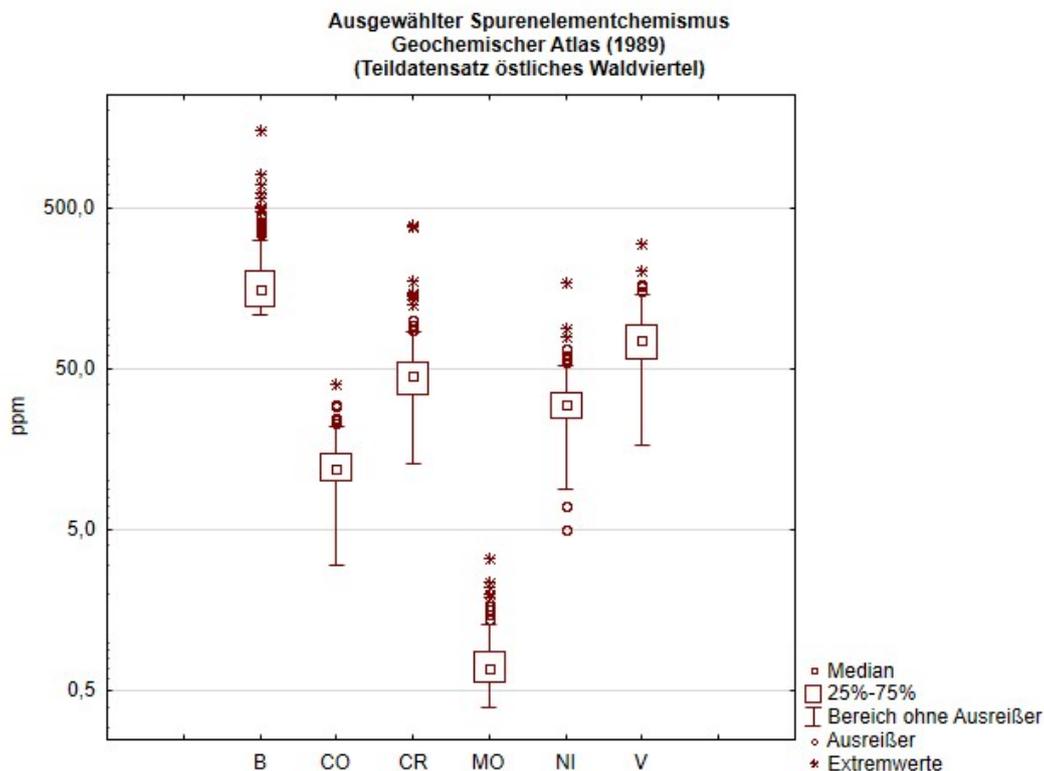


Abb. 53: Box-Plots-Darstellung ausgewählter Spurenelementgehalte aus einem Teildatensatz (östliches Waldviertel) des Geochemisch Atlas 1989.

Ein interessantes Marker-Element der Grafite in der Bunten Serie stellt hingegen Bor dar, das -wie teilweise auch V- hier vorwiegend an das relativ häufig auftretende Borsilikat Turmalin (meist in Form der V-reichen Varietät Dravit) gebunden und deutlich gegenüber der durchschnittlichen

Zusammensetzung von Schwarzschiefern angereichert ist. Für Bor wurde ursprünglich ebenfalls hydrothermale Zufuhr vermutet (WEBER, 1987). Der B-Gehalt der Turmaline in metamorphen Gesteinen lässt sich aber auch auf die Rekristallisation von Detritus zurückführen (MÜLLER, 2016). Bor hat sich auch bei der Testanalytik für die Bachsedimentgeochemie im Bereich der Böhmisches Masse als mögliches Indikatorelement für die Grafite der Bunten Serie erwiesen und markiert in den auftretenden Elementverteilungen sehr gut den Verlauf der Grafitmineralisationen innerhalb des Drosendorf-Deckensystem (Bunten Serie) (Abb. 54). Dieser inoffizielle Bor-Datensatz aus der geochemischen Basisaufnahme der Böhmisches Masse liefert jedoch nur orientierende Vergleichswerte, da die Analysenergebnisse aufgrund eines ungeeigneten Aufschlusses (Borat-Aufschluss) lediglich in ihren Relativgehalten miteinander verglichen werden können.

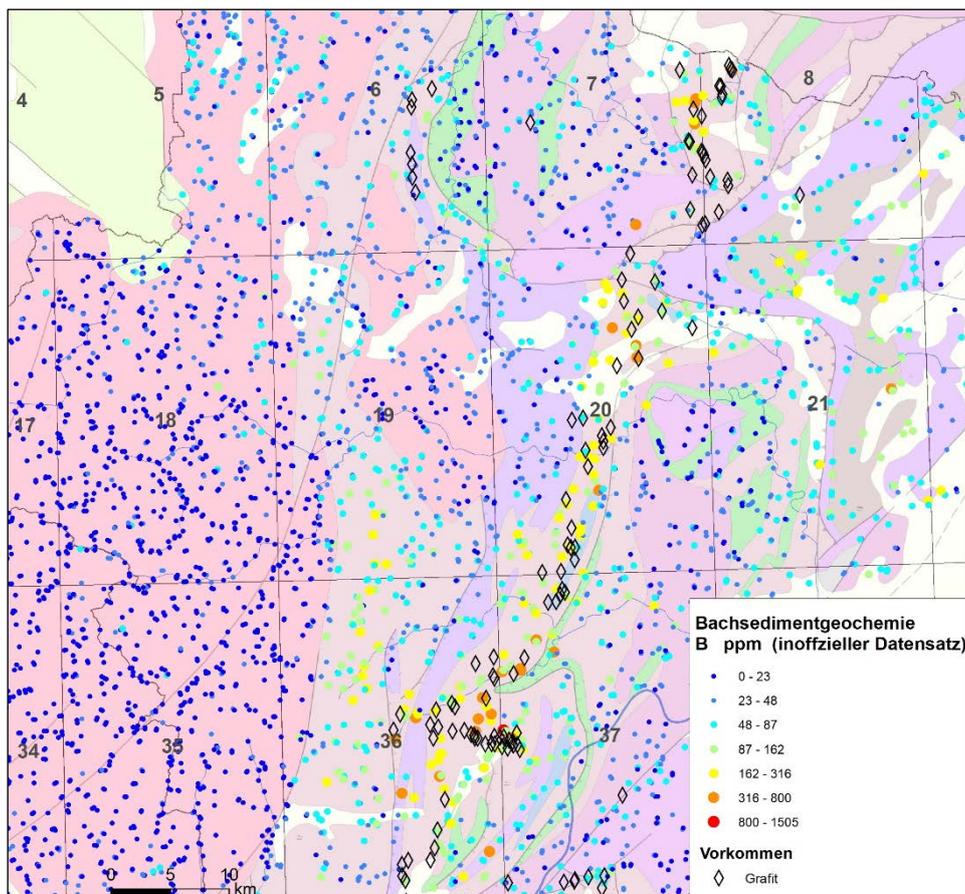


Abb. 54: Relative B-Gehalte in Bachsedimenten der Böhmisches Masse in Relation zu Grafitvorkommen im Drosendorf-Deckensystem (Bunte Serie) (Basisdaten: inoffizieller Datensatz zum Geochemischen Atlas)

In einem weiteren Vorauswerteschritt wurde versucht, ausgehend von bereits verfügbaren Grafitanalysen aus dem Drosendorf-Deckensystem (Bunte Serie) geeignete Indikatorelemente für eine bodengeochemische Prospektion zu finden. Das erweist sich aber insofern als schwierig, da auch die für die Grafite der Bunten Serie typischen Elementassoziationen zum Teil größeren regionalen Schwankungen unterworfen sind und mögliche Indikatorelemente nicht in allen Analysen vorliegen (vgl. Abb. 52).

Auf Basis der in Tab. 5 zusammengefassten Analytikdaten lässt sich zumindest eine kleine Gruppe von charakteristischen Spurenelementen ableiten, die mit kleineren regionalen Unterschieden für Grafitvorkommen in den beiden Untersuchungsgebieten Weinberg/Amstall und Zettlitz

charakteristisch sind und sich dort deutlich von den entsprechenden Spurenelementverteilungen in den Begleitgesteinen der Grafitvorkommen unterscheiden.

Als geeignete Indikatorelemente für den methodischen Test geochemischer Prospektionsmethoden im Bereich der ausgewählten Grafitvorkommen wurden vorweg B, Co, Cr, Mo, Ni und V ausgewählt. Bei einigen weiteren –möglicherweise auch indikativen- Spurenelementen (z.B. As, Cu) kann aber der Einfluss variabler Sulfidbeimengungen nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund des hohen Sulfidanteils unterliegen Grafitgesteine zudem teilweise starken und schnellen Verwitterungsprozessen. S, Fe und As werden dabei weitgehend abgeführt. Dabei kann es auch zur deutlichen Anreicherung der Elemente Ni, As, U in Bodenhorizonten kommen. Das Verwitterungsverhalten der Grafite ist daher auch ein wichtiger Zusatzfaktor bei der Auswahl geeigneter Indikatorelemente für die bodengeochemische Prospektion.

5.2.3 Probennahme/-aufbereitung

Bei der Auswahl der Referenzprofile für die bodengeochemischen Untersuchungen wurden solche Bereiche im Raum Wollmersdorf bzw. Weinberg/Amstall bevorzugt ausgewählt, die sich im unmittelbaren Umfeld ehemaliger Abbaue befinden und teilweise noch nicht abgebaute Grafitlinsen beinhalten (Abb. 55 bis 57). Zudem wurden im Gebiet SW Wollmersdorf außerhalb ehemaliger Abbaue Profile senkrecht zu kleindimensionierten Grafitlinsen gelegt, die auf Basis von Luftbildern erfasst werden konnten. Im Gebiet Weinberg/Amstall setzen die festgelegten bodengeochemische Profile am äußersten SE-Rand des zuletzt abgebauten Grubenfeldes ‚Weinbergwald-Neu‘ senkrecht (A 1/1A - A 1/6) und in Verlängerung (A 2/1 - A 2/4) des nicht abgebauten ‚Vorkommens VIII‘ an. Das Profil WN 1 bis WN 3 entspricht der östlichen Fortsetzung des zuletzt abgebauten Tagbaus ‚Vorkommen VII‘.

Sowohl im Profil WO-1/1 bis WO-1/11 SW von Wollmersdorf als auch in den Profilen A 1/1A bis A 1/6 bzw A 2/1 bis A 2/4 SE Weinberg/Amstall überlappen sich die bodengeochemischen Probenahmepunkte mit Messrastern der begleitenden geophysikalischen Untersuchungen.

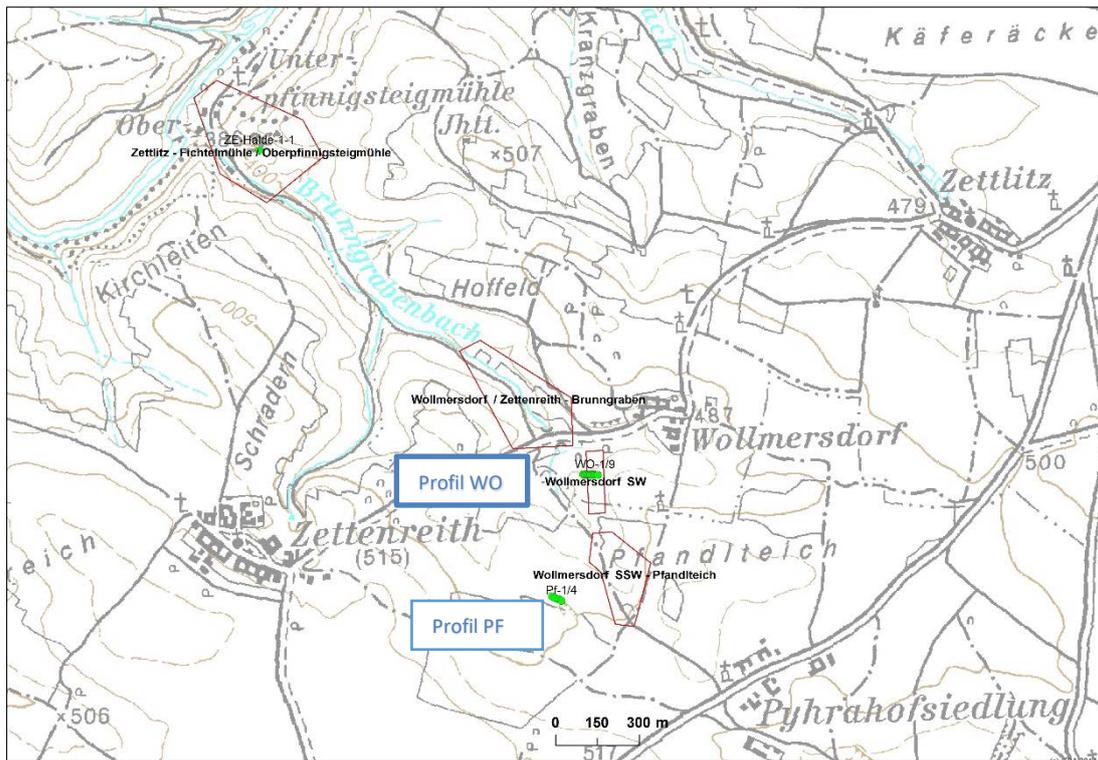


Abb.55: Übersichtskarte der bodengeochemischen Profile im Bereich SW Wollmersdorf und des Referenzpunktes im Bergbau Zettlitz

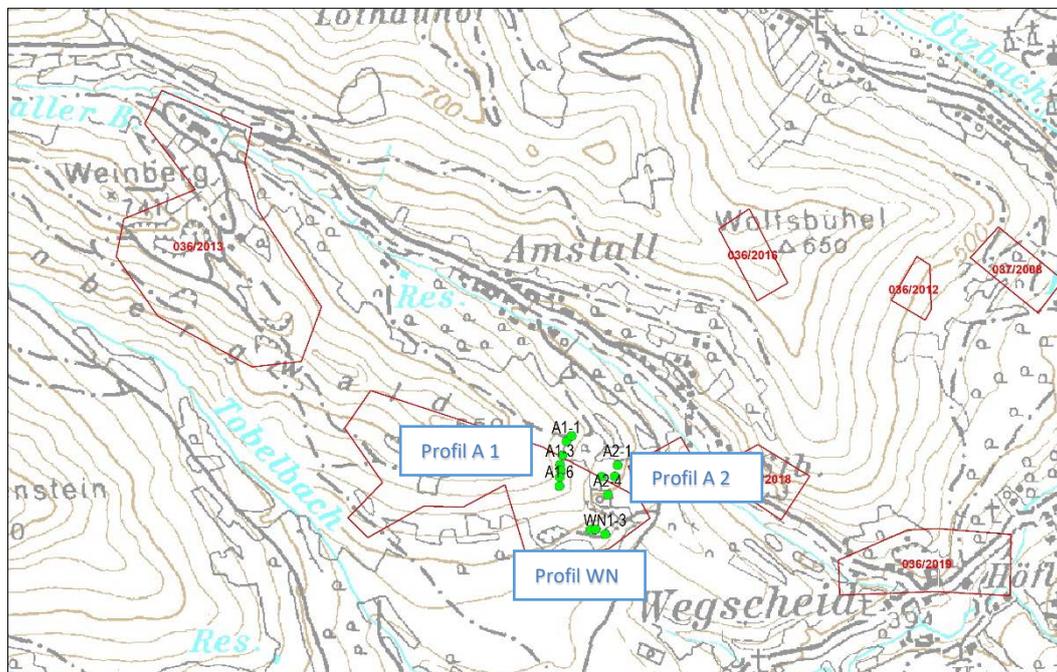


Abb. 56: Übersichtskarte der bodengeochemischen Profile am Südostrand des ehemaligen Bergbaureviere Weinbergwald Neu; S Amstall.

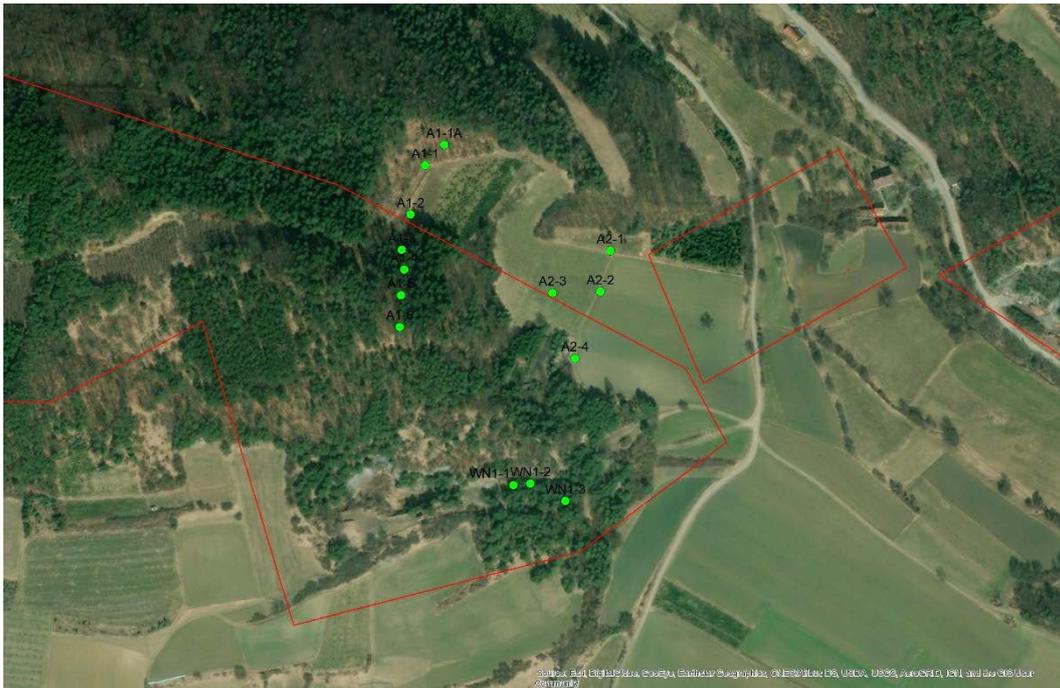


Abb. 57: Detailausschnitt der bodengeochemischen Profile am Südostrand des ehemaligen Bergbaus Weinbergwald Neu sowie nördlich anschließender Bereiche

Insgesamt umfassen die durchgeführten Bodenbeprobungen in den beiden definierten Testgebieten 30 Probenahmepunkte, die sich auf insgesamt 5 Profillinien im Gebiet Wollmersdorf bzw. Weinberg verteilen. Als Referenzprobe wurde zusätzliche eine Bodenaufgabe im Sohlenbereich des Grafitbergbaus Zettlitz beprobt.

Die Beprobung basiert auf Schlitzproben, die im Wesentlichen einen einheitlichen Tiefenabschnitt (5-20 cm) umfassen. Die Probenahme entspricht einem standardisierten Probenahmeverfahren, das die Geologische Bundesanstalt für bodengeochemische Untersuchungen routinemäßig verwendet.

Die befüllten Probensäckchen wurden nach Anlieferung an das Labor der Geologischen Bundesanstalt bei Raumtemperatur (<30°C) während mehrerer Wochen auf einen Wassergehalt von <2M-% getrocknet. Die getrockneten Proben wurden danach in einem Porzellanmörser vorsichtig zerdrückt, aber nicht gemahlen und in rostfreien Stahlsieben (DIN 4188) auf die Referenzkorngröße für Bodenproben (<2 mm) trocken gesiebt.

Aus den luftgetrockneten analysenfeinen Proben wurden der Trocknungs- und der Glühverlust bei 110 °C bzw. 1050°C gravimetrisch bestimmt.

5.2.4 Geochemische Analytik

Die gesamte Analytik erfolgte im Labor der FA Geochemie der Geologischen Bundesanstalt mittels RFA, ICPMS und LECO (C- und S-gesamt). Insgesamt wurden im geochemischen Labor der Geologischen Bundesanstalt 30 Bodenproben hinsichtlich Haupt- und Spurenelementgehalte untersucht.

Folgende Haupt- und Spurenparameter wurden mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanlage Epsilon 5 der Fa. Panalytical (RFA) analysiert:

SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, FeO, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅

Die Analytik der Spurenelemente erfolgte nach Vollaufschluss mittels ICP-MS. Zum Aufschluss wurde 100 mg der analysenfeinen Probe befeuchtet und mit 2 ml HNO₃ (65 %), 2 ml HClO₄ (60 %) und 3 ml HF (40 %) fast zur Trockenen eingedampft. Im Anschluss wurde der Rückstand noch 2 Mal mit je 5 ml HNO₃ (65 %) abgeraucht, der Rückstand schließlich mit 0,5 ml HNO₃ (65 %) gelöst und mit deionisiertem H₂O auf 50 ml aufgefüllt. Aufgrund teilweiser Probleme mit der Schwermineralfraktion musste dieses Aufschlussverfahren teilweise pro Probe je 2 Mal durchgeführt. Die resultierende Lösung der Probe war dann Stammlösung zur Bestimmung der Elementgehalte mittels ICP-MS. Diese Methode ist analog zu der im Rahmen der bundesweiten geochemischen Bachsedimentuntersuchungen durchgeführten Aufschlussmethodik. Die Bestimmung der einzelnen Parameter erfolgte mit dem ICP-MS 7500 (Agilent). Bestimmt wurden in der maximalen Variante 27 Parameter: As, B, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, La, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Sr, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr.

Zur Qualitätssicherung wurden zertifizierte Standards analog den Proben behandelt und jeweils Mehrfachmessungen durchgeführt. Zusätzlich wurde die Stammlösung für die Messung am ICP-MS in unterschiedlichen Verdünnungen gemessen. Zu Vergleichszwecken wurden Mikrowellenaufschlüsse mit gleicher Probeneinwaage und selben Mischungsverhältnissen der Säuren angefertigt und gemeinsam mit den klassischen, offenen Säureaufschlüssen analysiert

Für die sensible Bestimmung von Bor musste ein geändertes Aufschlussverfahren gewählt werden. Dies war deshalb notwendig, da das Bor in den untersuchten Proben überwiegend an die schwer aufschließbare Mineralphase Turmalin gebunden ist.

Für die Bor-Analytik wurde ein Natriumperoxid- Sinteraufschluss in Anlehnung an die Methode von Bokhari und Meisl (Bokhari & Meisl 2017) durchgeführt. Dabei wurden Probe und Na₂O₂ im Mischungsverhältnis 1:6 in geeigneten Tiegeln im Muffelofen, mit langsamem Temperaturanstieg, auf 500°C erhitzt. Die Temperatur wurde für 120 Minuten gehalten. Nach Abkühlung wurden die Proben mit deionisiertem H₂O gelöst und auf 50 ml aufgefüllt. Diese Stammlösung wurde in unterschiedlichen Verdünnungen mittels ICP-MS analysiert und mit Hilfe von Kontrollstandards ausgewertet.

Zur Kontrolle der Indikatorfunktion von Spurenelementen wurde bei sämtlichen Bodenproben auch der Gehalt an C_{ges} bestimmt. Der Gesamtkohlenstoff und Gesamtschwefel wurden mittels eines C/S-Analysators LECO CS-200 (Fa. Leco) bestimmt. Aus den gemessenen Parametern wurde der H₂O⁺-Gehalt rechnerisch ermittelt.

5.2.5 Datenauswertung/Ergebnisse

Die Ergebnisse der Multielementanalytik sämtlicher untersuchter Bodenproben sind in den Tab. 7 und 8 für beide Untersuchungsgebiete getrennt dargestellt. Entsprechend den teilweise geochemisch unterschiedlichen grafitischen Gesteinen in den beiden Grafit-Lagerstätten Zettlitz und Weinberg/Amstall unterliegen auch die Bodenproben im regionalen Vergleich teilweisen größeren Schwankungen im Hinblick auf Haupt- und Spurenelementchemismus.

Beim Hauptelementchemismus sind die Gehalte an SiO₂, Al₂O₃, FeO und MnO in den Bodenproben aus Wollmersdorf-Zettenreit-Zettlitz tendenziell höher als in den Proben von Weinberg. Umgekehrt sind

die Gehalte an CaO in den Bodenproben von Weinberg etwas höher als in den Proben aus Wollmersdorf-Zettenreith-Zettlitz. Die im Vergleich zu den Grafitgesteinen unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der Bodenproben zeigt sich auch in den unterschiedlichen Hauptelement-Verteilungen. Die Hauptelementgehalte in den Bodenproben sind grundsätzlich höher als in den grafitführenden Vergleichsgesteinen der beiden Vorkommen (Zettlitz, Weinberg/Amstall). Ausnahme bilden die C_{ges} -Gehalte, die in den Bodenproben meist unter 5 % liegen. Höhere C_{ges} -Gehalte (> 10 %) treten bei den untersuchten Bodenproben lediglich dort auf, wo die Böden direkt auf grafitreichen Gesteinsuntergrund liegen (Zettlitz, Weinbergwald Neu – Vorkommen VII). Hohe FeO-Gehalte in den Bodenproben korrelieren sehr gut mit höheren Gehalten an Co, Ni und Zn. Hier besteht möglicherweise ein Zusammenhang mit dem teilweise sehr hohen Anteil von Sulfidphasen in den Grafiten.

Betrachtet man die im Vorauswahlverfahren definierten Indikatorelemente in ihrer statistischen Verteilung getrennt nach den jeweiligen Untersuchungsgebieten, so weisen die Muster der Spurenelementgehalte trotz teilweise unterschiedlicher Schwankungsbreiten durchaus größere Ähnlichkeiten auf (Abb. 58 und 59). Vergleicht man die Medianwerte ausgewählter Spurenelemente in den Bodenproben beider Untersuchungsgebiete, so zeigen sich mit Ausnahme von Ba nur relativ geringe Unterschiede (Tab. 6). In Relation zu den Medianwerten der jeweiligen Grafitanalysen aus den beiden Untersuchungsgebieten treten aber einige Unterschiede zwischen Boden- und Grafitproben auf. Die Elementgehalte für Ba, Cr, Cu und Ni sind in den Bodenproben etwas angereichert, während die Gehalte für Mo und V in den Grafitproben tendenziell etwas höher liegen. Die Grafite aus dem Gebiet Weinberg weisen gegenüber den Grafiten aus dem Gebiet Zettlitz zudem höhere Gehalte an Co, Cu, Ni und Mo auf, während hingegen V und Ba in den Grafitproben aus Zettlitz tendenziell höher sind. B als eines der Indikatorelemente für die geochemische Prospektion zeigt in den Probensets beider Untersuchungsgebiete sowohl in Boden- als auch in Grafitproben vergleichbare Medianwerte.

	Weinberg		Wollmersdorf- Zettlitz	
	Boden	Grafit	Boden	Grafit
B	83	79	78	
Ba	286	143	501	361
Co	21	54	19	11
Cr	111	46	90	44
Cu	52	37	50	11
Mo	1	10	1	7
Ni	68	55	64	15
V	128	137	123	185

Tab. 6: Medianwerte ausgewählter Spurenelemente in Boden- und Grafitproben der jeweiligen Untersuchungsgebiete

B und V unterliegen in den einzelnen Bodenproben teilweise größeren Schwankungen, sind aber grundsätzlich als indikativ für Bereiche mit grafitführenden Gesteinen im Untergrund anzusehen. Die B- und V-Gehalte passen dort auch sehr gut zu den entsprechenden Spurenelementgehalten der Grafite (vgl. auch Abb. 52). Bei einigen ganz wenigen Trendabweichungen in den B-Gehalten könnten aber auch Aufschluss-/Analytik-Probleme bei der sehr komplexen B-Analytik eine Rolle spielen.

Probe Nr.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	C	As	B	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	La	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn	Zr		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm																										
Pf-1/1	64,0	0,7	12,0	3,2	0,08	5,8	3,1	3,6	0,9	<0,5	1,3	1	77	153	<1	59	10	86	3	16	30	<1	15	29	36	17	38	2	10	60	11	3	101	20	25	177		
Pf-1/2	54,0	0,7	11,3	3,8	0,19	6,3	6,2	2,3	1,2	<0,5	3,4	1	58	247	<1	61	12	77	3	23	31	<1	14	29	43	14	60	2	10	93	11	3	111	22	41	177		
Pf-1/3	52,0	0,7	13,0	4,8	0,19	3,7	2,8	1,2	2,0	<0,5	4,8	3	75	485	<1	75	16	82	5	34	38	<1	15	34	51	32	102	<1	10	149	10	3	122	23	57	208		
Pf-1/4	54,0	0,7	13,0	4,9	0,17	2,8	2,9	0,7	2,3	<0,5	4,5	1	79	565	<1	76	16	83	5	32	38	<1	14	33	46	16	115	1	10	160	12	3	121	22	45	225		
WO-1/1	56,0	0,8	16,5	8,6	0,16	2,7	1,4	0,2	3,2	<0,5	1,6	1	53	644	<1	94	23	91	7	33	51	<1	15	40	77	34	194	4	10	142	13	3	101	24	128	207		
WO-1/2	55,0	0,6	17,3	9,3	0,28	2,0	1,3	0,4	3,2	<0,5	1,7	1	87	592	<1	90	25	81	6	33	46	1	14	38	101	14	170	3	9	149	12	2	96	24	160	176		
WO-1/3	57,0	0,8	18,2	7,3	0,11	2,0	1,0	0,4	3,6	<0,5	1,6	1	31	588	<1	101	20	95	7	43	54	<1	15	46	77	33	172	3	10	100	12	3	118	27	112	213		
WO-1/4	55,0	0,7	20,5	5,7	0,08	1,9	1,4	0,2	2,9	<0,5	2,2	1	51	574	<1	97	18	106	7	80	52	1	15	46	81	15	149	2	9	122	14	6	160	29	84	172		
WO-1/5	53,0	0,7	18,6	5,6	0,12	2,0	1,5	0,4	2,5	<0,5	3,4	1	91	561	<1	85	17	109	5	92	43	2	15	39	68	26	119	<1	9	147	13	5	157	25	81	188		
WO-1/6	54,0	0,7	19,0	6,5	0,15	2,9	1,9	0,2	2,1	<0,5	2,1	1	115	523	<1	94	19	97	6	69	50	<1	15	43	80	15	105	2	9	145	13	3	143	27	91	167		
WO-1/7	51,0	0,7	20,6	7,9	0,12	2,5	1,6	0,2	1,8	<0,5	1,8	1	109	474	<1	82	22	113	5	129	43	<1	15	40	107	36	95	2	9	136	11	3	166	28	128	151		
WO-1/8	54,0	0,7	18,1	7,4	0,21	4,1	2,6	0,2	2,0	<0,5	1,3	1	94	527	<1	89	20	84	6	41	49	<1	15	43	86	11	109	3	10	143	13	2	106	31	98	164		
WO-1/9	55,0	0,7	17,2	5,8	0,11	4,7	3,5	0,5	2,5	<0,5	1,2	1	73	572	<1	89	17	78	7	33	49	<1	15	42	45	11	127	3	10	155	15	3	86	25	74	172		
WO-1/10	55,0	0,7	17,2	5,5	0,09	4,8	4,1	0,4	2,6	<0,5	1,2	1	79	600	<1	94	18	79	7	31	53	<1	15	44	42	10	137	2	10	167	16	3	84	25	72	163		
WO-1/11	56,0	0,7	16,4	6,0	0,09	4,4	4,5	0,5	2,9	<0,5	1,4	1	64	645	<1	93	18	79	8	37	50	<1	15	42	44	13	162	3	10	191	15	3	97	25	80	167		
Ze-Boden-Halde	56,0	0,4	11,8	6,5	0,04	2,0	1,8	0,6	1,9	<0,5	13,9	5	108	273	<1	72	26	108	2	75	38	5	9	36	49	12	78	<1	8	83	7	3	200	19	11	70		

Tab.7 : Haupt- und Spurenelementchemismus von Bodenproben aus Bodenprofilen im Gebiet Wollmersdorf-Zettenreith-Zettlitz.

Prob. Nr.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	C	As	B	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	La	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn	Zr		
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm																										
A 1-1a	59	1,0	13,0	6,6	0,04	6,2	1,7	2,0	2,9	<0,5	1,5	1	139	178	<1	76	19	106	4	22	41	<1	15	35	64	10	158	3	13	34	13	2	101	25	23	154		
A 1-1	55	1,0	14,6	9,0	0,1	4,3	3,3	0,8	1,8	<0,5	1,5	1	61	264	<1	69	27	212	5	43	34	<1	13	32	142	17	91	2	13	115	9	1	149	26	62	146		
A 1-2	57	0,8	12,8	4,5	0,06	6,0	2,4	2,9	1,3	<0,5	2,5	1	109	149	<1	100	14	113	2	25	56	<1	14	50	69	16	72	1	11	58	14	2	110	29	36	153		
A 1-3	25,78	0,4	9,3	4,7	0,09	2,7	15,0	0,2	0,7	<0,5	13,0	7	65	158	<1	42	19	75	2	69	22	2	8	22	52	12	36	<1	10	173	7	2	123	17	21	76		
A 1-4	46	0,7	11,0	5,4	0,11	3,1	2,4	0,8	1,5	<0,5	6,4	11	96	276	<1	86	18	105	5	35	48	<1	13	44	57	22	88	<1	11	90	11	2	103	30	55	173		
A 1-5	53	0,8	13,6	5,1	0,06	2,4	1,8	0,9	1,2	<0,5	4,5	9	65	283	<1	91	18	111	4	28	46	<1	16	46	50	28	60	<1	11	95	11	2	110	32	57	260		
A 1-6	49	0,7	10,7	5,8	0,08	2,4	2,0	0,8	1,1	<0,5	6,0	9	41	271	<1	77	20	98	4	55	43	1	14	38	49	23	56	<1	11	75	11	1	99	27	51	212		
A 2-1	57	0,8	13,6	5,8	0,09	3,8	2,4	1,5	2,4	<0,5	2,8	1	70	340	<1	86	18	105	4	34	46	<1	14	40	60	20	110	2	11	100	12	2	111	29	62	195		
A 2-2	56	0,9	13,4	6,7	0,09	3,9	2,3	1,1	2,3	<0,5	2,8	1	111	328	<1	94	21	134	4	40	48	<1	15	44	84	19	112	2	11	100	14	2	124	31	57	182		
A 2-3	47	0,7	13,4	6,5	0,11	3,5	2,3	0,9	2,0	<0,5	5,5	1	79	348	<1	86	21	117	5	54	46	1	14	43	77	22	98	<1	11	101	12	1	124	29	48	169		
A 2-4	49	0,7	12,3	5,0	0,11	3,0	6,5	1,3	2,1	<0,5	4,7	1	114	343	<1	91	18	90	4	38	49	<1	14	43	51	19	90	<1	10	146	13	3	102	27	61	205		
WNN 1-1	28,05	0,4	8,4	3,3	0,16	<1	18,3	0,1	1,1	<0,5	13,1	6	16	281	<1	82	24	91	2	157	44	5	10	42	52	3	46	<1	10	297	10	3	192	16	15	99		
WNN 1-2	31,22	0,4	13,2	4,6	0,17	1,3	10,1	0,1	1,9	<0,5	12,8	1	113	344	<1	71	24	100	1	81	38	6	9	38	97	9	69	<1	8	173	9	4	200	19	35	73		
WNN 1-3	50	1,0	19,5	9,5	0,17	1,9	1,6	0,5	3,6	<0,5	2,5	1	85	435	<1	130	27	99	9	44	72	<1	20	56	44	8	228	1	12	167	13	3	137	25	135	134		

Tab. 8: Haupt- und Spurenelementchemismus von Bodenproben aus Bodenprofilen im Gebiet Weinberg/Amstall.

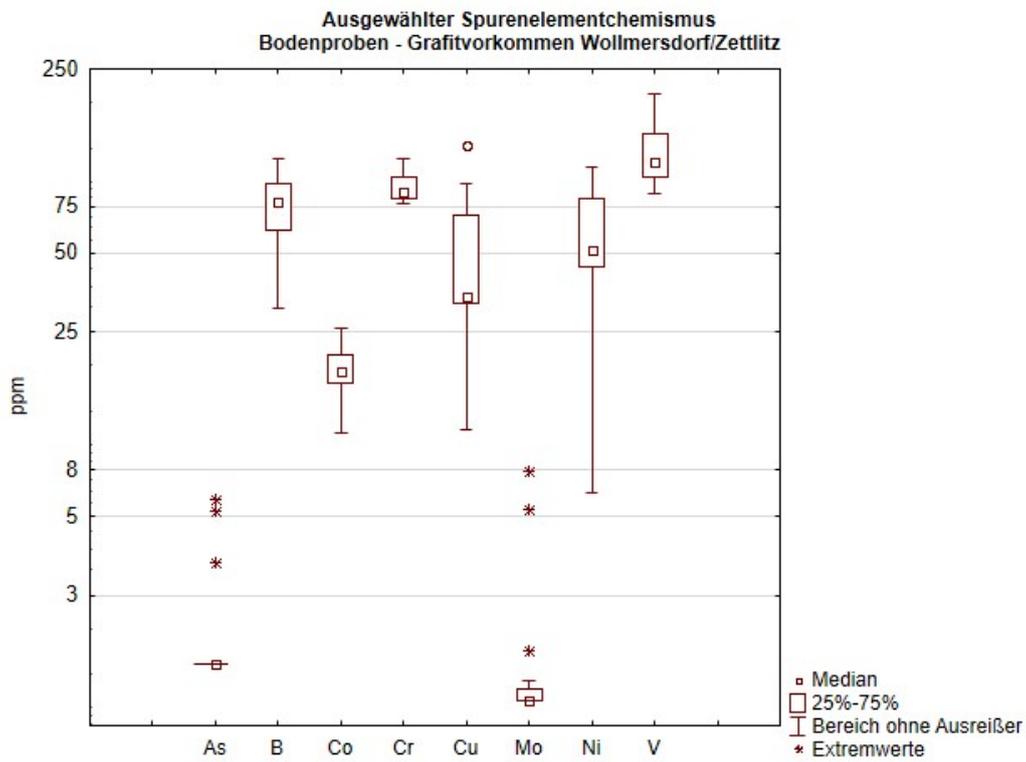


Abb. 58 : Box-Plots-Darstellung ausgewählter Spurenelementgehalte in Bodenproben aus dem Gebiet Wollmersdorf-Zettenreith-Zettlitz

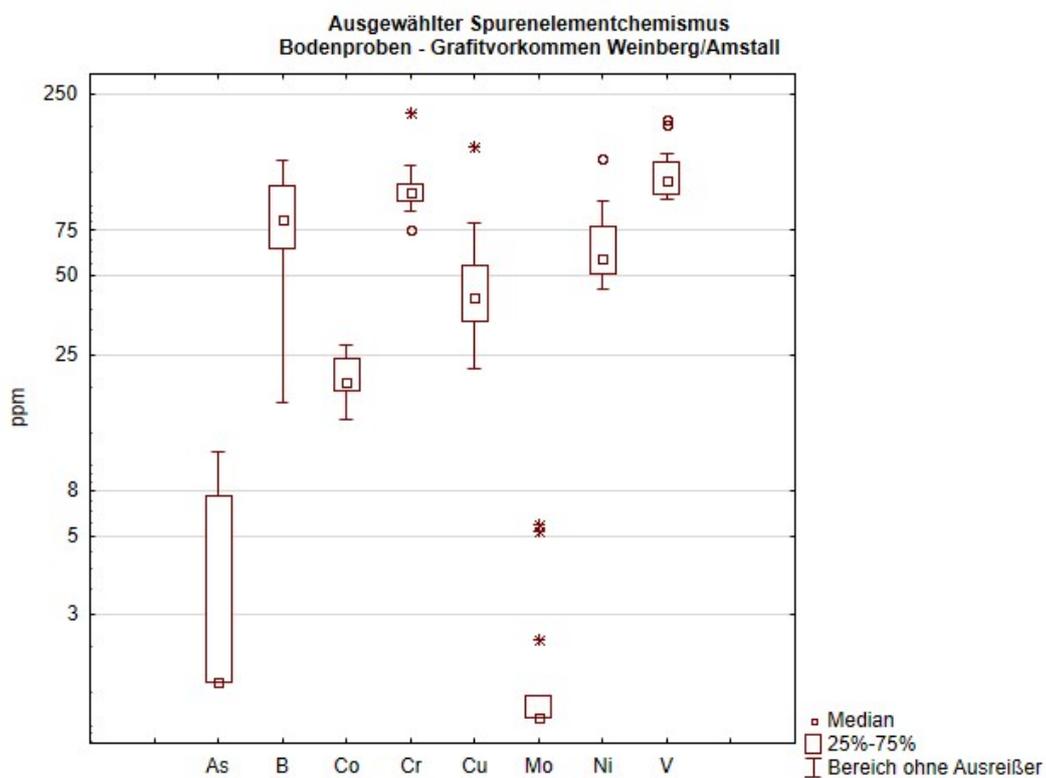


Abb. 59: Box-Plots-Darstellung ausgewählter Spurenelementgehalte in Bodenproben aus dem Gebiet Weinberg/Amstall

As und Mo sind in den Bodenproben hingegen meist deutlich abgereichert. Deren Gehalte liegen bei der überwiegenden Zahl der Bodenproben unterhalb der Bestimmungsgrenze. Bodenproben mit höheren Mo-Gehalten (> 5 ppm) weisen aber auch deutlich höhere C_{ges} -Gehalte auf. Mo ist bei grafitreicheren Böden offensichtlich ebenfalls ein Indikatorelement für Grafitführung im Untergrund. Co zeigt keinen einheitlichen Trend, korreliert aber zum Teil ebenfalls mit höheren C_{ges} -Gehalten. Auch die Verteilung von Cu in den Bodenproben über grafitführenden Gesteinen zeigt eine auffallende Korrelation mit den C_{ges} -Gehalten. Bei Ni und Zn besteht tendenziell eher eine negative Korrelation zu den C_{ges} -Gehalten. Eine vollkommen von allen Trends abweichende Spurenelementverteilung wurde in einer Probe (A 1-1) im Untersuchungsgebiet Weinbergwald Neu festgestellt. Diese Probe wurde am Rande eines Forstweg-Wendeplatzes entnommen und zeigt mit hohen Gehalten an Cr, V, Ni, Zn, Co und Cu eine typisch technogene Zusammensetzung (Maschinenabrieb).

Im Hinblick auf die Eignung bodengeochemischer Prospektionsmethoden ist vor allem die Verteilung indikativer Spurenelemente im Profilverlauf der bodengeochemischen Beprobungen von Bewertungsrelevanz. In den Abb. 60 bis 69 sind ausgewählte Spurenelementgehalte in den jeweiligen Profilverläufen als Säulendiagramme gesondert dargestellt. Zur besseren Korrelation sind den bodengeochemischen Analyseergebnisse Luftbildausschnitte mit den Profillinien gegenübergestellt. In einigen dieser Luftbilder sind die Geländeausbisse von Grafitlinsen auf der Bodenoberfläche deutlich erkennbar.

Das Profil SW von Wollmersdorf quert in seinen zentralen Abschnitten eine im Luftbild markant ausgebildete Grafitlinse, die gegen Norden auskeilt. Südlich des Profils nimmt deren Mächtigkeit wieder zu. Parallel dazu liegt am Westrand des Profils eine etwas weniger deutlich markierte kleinere Grafitlinsenstruktur. Eine weitere Grafitlinse schließt schon außerhalb des Profils weiter im Osten an. Der Verschnitt der Bodenprofile mit den Ausbissflächen der Grafitlinsen widerspiegelt sich in unterschiedlicher Intensität relativ gut in den Verteilungskurven der als indikativ ausgewählten Element B, Co, Cr, Mo, Ni und V. Die Probe WO-1/2 markiert mit etwas höheren B- und Ni-Gehalten den Verschnitt mit der am Westrand des Profils auftretenden kleineren Grafitlinse. V korreliert hier aber nicht mit dem erhöhten B-Gehalt. Wesentlich deutlicher ist die Querung der Grafitlinse zwischen den Probenpunkten WO-1/3 und WO-1/7, wobei die Probe WO-1/7 in diesem Summenprofil ein Maximum aufweist. V ist im Gesamtbereich dieses Profilabschnitts erhöht, während B nur im Ostbereich dieser Grafitlinse signifikant erhöhte Werte aufweist. Cu, Cr und teilweise auch Ni zeigen im Verschnittbereich mit der Grafitlinse ebenfalls höhere Gehalte. Östlich des Probenpunktes WO-1/7 nehmen die Spurenelementgehalte wieder deutlich ab. Im Bereich einer leichten Dunkelfärbung im Luftbild (WO-1/10) ist eine leichte Zunahme im B-gehalt zu beobachten.

Im Profil südwestlich des Pfandlteichs wurde ein kurzes Profil über 2 Grafitlinsen beprobt. Die Spurenelementverteilung in den vier Bodenproben zeigt keine auffallend strukturierten Trends. Der Probenpunkt PF-1/2 zwischen den beiden Grafitlinsen wird lediglich durch einen geringeren B-Gehalt indiziert. Die östliche Grafitlinse (Probenpunkt Pf-1/3) ist durch höhere V-, B-, Ni-, Cu- und Co-Gehalte charakterisiert. Die westlich gelegene Grafitlinse zeigt mit Ausnahme eines erhöhten B-Gehalts keine weiteren indikative Spurenelemente.

Als Referenzprobe für das Testgebiet Zettlitz wurde die Bodenaufgabe einer Abbauhalde im Bergbau Zettlitz beprobt. Die Spurenelementverteilung widerspiegelt sehr gut die typischen Indikatorelemente für Grafitstandorte in der Bunten Serie. Die B- und V-Gehalte sind im Vergleich zu allen anderen Bodenproben des Untersuchungsprogramms deutlich erhöht. Leicht erhöht sind auch die Gehalte bei Cu und Cr. Verbunden mit dem höchsten gemessenen C_{ges} -Gehalt des gesamten Untersuchungsprogramm geht auch eine signifikante Erhöhung des Mo-Gehalts einher.

Das in der östlichen Fortsetzung des Grafitvorkommens VIII im Bergbaurevier Weinbergwald Neu angesetzte Profil A 1-1a bis A 1-6 überlappt sich mit dem Messgebiet der SP-Messungen im Untersuchungsgebiet Weinberg/Amstall. Der Probepunkt A 1-1a am Beginn des Profils zeigt höhere B- und V-Gehalte, die aber mit anderen Indikatorelementen nicht assoziiert sind. Die anomalen Cr-, V- und Ni-Gehalte bei Probepunkt A 1-1 haben -wie bereits erwähnt- eindeutig technogene Ursachen. Die zwischen den Probenahmepunkten A 1-1 und A 1-4 vermutete Fortsetzung der Grafitlinse ‚Vorkommen VIII‘ zeichnet sich in den SP-Messungen deutlich als negative Anomalie ab. Der Beginn dieser Anomalie liegt leider zwischen den beiden Probenahmepunkten A 1-1 (technogen beeinflusst) und A 1-2. Die Spurenelementverteilungsmuster sind in diesem Profilabschnitt leider nicht eindeutig. Der C_{ges} -Gehalt nimmt ab Probepunkt A 1-3 zu und bleibt bis zum Profilende A 1-6 deutlich erhöht. Die B-Maxima liegen bei Probepunkt A 1-2 und A 1-4, während der Profilpunkt A 1-3 mit dem höchsten C_{ges} -Gehalt geringe B-Gehalte bei gleichzeitig etwas erhöhten V- und Cu-Gehalten aufweist. Im Gegensatz zu den anderen Profilen fällt bei diesem Profil eine atypische negative Korrelation zwischen B und V auf.

Das weiter östlich gelegene Profil A 2-1 bis A 2-4 wurde im Bereich einer kleinen SP-Anomalie sowie einer im Luftbild erkennbaren kleinen Grafitlinse angesetzt. Der Verschnitt mit der Grafitlinse im Proben Probepunkt A 2-2 zeichnet sich durch einen erhöhten B-Gehalt aus, während die anderen Spurenelemente mit Ausnahme von Ni und Cr keine signifikante Erhöhung zeigen. Bei den Proben A 2-3 bis A 2-4 tritt wieder eine deutliche Erhöhung der C_{ges} -Gehalte auf. Der Punkt A 2-3 entspricht in etwa dem Bereich mit der negativen SP-Anomalie. Mit Ausnahme von Bor zeigen die indikativen Spurenelemente in dieser Probe durchwegs leicht erhöhte Werte. B nimmt entgegen der anderen Spurenelementtrends am Südende des Profils (A 2-4) wieder deutlich zu.

Als letztes Profil wurde ein kleiner Profilabschnitt in der unmittelbaren Verlängerung des letzten Tagbaus Weinbergwald Neu ‚Vorkommen VII‘ untersucht. Dieser Abschnitt wird stark durch Maßnahmen im Zuge der Schließung und Rekultivierung des Tagbaus beeinflusst. Der Punkt WNN 1-1 liegt auf einem Aufschüttungsbereich östlich des ehemaligen Tagbauareals. Die Verteilungsmuster der indikativen Spurenelemente ist in diesem Bereich weitgehend atypisch. Bei relativ hohem C_{ges} -Gehalt dieser Probe zeigen nur V und Cu eine signifikante Erhöhung, während der B-Gehalt in dieser Probe auffallend gering ist. Punkt WNN 1-2 setzt in unmittelbarer Nähe eines Grafitausbisses an und zeigt die erwartbaren indikativen Muster mit erhöhten V-, B-, Ni-, Co- und Cu-Gehalten und gleichzeitig höherem C_{ges} -Gehalt. Im Referenzpunkt am Ostrand des ehemaligen Tagbauareals sind die Verteilungsmuster ähnlich, aber bei doch deutlich geringeren Absolutgehalten.

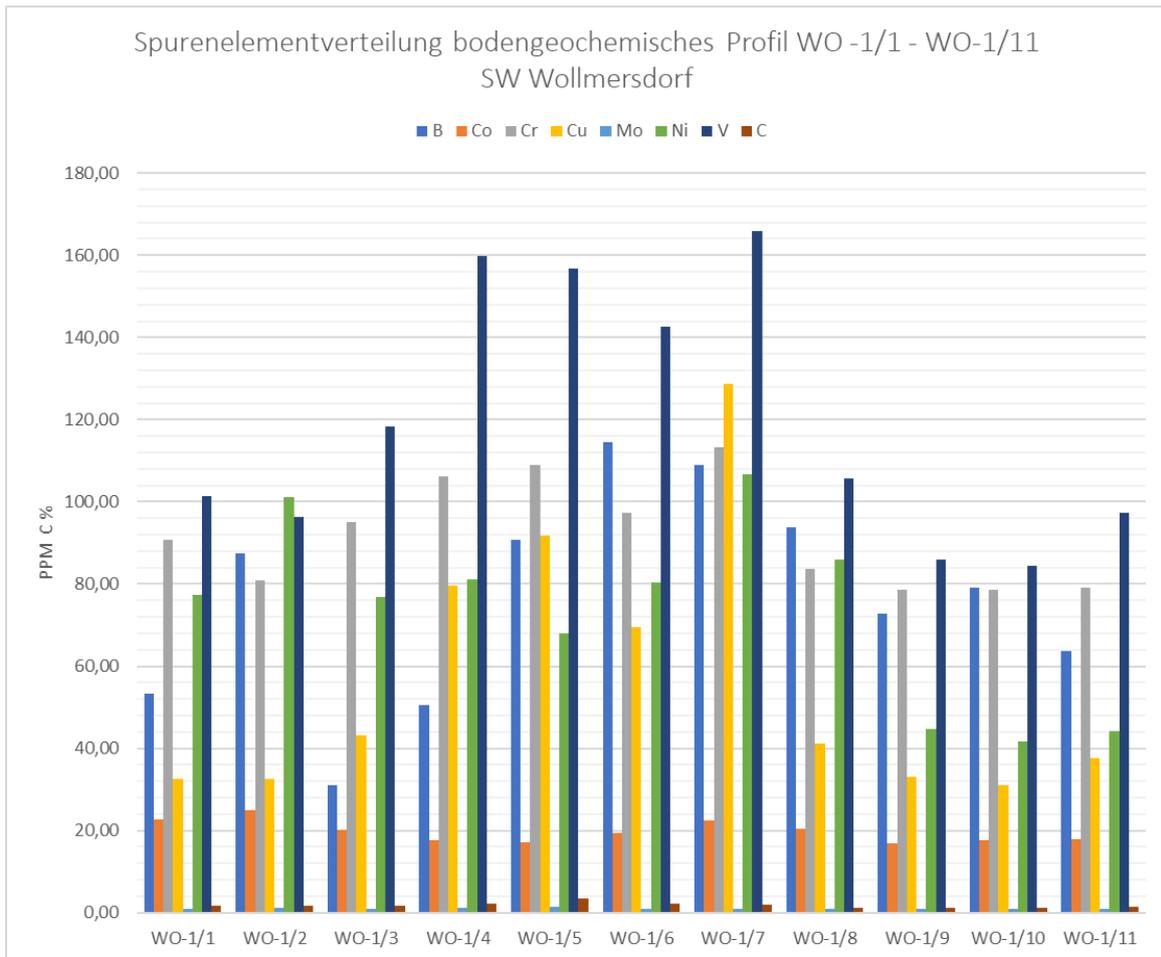


Abb.60 : Spurenelementverteilung in bodengeochemischem Profil WO-1/1 1-1a bis WO-1/11; SW Wollmersdorf



Abb. 61: Lage des bodengeochemischen Profils WO-1/1 1-1a bis WO-1/11; SW Wollmersdorf

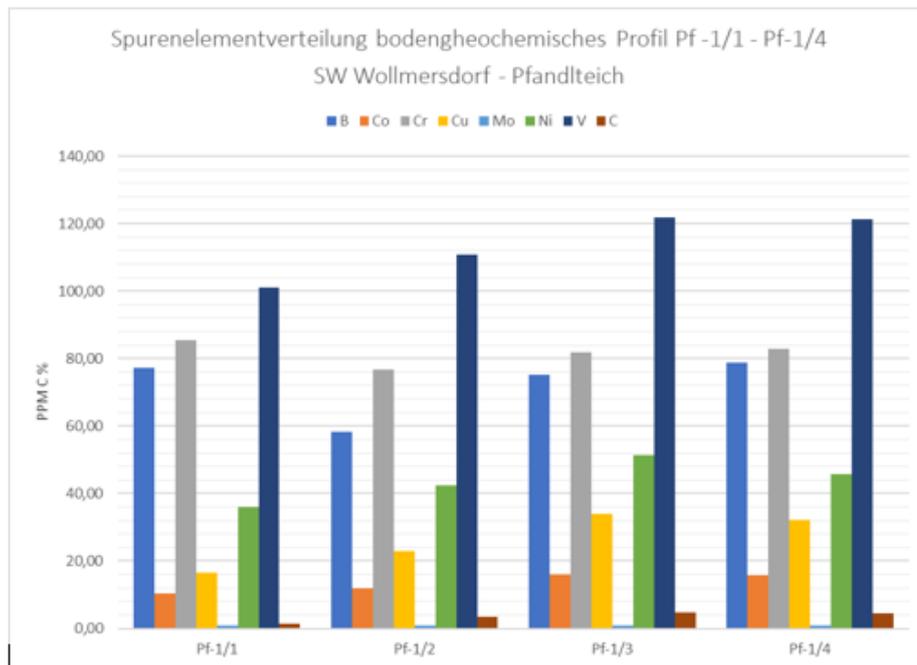


Abb. 62: Spurenelementverteilung in bodengeochemischem Profil Pf 1/1 bis Pf 1/4; Pfandlteich, SW Wollmersdorf

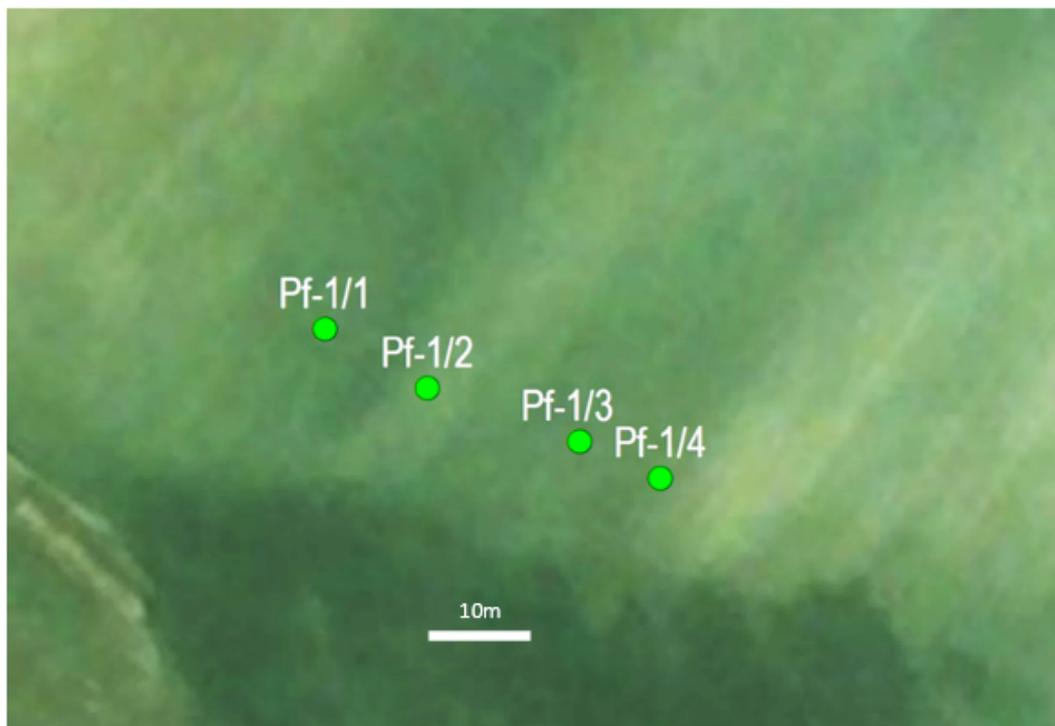


Abb. 63 : Lage des bodengeochemischen Profils Pf 1/1 bis Pf 1/4; Pfandlteich, SW Wollmersdorf

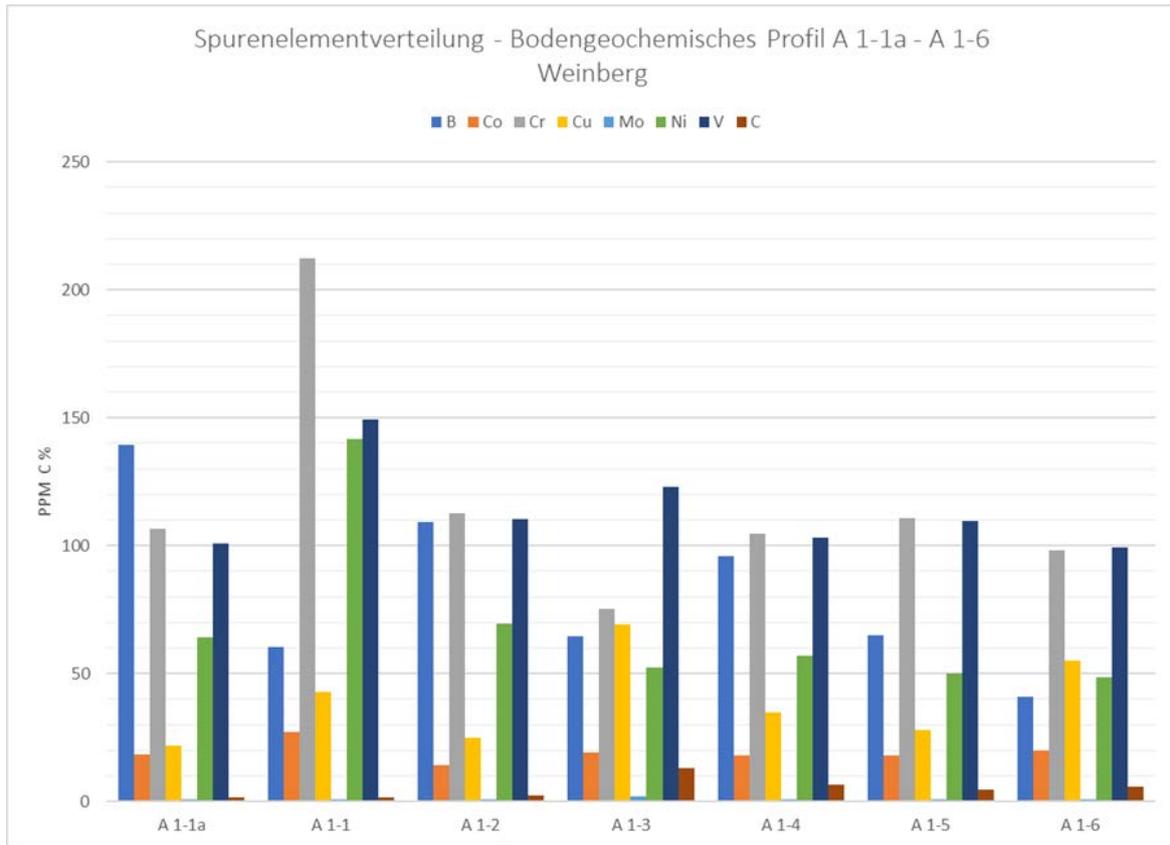


Abb. 64: Spurenelementverteilung in bodengeochemischem Profil A 1-1a bis A 1-6; Weinberg – S Amstall



Abb. 65 : Lage des bodengeochemischen Profils A 1-1a bis A 1-6; Weinberg – S Amstall

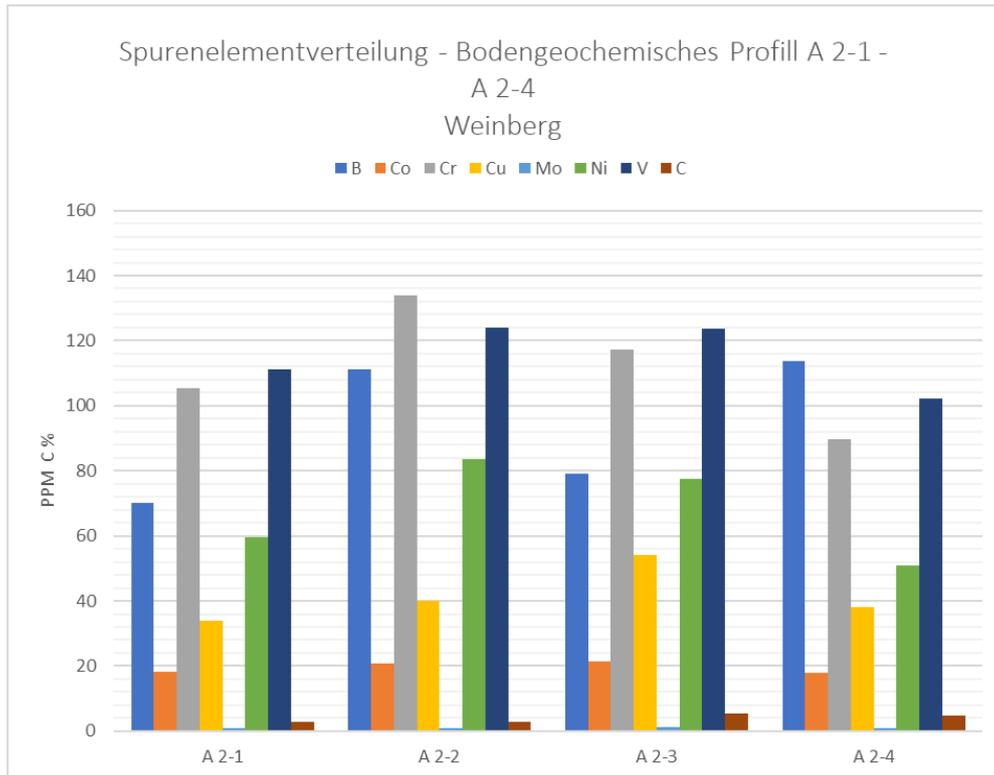


Abb. 66: Spurenelementverteilung in bodengeochemischem Profil A 2-1a bis A 2-4; Weinberg – S Amstall



Abb. 67: Lage des bodengeochemischen Profils A 2-1a bis A 2-4; Weinberg – S Amstall

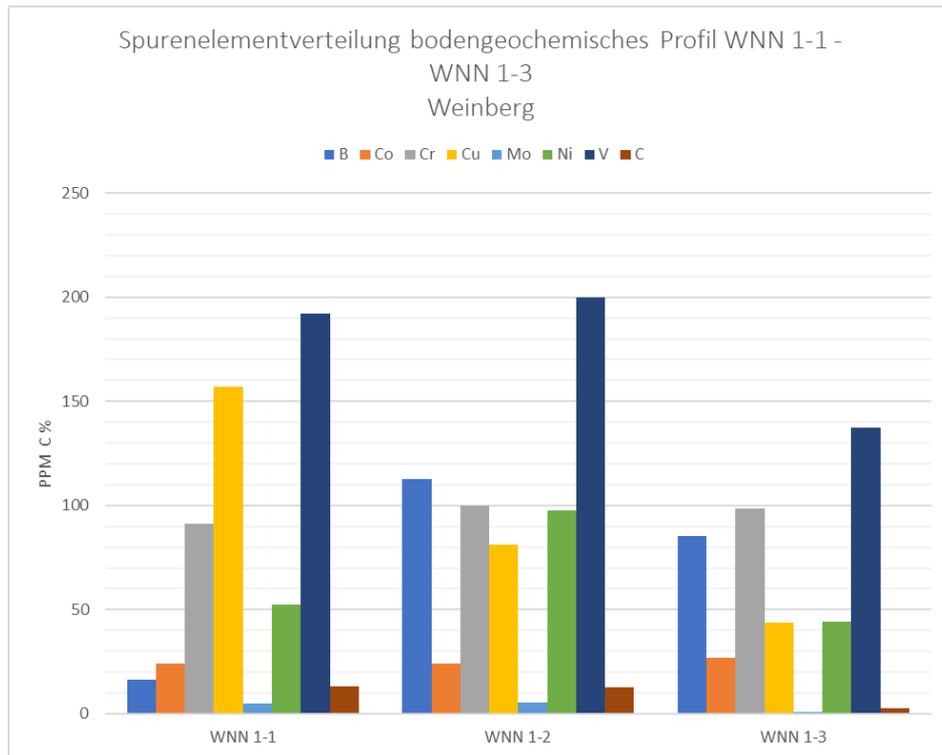


Abb. 68: Spurenelementverteilung in bodengeochemischem Profil WN 1-1 bis WN 1-3; Weinberg – S Amstall



Abb. 69: Lage des bodengeochemischen Profils WN 1-1 bis WN 1-3; Weinberg – S Amstall

6. Methodenbewertung und generalisierte Explorationsstrategie für Grafitlagerstätten

In diesem Kapitel werden die im Projekt EXPLOGRAF eingesetzten Methoden (Geophysik, Geochemie) nochmals im Einzelnen, wie im Projektantrag, beschrieben, hinsichtlich der jeweiligen methodischen Weiterentwicklung dargestellt und einer kritischen Methodenbewertung unterworfen. Zum Schluss wird zusammenfassend eine generalisierte Explorationsstrategie vorgestellt.

Die geophysikalische Exploration von Grafitlagerstätten beruht vor allem auf elektrischen Messverfahren, da Grafit durch seine extrem hohe elektrische Leitfähigkeit diesbezüglich zumeist einen hervorragenden Kontrast zum umliegenden Untergrund darstellt. Der spezifische elektrische Widerstand grafithaltiger Gesteine liegt meist um Größenordnungen niedriger als in vergleichbaren Gesteinen ohne Grafitinlagerungen. Folglich können Lagerstätten mit vernetzten Grafitphasen oft einfach und effizient mithilfe gleichstromelektrischer Methoden erkundet werden. Darüber hinaus ist Grafit eines jener Materialien, die mittels Eigenpotenzialmessungen (SP) sehr gut detektiert werden können. Bei der geochemischen Exploration bildet Bor ein interessantes Marker-Element für Grafit in der Bunten Serie, das - wie teilweise auch Vanadium - hier an das relativ häufig auftretende Borsilikat Turmalin gebunden und gegenüber dem Durchschnitt von pelitischen Sedimenten deutlich angereichert ist.

6.1 Methodenbewertung Eigenpotenzial (SP)/Mise a la Masse

Das elektr. Eigenpotenzial wird durch elektrochemische und elektrokinetische Prozesse verursacht, die in diesem Fall im Bereich des grafithaltigen Untergrundes bzw. in unmittelbarer Nähe dazu als negative SP Anomalie auftreten. Die Aufnahme des Eigenpotenzials erfolgt mit einer einfachen Spannungsmessung zwischen zwei nicht polarisierbaren Elektroden, wobei die Spannungsdifferenz zwischen der mitgeführten Elektroden und einer ortsfesten Referenzelektrode gemessen wird - diese Messungen werden entlang von Profilen oder flächig durchgeführt. Im Bereich von Grafiterkörpern sind generell negative Eigenpotenziale zu erwarten, wobei Werte von bis zu 1.5 V erreicht werden können (TELFORD ET AL., 1990). Bei flächiger Aufnahme werden mit den Eigenpotenzialdaten Isolinien Karten erstellt, wobei, wie bereits erwähnt, negative Eigenpotenzialanomalien grafithaltigen Bereichen zugeordnet werden können. Die Interpretation erfolgt nur qualitativ und wird für eine grobe Eingrenzung potenziell interessanter Bereiche herangezogen. Damit lassen sich aber lediglich laterale Abgrenzung relevanter Bereiche bezüglich des Grafitgehalts vornehmen - genaue geometrische Angaben, vor allem über die Tiefenerstreckung dieser Bereiche, sind nicht möglich.

Methodisch konnte durch den Einsatz des neu angeschafften Eigenpotenzial-Messgerätes in Kombination mit mehreren großen Kabeltrommeln (als Verbindung zur weiter entfernten Referenzelektrode) und einer kleineren mobilen Kabeltrommel die Effizienz der flächigen SP Messung erheblich gesteigert werden. Damit lassen sich mit einem gewissen Aufwand große Distanzen zwischen Messgebiet und Referenzelektrode herstellen. Die jeweiligen SP- Messwerte werden auf einem mobilen Device (Handy), mit dem die Positionsbestimmung mittels GPS durchgeführt wird, zu den Koordinaten eingetragen. Abb. 70 zeigt die mitgeführte Eigenpotenzialsonde des neuen Messsystems.



Abb. 70: Einsatz der mitgeführten Eigenpotenzialsonde bei der flächigen Aufnahme von SP

Damit erhält man ein Datenfile mit den x/y Koordinaten und den SP Messwert am jeweiligen Messpunkt. So lassen sich in überschaubaren Zeiträumen größere Flächen zur SP Aufnahme vermessen. Grundsätzlich ist bei zeitlich unterschiedlichen Aufnahmen eine konstante Position der Referenzelektrode wichtig, um die Potentialdifferenz zu einem fixen Referenzpunkt zu erhalten. Wie in Kapitel 5.2 bereits erwähnt, mussten im Fall der durchgeführten Messungen in Amstall für die einzelnen SP Messkampagnen allerdings unterschiedliche Positionen für die Referenzelektrode gewählt werden. Daher sind die absoluten Werte verschiedener Messkampagnen untereinander nicht in ihren Absolutwerten vergleichbar. Außerdem müsste berücksichtigt werden, dass sich die Bodenverhältnisse zwischen, aber auch während der verschiedenen Messkampagne z.B. durch intensive Niederschläge nicht zu stark ändern.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich aus den bisher erzielten Resultaten die Eigenpotenzialmessung als sehr gute Methode erweist, um auch bei größeren Flächen grafitführende Bereiche abgrenzen zu können.

Mise à la Masse

Im Falle sehr schwacher Eigenpotenzialanomalien, die keine zufriedenstellende Abgrenzung grafithaltiger Bereiche zulassen, kann die Mise-à-la-Masse Methode angewendet werden. Hierbei wird die negative Elektrode für eine aktive Stromeinspeisung direkt im anstehenden Erzkörper, die negative Elektrode möglichst weit entfernt, im nicht grafitführenden Bereich, positioniert. Nun werden während der aktiven Stromeinspeisung im Untersuchungsbereich, wie bei der oben beschriebenen Eigenpotenzialmessung, Spannungsmessungen mit einem nichtpolarisierbaren Elektrodenpaar (die Referenzelektrode befindet sich möglichst weit entfernt vom Erzkörper) entlang von Profilen oder flächig vorgenommen. Die absolute Spannungsdifferenz zwischen Bereichen des umgebenden Gesteins und dem Erzkörper sollte bei dieser Methode um ein Vielfaches stärker ausfallen als bei der Eigenpotenzialmessung und damit sollte sich der Bereich des grafithaltigen Untergrundes als positive Spannungsanomalie abzeichnen. Dadurch erhöht sich einerseits die Genauigkeit der lateralen Abgrenzung des grafithaltigen Bereichs und andererseits ist diese Abgrenzung auch in Gegenden möglich, die aufgrund von starken Störeinflüssen (Stromleitungen, Sender,...) keine hinreichend verlässliche Eigenpotenzialmessung zulassen.

Für die Stromeinspeisung wurde eine eigene Einheit konstruiert, die auch einwandfrei funktioniert hat. Den Kern der für die Mise a la Masse Messung entwickelten Stromeinspeiseinheit (siehe Abb. 71) stellen die bereits im Geomon4D verwendeten Verstärkermodule dar, die je nach Schaltung 5 verschiedene Einspeisspannungen erzeugen können (48, 96, 191, 286 und 391 V). Um die eingespeiste Stromstärke überwachen zu können wurde ein Amperemeter in die Schaltung integriert. Somit kann einerseits die aktuell eingespeiste Stromstärke abgelesen werden und andererseits kann sofort eine Überlastung der Verstärker, die max. 1.2 Ampere liefern können, erkannt werden und ein entsprechend niedrigerer Spannungsbereich gewählt werden. Die Verstärkermodule, die elektronischen Bauteile, die Verkabelung sowie ein benötigter Spannungswandler (230 V AC - 24 V DC) sind in einem robusten, feldtauglichen Pelicase verbaut. Für die Stromeinspeisung wird ein Generator bzw. ein Stromnetzanschluss mit einer Mindestleistung von etwa 500 Watt benötigt.



Abb. 71: neu entwickelte Einheit zur Stromeinspeisung für die Mise-à-la-Masse Methode

Ein erster Test wurde direkt auf der Tagbausohle des letzten Grafitabbaus in Amstall durchgeführt. Zunächst wurden 10 normale SP-Messungen größtenteils im Bereich des Grafitkörpers durchgeführt. Danach wurde die negative Stromelektrode im vermuteten Bereich des Grafitkörpers installiert und die dazugehörige positive Stromelektrode etwa 100-150 m entfernt positioniert. Die positive Stromelektrode wurde etwa 40 m entfernt von der Potenzialreferenzelektrode gesetzt. Die negative Stromelektrode wurde mehrmals um wenige Meter umgesetzt, um möglichst viel Strom einzuspeisen. Schlussendlich konnten etwa 900 mA bei 286 V eingespeist werden. Die zeitgleiche SP-Messung hat allerdings nur im Nahbereich (5-6 m) der negativen Stromelektrode einen deutlichen Effekt bei der gemessenen Spannung im Vergleich zum ungestörten SP gezeigt (z.B. 0.6 zu 1.4 V). Bei größeren Distanzen zur negativen Stromelektrode war zwar noch ein Effekt nachweisbar, allerdings nur im Bereich von wenigen mV.

Im Untersuchungsgebiet Zettlitz wurden ebenfalls zusätzlich zu den SP-Messungen im Bereich der ersten Etage des zuletzt aktiven Tagebaues, Testmessungen mittels der Mise à la Masse Methode durchgeführt. Diese Testmessungen zeigten, dass, entgegen der theoretischen Vorstellung, es zu keiner signifikanten Änderung der gemessenen Spannungsdifferenzen im Vergleich zu den SP-Messungen am gleichen Standort kam. Trotz verschiedenster Versuche (unterschiedliche Lokation der Stromeinspeisung, unterschiedliche Stromstärke,...) konnte kein nennenswerter Effekt einer Erhöhung der Spannungsdifferenz erzielt werden. Die Gründe dafür konnten nicht restlos geklärt werden. Es könnte sein, dass durch die, im Bereich der Stromeinspeisung zwar geringmächtigen aber dennoch vorhandene, oberflächennahe Verwitterungsschicht, keine ausreichend gute Anbindung an den grafitreichen Störkörper erzielt werden konnte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit dem Testeinsatz der Mise à la Masse Methode keine Verbesserungen im Vergleich zu den rein passiven SP-Messungen erzielt werden konnten. Obwohl an unterschiedlichen Stellen versucht wurde, elektrischen Strom in den anstehenden grafitreichen Untergrund einzuspeisen (was auch in ausreichendem Maße gelungen ist), konnte kein signifikanter Unterschied in den gemessenen Spannungswerten zur normalen SP-Messung bemerkt werden. Lediglich im Nahbereich (unter 10 m) zur einspeisenden Stromelektrode konnten in einem Testgebiet (Amstall) deutlich veränderte Spannungswerte festgestellt werden. Als Erklärung für den eher geringen Effekt durch die Stromeinspeisung können folgende Gründe angenommen werden:

- Zusätzliche Stromeinspeisung war zu gering
- Keine optimale Anbindung an den grafitreichen Untergrund/Störkörper
- kein klar definierter Störkörper (grafitreich) vorhanden

In der Literatur (KNÖDEL et al., 2005) finden sich Informationen, wonach die direkte Anbindung an den leitfähigen Körper unbedingt notwendig ist, um entsprechende Effekte zu erzielen. Abschließend muss aber erwähnt werden, dass bei den Untersuchungsgebieten die Bandbreite der gemessenen Spannungen bei der SP-Messung ausreichend groß war, um grafitreiche Bereiche klar abgrenzen zu können, sodass der Einsatz der Mise à la Masse Methode hier als nicht unbedingt notwendig erscheint.

6.2 Methodenbewertung Geoelektrik und Induzierte Polarisierung (IP)

Hier soll, in Anlehnung an die im Projektantrag beschriebenen geoelektrischen Methoden, die spezifische Methodik nochmals kurz dargestellt und auf einzelne aus den Projektergebnissen gewonnenen Erkenntnisse, zum Einsatz von geoelektrischen Verfahren zur Charakterisierung von grafitführenden Bereichen, eingegangen werden. Die Gleichstromgeoelektrik basiert auf einer 4-Punkt Elektrodenanordnung, wobei zwei Elektroden zur Stromeinspeisung und zwei weitere Elektroden für die gleichzeitige Spannungsmessung verwendet werden. Mit diesem Wertepaar (Strom und Spannung) und der Geometrieinformation zur verwendeten Elektrodenanordnung kann ein scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand berechnet werden. Durch den Einsatz von Multielektrodensystemen kann auf diese Weise innerhalb von relativ kurzer Zeit eine große Anzahl von Messpunkten produziert werden, die aufgrund der jeweiligen Elektrodenanordnung Informationen bezüglich des spezifischen elektrischen Widerstandes aus unterschiedlichen Tiefen beinhalten. Mittels Inversionsrechnung können die Messdaten in ein Untergrundmodell des spezifischen elektrischen Widerstandes in Form eines 2D- Schnittes des Untergrundes entlang des Geoelektrik-Profiles umgesetzt werden. Die maximale Eindringtiefe beträgt etwa ein Fünftel der gesamten Profillänge.

Ein Ziel war die laterale Abgrenzung und die Bestimmung der Tiefenerstreckung von grafitführenden Bereichen, die mittels SP Messungen nicht möglich ist. Wie in Kapitel 5.4 anhand von geoelektrischen Modellrechnungen gezeigt wurde, ist die Bestimmung der Unterkante einer sehr leitfähigen (grafitführenden) Schicht, nicht so ohne weiteres möglich. Zum einen müssen die geometrischen Verhältnisse (Auslagenlänge des geoelektrischen Profils zu Überdeckung und Mächtigkeit der grafitführenden Schicht) passend sein, zum anderen zeigen die Ergebnisse, dass die Mächtigkeit der leitfähigen Schicht als deutlich zu groß interpretiert werden würde. Es müssen noch weitere Versuche bei den Einstellungen der Inversionsparameter unternommen werden, um das Ergebnis in dieser Hinsicht zu verbessern.

Eine Erweiterung der Gleichstromgeoelektrik stellt die Methode der Induzierten Polarisierung (IP) dar. Die induzierte Polarisierung (IP) ist eine geoelektrische Untersuchungsmethode, bei der die sogenannte Aufladbarkeit der Gesteine berücksichtigt wird. Sie erlaubt die Messung zusätzlicher, vom Gleichstromwiderstand unabhängiger, materialspezifischer elektrischer Parameter und ermöglicht somit weitergehende stoffliche und strukturelle Aussagen (KNÖDEL et al., 2005). Die Methode kann im Zeitbereich (TDIP) oder im Frequenzbereich (FDIP) erfolgen. Einfach gesagt wird bei der TDIP das Abklingverhalten der Spannung nach erfolgter Stromabschaltung untersucht, wohingegen bei der FDIP die Stromeinspeisung mit unterschiedlichen Frequenzen erfolgt und hier vor allem die Phasenverschiebung der gemessenen Spannung zur Stromeinspeisung die unterschiedlichen Polarisierungseffekte widerspiegelt. Die Gesamtheit der Vorgänge im Untergrund die zur induzierten Polarisierung beitragen sind zum Teil noch nicht gänzlich geklärt, der überwiegende Teil des gemessenen Effekts lässt sich aber im Wesentlichen auf zwei relativ gut erforschte Phänomene reduzieren (TELFORD et al., 1990):

- die Elektrodenpolarisation – diese wird verursacht durch die Unterschiede zwischen Ionen- und Elektronenleitfähigkeit in Gesteinen mit metallischen oder sulfidischen Beimengungen;
- die Membranpolarisation: Ursache der Membranpolarisation ist die unterschiedliche Mobilität von Ionen im Porenraum der Gesteine. Sie tritt oft an Gesteinen mit kleinen Porenweiten auf. Die von der Membranpolarisation verursachten Messeffekte sind in der Regel um eine Größenordnung kleiner als die bei Auftreten von Elektrodenpolarisation.

Zur Unterscheidung zwischen Grafit- und metallischen Erzlagerstätten, die oft unter ähnlichen geologischen Rahmenbedingungen auftreten und einen ähnlichen spezifischen elektrischen Widerstand aufweisen können, kommt bereits seit Jahrzehnten die Methode der Induzierten Polarisation (IP) zur Anwendung (SEIGEL et al., 2007). Da sich die geometrischen Grenzflächen zwischen metallischen Leitern (z.B. Grafit, metallische Sulfide) und dem porenfüllenden Wasser unter dem Einfluss eines von außen aufgeprägten Stromes in der Regel stark aufladen, können mit der IP-Methode selbst fein verteilte und nicht zusammenhängende Grafiteinlagerungen nachgewiesen werden (TELFORD et al., 1990).

Mit im Zeitbereich (TDIP) oder bei verschiedenen Frequenzen durchgeführten IP-Messungen (FDIP) kann nicht nur die Stärke der Polarisationserscheinungen erfasst werden, sondern auch die Zeitskala, auf der die Polarisationsladungen relaxieren. Anhand dieser Relaxationszeit können zusätzlich geometrische Parameter wie Korngröße und Partikelverteilung abgeschätzt werden (PELTON et al., 1978; FINK et al., 1990).

Die Spektrale Induzierte Polarisation (SIP) ist die Frequenzbereichsmethode, mit der die Relaxationszeit sehr genau bestimmt werden kann und die daher ein großes Potenzial für die Erkundung von Grafitvorkommen besitzt.

Wie die bisher gezeigten Ergebnisse demonstrieren, konnte die Praxistauglichkeit für die Erkundung von grafitführenden Bereichen mittels Geoelektrik, sowohl mittels elektr. Widerstand, als auch durch den Parameter Polarisierbarkeit aus den IP Messungen, sehr gut nachgewiesen werden. Es müssen aber weitere Feldmessungen einerseits an bekannten, mit Bohrerergebnissen, belegten geologischen Verhältnissen durchgeführt werden, andererseits können Labormessung an Handstücken die Zusammenhänge von Gehalt an Kohlenstoff bzw. anderen Inhaltsstoffen, Korngröße und Partikelverteilung besser verständlich machen. Dieser Ansatz soll in einem in der Antragsphase befindlichen VLG-Projekt weiter untersucht werden.

Eine Untersuchung der Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) des elektr. Widerstandes ergab, wie in Kapitel 4.3. anhand der beiden Geoelektrikprofile 6 und 7 gezeigt werden konnte, dass keine anisotrope Eigenschaften des elektr. Widerstandes zu erkennen war. Auch beim Vergleich von Messungen mit Stahlspeisen im Vergleich zu unpolarisierbare Elektroden waren anhand der Ergebnisse des GEOMON-IP keine Unterschiede im zeitrelevanten Messbereich zu erkennen.

6.3 Methodenbewertung Geochemie bodengeochemischer Prospektionsmethoden bei der Erkundung von Grafitvorkommen

Die erfolgreichen Methodentests von bodengeochemischen Prospektionsmethoden zur Untersuchung von Grafit-Vorkommen erlauben bereits erste grundsätzliche Aussagen über deren Einsatzmöglichkeiten auf lokaler bis regionaler Ebene. Durch integrative Auswertung geochemischer Daten aus dem Verbreitungsgebiet der Grafitvorkommen im Drosendorf-Deckensystem (Bunte Serie) konnten einige charakteristischen Indikatorelemente für die bodengeochemische Grafit-Prospektion abgeleitet werden, die anhand ausgewählter Messprofile erfolgreich getestet werden konnten. Mit den beiden Elementparametern B und V stehen für den spezifischen Grafittypus des Drosendorf-Deckensystem (Bunte Serie) sehr plausible bodengeochemische Indikatorelemente zur Verfügung, die sich von überregionalen Daten aus der Bachsedimentgeochemie bis hin zum regionalen Spurenelementchemismus von Grafitgesteinen verfolgen lassen. Das regionale geochemische Charakteristikum für die Elemente B und V basiert auf der hohen Turmalinführung der Flinzgrafite des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie). Aufgrund ihrer sapropelitischen Entstehung der Flinzgrafite sind zudem Co, Ni, Cu und Mo in unterschiedlichem Ausmaß indikativ und finden sich auch in den bodengeochemischen Mustern einiger Bodenmessprofile wieder.

Die Aussagekraft bodengeochemischer Daten bei der Prospektion von Grafitvorkommen hängt jedoch von verschiedenen, etwas einengenden Einflussfaktoren ab. Im Gegensatz zu geophysikalischen Prospektionsmethoden sind räumliche Aussagen bei bodengeochemischen Methoden limitiert. Flächige Aussagen erfordern eine dichtes bodengeochemischen Probenraster, Aussagen über die Tiefenerstreckung bleiben auf oberflächennahe Verwitterungsbereiche von Grafitkörpern beschränkt. Böden über Grafitkörper zeigen häufig auch nicht mehr dieselben Spurenelementmuster wie die Festgesteine. Eine genauere Kenntnis der möglichen Verwitterungs- und Umlagerungsprozesse ist daher bei der Interpretation der bodengeochemischen Daten hier besonders wichtig. Zur Entwicklung fundierter Prospektionsmethoden müssten diese zudem auch an verschiedene Bodentypen getestet werden. Im Bereich intensiv landwirtschaftlich genutzter Flächen kommt hinzu, dass durch die maschinelle Bearbeitung der Böden die relativ scharfen geochemischen Muster überprägt sein können.

Eine überregionale bodengeochemische Prospektion auf Basis vordefinierter, einheitlicher Indikatorelemente erscheint aus dem Erfahrungen beim Methodentest nicht zielführend, da Grafite auch im Bereich des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie) überregional bis lokal auf Aufschlussebene einer großen geochemischen Variabilität unterworfen sind. Eine lokale bis regionale Adaption der Indikatorelemente auf Basis regionaler geochemischer Kenndaten von Grafitgesteinen erscheint für den erfolgreichen Einsatz bodengeochemischer Prospektionsmethoden besonders wichtig. Im Gegensatz zu den älteren Makrografiten in der Böhmischen Masse erfordern die Mikrografite des Karbons in der Grauwackenzone (Typus ‚Kaisersberg‘) wieder andere geochemische Prospektionsstrategien. Die Mikrographite von Kaisersberg und Sunk entsprechen in ihren Spurenelementgehalten eher typischen Kohlegesteinen und weisen wie die Anthrazite verringerte Elementkonzentrationen auf. Indikativ für Mikrografite sind die für Kohlegesteine typischen Elemente B, Be, Ge Cr und Zn.

Die Vergleichbarkeit und die gezielte Nutzung bisheriger geochemischer Daten von grafitischen Gesteinen aus dem Drosendorf-Deckensystem (Bunte Serie) für Prospektionsbelange wird dadurch erschwert, dass gerade beim Indikatorelement Bor bisher relativ wenig Gesteinsanalysendaten vorliegen. Bor ist wie Vanadium in den Grafiten der Bunten Serien vorwiegend an Turmalin gebunden.

Um valide B-Analysedaten zu erhalten, sind ein Totalaufschluss des Turmalins und eine komplexe B-Analytik unabdingbar. Im Rahmen des gegenständlichen Projekts wurde daher der sorgfältigen Bor-Analytik ein besonderer analysetechnischer Akzent gesetzt.

Geophysikalische Prospektions-/Explorationsmethoden bei der Suche von Grafitvorkommen bleiben den bodengeochemischen Methoden ob ihrer räumlichen Aussagemöglichkeiten noch immer deutlich überlegen. Zur Verifizierung oberflächennah indizierter geophysikalischer Anomalien sind jedoch bodengeochemische Methoden sehr gut geeignet. Vor der explorativen Erkundung von Grafitvorkommen können bodengeochemische Prospektionsmethoden daher vor allem als methodische Ergänzungen zu den geophysikalischen Messprogrammen eingesetzt werden.

6.4 Generalisierte Explorationsstrategie für die Bewertung des Lagerstättenpotentials

Wie im Projektantrag angeführt soll „Ausgehend von den bekannten Grafitkörpern für die ausgewählten Grafit-Lagerstätten Amstall-Weinberg und Zettlitz auf Basis der zur Verfügung stehenden geologisch-lagerstättenkundlichen Unterlagen und den erzielten Ergebnissen der geophysikalischen und geochemischen Untersuchungen eine optimierte, möglichst generalisierte Explorationsstrategie für diesen Typ von Grafitlagerstätten entwickelt werden“.

Zusammenfassend kann auf Basis der in den beiden Messgebieten erzielten Ergebnisse eine generalisierte Explorationsstrategie für die Erkundung von Graphitvorkommen abgeleitet werden, die zusammengefasst aus folgenden Komponenten besteht:

- Eine (relativ rasche) flächige Vorerkundung durch Messungen des Eigenpotenzials (SP) zur lateralen Abgrenzung möglicher höffiger Gebiete
- Gezielte Erkundung von SP-Anomaliebereichen mittels Geoelektrik und Induzierter Polarisation
- Gezielte Probenahme für geochemische Beprobung, wobei der Prospektionsindikator standortspezifisch ist. Bei den Untersuchungsgebiete Zettlitz und Amstall waren dies v.a. Bor und Vanadium.

Zur Validierung v.a. der Ergebnisse der Induzierten Polarisation wären zusätzlich Ergebnisse aus Bohrkernuntersuchungen (Grafitgehalte, etc.) an tieferen Bohrung erforderlich.

7. Publikationen, Vorträge und wissenschaftliche Arbeiten

Vortrag und Beitrag im Abstractband zur BVÖ Herbstveranstaltung
„Kolloquium Forschungspartnerschaften Mineralrohstoffe“



Online Herbstveranstaltung 2020

**"Kolloquium Forschungspartnerschaften
Mineralrohstoffe"**

05. bis 06. November 2020



BERGMÄNNISCHER VERBAND ÖSTERREICHS
TECHNISCH - WISSENSCHAFTLICHER VEREIN
MONTANUNIVERSITÄT - FRANZ-JOSEF-STRASSE 18 - A - 8700 LEOBEN
TELEFON und Fax: (0 38 42) 45 2 79 E-Mail: bvoe@unileoben.ac.at

Online Herbstveranstaltung 2020

**"Kolloquium Forschungspartnerschaften
Mineralrohstoffe"**

05. bis 06. November 2020

Abstract:**Anwendung von elektrischen und elektromagnetischen Verfahren zur Charakterisierung von Graphitvorkommen**

Mag. Alexander Römer, Geologische Bundesanstalt, Assoc. Prof. Dr. Adrian Flores Orozco, Dipl.-Ing. Lukas Aigner, Dipl.-Ing. Tímea Katona, TU Wien, Dr. Albert Schedl, DDipl.-Ing. Christian Benold, Mag. David Ottowitz, Geologische Bundesanstalt

Der mineralische Rohstoff Grafit wird aufgrund seiner hohen ökonomischen Bedeutung und des vorhandenen Versorgungsrisikos auch in der aktualisierten Studie der Europäischen Kommission als kritischer Rohstoff eingestuft. Mit der zunehmenden Nachfrage nach hochwertigem Naturgrafit (z. B. als Anodenmaterial in Lithium-Ionen-Akkus) kam es in den letzten Jahren weltweit zu einer enormen Zunahme von Grafit-Prospektions-/Explorationsprojekten. Im Gegensatz zu den meisten anderen kritischen Rohstoffen bestehen in Österreich für Grafit aufgrund der vorhandenen geologischen Rahmenbedingungen und des rohstoffwirtschaftlichen Kenntnisstandes noch durchaus abbauwürdige Rohstoffpotenziale, wobei die überwiegende Produktion auf die Grafitlagerstätten in der Bunten Serie in Niederösterreich fiel. Damit zählte Österreich für mehrere Jahre weltweit zu den Spitzenproduzenten bei Grafit. Aktuell besteht nur mehr ein Abbaubetrieb (Kaisersberg) mit einer bescheidenen Jahresförderung von 150 t für Sonderprodukte.

Fokus des gegenständlichen Projektvorhabens waren bekannte Grafitvorkommen im Bereich der Bunten Serie in Niederösterreich, bei denen noch ein geologisches Lagerstättenpotenzial vermutet wird. Die Grafit-Mineralisationen treten hier in Wechselfolgen von Marmoren, Schiefergneisen, Quarziten und Amphiboliten des Drosendorf-Deckensystems (Bunte Serie) in Form von schicht-konkordant im Nebengestein eingelagerte Lagerlinsen auf, die durch tektonische Überprägung zu Linsen unterschiedlicher Dimension geformt wurden. Als Zielobjekte der geplanten Untersuchungen wurden die beiden Lagerstättenbereiche Weinberg/Amstall und Zettlitz ausgewählt, die beide im Österreichischen Rohstoffplan als sicherungswürdig eingestuft sind.

Die angestrebten und im gegenständlichen Projekt umgesetzten Ziele waren einerseits die Untersuchung von vermuteten Restpotenzialen in ausgewählten Grafitlagerstätten der Bunten Serie mittels moderner geophysikalischer Explorationsmethoden (elektr. Widerstand, Eigenpotenzial (SP), Induzierte Polarisationsmessungen im Zeit- und Frequenzbereich (IP/SIP)). So wurden zuerst grobe laterale Abgrenzungen von grafitführenden Bereichen mittels Messung des Eigenpotentials (SP/self potential) durchgeführt. Des Weiteren wurden, aufbauend auf den Ergebnissen der SP Messungen, Detailuntersuchungen mittels elektromagnetischer und v.a. mittels geoelektrischer Verfahren (elektr. Widerstand und IP/SIP) durchgeführt. Mit diesen Ergebnissen konnten Abschätzungen zur lateralen (und zum Teil vertikalen)

Verbreitung relevanter Bereiche der Grafitvorkommen getroffen werden. Die Expertise für die IP/SIP Verfahren wurde von der Arbeitsgruppe Geophysik am Department of Geodesy and Geoinformation der TU Wien eingebracht.

Begleitend zu den geophysikalischen Feldmessungen wurden geochemische Prospektionsmethoden getestet, die in Abhängigkeit von Ergebnissen geophysikalischer Messprofile im Bereich oberflächlich indizierter Ausbisse z.B. von Grafitlinsen im Messgebiet Zettlitz bzw. im Bereich eines geoelektrischen Profils in Amstall mit Bor und Vanadium als Indikatorelement für Grafitvorkommen durchgeführt wurden. Die extrem tumalinreichen, grafitführenden Gesteine der Bunten Serie liefern mit höheren Bor und Vanadium-Gehalten gute Prospektionsindikatoren.

Für die ausgewählten Grafitlagerstätten Weinberg/Amstall und Zettlitz konnten einerseits eine entsprechende generalisierte Explorationsstrategie und im Weiteren erste grobe Abschätzungen des relevanten (Rest)Lagerstättenpotenzials entwickelt werden.

Vortrag bei BVÖ Kolloquium



**Alexander Römer¹, Adrian Flores Orozco², Lukas Aigner², Timea Katona²,
Albert Schedl¹, Christian Benold¹, David Ottowitz¹**

Anwendung von elektrischen und elektromagnetischen Verfahren zur Charakterisierung von Grafitvorkommen

MRI-PROJEKT EXPLOGRAF

BVÖ Herbstveranstaltung 2020
„Kolloquium Forschungspartnerschaften Mineralrohstoffe“

(¹GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, ²TU WIEN)



8. Aktivitäten im Bereich Öffentlichkeitsarbeit und Vortragstätigkeit

Kurze Projektvorstellung auf der Homepage der Geologischen Bundesanstalt

<http://www.geologie.ac.at/index.php?id=225&projectid=75&L=0>

9. Literatur

- ALBER, J., 1987. Rohstoffpotential südliches Waldviertel / Dunkelsteinerwald, Proj. NC 9a, b. - Bibl. Geol. B.-A., Wiss. Arch., 186 S., 30 Beil., Wien.
- BOKHARI, S.N.H., MEISL, T.C. (2017). Method Development and Optimisation of Sodium Peroxide Sintering for Geological Samples. *Geostandards and Geoanalytical Research*, JG 41, Ausgabennummer 2, S181-S195.
- FINK, J.B., MCALISTER, E.O., STERNBERG, B.K., WIEDUWILT, W.G., AND WARD, S.H. EDS., 1990. *Induced Polarization Applications and Case Histories*. Society of Exploration Geophysicists.
- FUCHS, G. & FUCHS, W. (1986): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000. Blatt 36 Ottenschlag. - Geol. B.-A., Wien, 1 Bl., Wien.
- HEINZ, H., MEYER, J., & SEIBERL, W., 1984: Aufsuchung von Graphitvorkommen mittels aktiver und passiver elektrischer Methoden im Bereich der "Bunten Serie" (Waldviertel, Niederösterreich). - Arch. Lagerst.forsch. Geol. B.-A., 5, S. 35-39, Wien.
- HOFBAUER, R. (2001): Abschlussbetriebsplan für die Vorkommen VI, VII und VIC-West im Graphitbergbau Trandorf, Grubenfeld Weinbergwald Neu (Graphitbergbau Mühldorf, Mörth Ges.m.b.H., Ottenschlag). – Unveröff. Ber. (Lagerstättenarchiv Geol. B.-A.), 2 S., Ottenschlag.
- HOLZER, H. HOFBAUER, R. (1963); Geologische Skizze des Graphitbergbaues Zettlitz, NÖ. – Unveröff. Karte (Lagerstättenarchiv Geol. B.-A.), Wien.
- HOLZER, H. F., & PROCHASKA, W., 1985. Endbericht zum Projekt "Geochemische Untersuchungen von Graphitschiefern" und Erstellung von Prospektionsparametern in Zusammenhang mit deren Sedimenten und Böden (Proj. NA 33/84). - Unveröff. Ber. (Lagerst. Arch. Geol. B.-A.), 14 S., 9 Abb., 2 Tab., Wien.
- JANDA, I. & SCHROLL, E., 1960. Geochemische Untersuchungen an Graphitgesteinen. - Intern. Geol. Congr., Norden, Pt. I, 21 sr. Sess., S. 40-53, Copenhagen.
- KNÖDEL, K., KRUMMEL, H., & LANGE, G. (Hrsg.), 2005. *Geophysik Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*. Springer Verlag, Berlin, Band 3, 1102 S.
- MÜLLER, N. L., 2016. Die Grafitlagerstätte Zettlitz - Geologische Bearbeitung des Rohstoffvorkommens. – Unveröff. Masterarb., Montanuniv. Leoben, 113 S., 2 Anh., Leoben.

- PELTON, W. H., WARD, S. H., HALLOF, P. G., SILLI, W. R., and NELSON, P. H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43(3), pp.588-609.
- PICHLHÖFER, R. (1985): Montangeologische Untersuchungen der Graphitlagerstätte Weinberg bei Amstall in NÖ. – Unveröffentl. Dipl.arb., Montanuniv. Leoben, 135 S., 58 Abb., 10 Tab., Leoben.
- POLEGEGG, S., HÜBEL, G. & JAHN, E (1987): Beurteilung von Graphitvorkommen im Waldviertel. - Endbericht. FREN Projekt NA 29. - Unveröff. Ber. (Lagerst. Arch. Geol. B.-A.), 24 S., 6 Abb., 1 Beil. Bd., Leoben.
- ROETZEL, R. & FUCHS, G. (2001): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000. Blatt 8 Geras. - Geol. B.-A., Wien, 1 Bl., Wien.
- SCHEDL, A.; BENOLD, C.; NEINAVAIE, H.; LIPIARSKI, P. & HOBIGER, G. (2016): Bundesweite Erfassung von Rohstoffpotenzialen für kritische Rohstoffe: Potenziale kritischer Rohstoffe III: (SEE-Potenziale ausgewählter Kaolin-, Ton-, Leukophyllit- und Grafitvorkommen in Niederösterreich und Oberösterreich: Jahresendbericht. – Unveröffentl. Ber. Geol. B.-A., 82 S., 40 Abb., 12 Tab., Anh., Wien.
- SCHRAUDER, M. (1991): Petrologie und Geochemie der grafitführenden Gesteine der südlichen Böhmisches Masse (Bunte Serie, Niederösterreich). - Unveröff. Dipl. Arbeit, Univ. Wien, 181 S., Wien.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., AND SHERIFF, R. E., 1990. *Applied geophysics*, 2nd edn., Cambridge University Press, Cambridge.
- THALMANN, F., SCHERMANN, O., SCHROLL, E. & HAUSBERGER, G. (1989): Geochemischer Atlas der Republik Österreich 1 :1,000.000. - Geol. B.-A., Wien, 141 S., 47 Abb., 5 Tab., 6 Taf., Wien.
- THIELE, O.; JENCEK, V. & MATEJOVSKA, O. (1987): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000. Blatt 7 Groß-Siegharts. - Geol. B.-A., Wien, 1 Bl., Wien.
- VINE, J. & TOURTELOT, E. (1970): Geochemistry of black shale deposits - A summary report. – *Econ. Geol.* 65, S.253-273, Lancaster.
- WAGNER, S. (2009): Geochemische Charakteristik sulfidführender Mineralisationen der Böhmisches Masse mit besonderer Berücksichtigung der Isotopengeochemie. – Unveröffentl. Masterarb. Univ. Wien, 60 S., 34 Abb., 6 Tab., Wien.
- WEBER, L. (1987): Die geologischen Grundlagen des Grafitbergbaues in Niederösterreich. - In: KUSTERNIG, A. (Hrsg.): *Bergbau in Niederösterreich*. - Stud. u. Forsch. aus d. NÖ Inst. f. Landesk., 10, Selbstverlag d. NÖ Inst. f. Landesk. Wien, S. 369-388, Wien.

WEBER, L. (Hrsg.), 1997. Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs. Erläuterungen zur metallogenetischen Karte von Österreich 1:500.000 unter Einbeziehung der Industriemineralien und Energierohstoffe. - Arch. Lagerst.forsch. Geol. B.-A., 19, 607 S., 393 Abb., 37 Tab., 2 Ktn., 2 Listen (Mineralien, Rohstoffvork.), Wien.

WEBER, L. (Hrsg.), 2012. Der österreichische Rohstoffplan. - Arch. Lagerst.forsch. Geol. B.-A., 26, 263 S., Wien.

ZECHNER, H. (1939): Graphitbergbau Zettlitz. - Unveröff. Ber. (Lagerst. Arch. Geol. B.-A.), 9 S., Leoben.

ZIRKL, E. J.(1962): Jarosit und Natrojarosit vom Graphitabbau Weinberg bei Trandorf, NÖ. - N. Jb. Min. Mh., 1962, 2, S. 27-31, Stuttgart.

10. Anhänge

10.1 GEOMON4D-IP/techn. Beschreibung

Im Folgenden ist ein Überblick über die techn. Eigenschaften der Eigenentwicklung GEOMON4D-IP (siehe Abb. A1) gegeben. Für eine nähere Beschreibung der Entwicklung sei auf den 2021 erscheinenden Projektendbericht zum ÜLG-76 „Entwicklung eines feldtauglichen Messgerätes für Induzierte Polarisationsmessungen auf Basis der GBA Eigenentwicklung GEOMON 4D“ verwiesen.



Abb. A1: neu entwickeltes geoelektrisches Messgerät GEOMON4D-IP (Stand Sommer 2020)

Eigenschaften

- 4 Potentialeingänge
- Simultane Messung des tatsächlichen Speisestroms
- Simultane Messung der angelegten Spannung
- Der Messablauf kann frei konfiguriert werden (Datei *.cfg)
- Die zu messenden Kombinationen können frei konfiguriert werden (Datei *.cmd)
- Aufzeichnung aller erfassten ADC-Werte
- Log-Datei

Potentialbereich	+80V	+8V	+2V
Eingangswiderstand [M Ω]	400	400	400
Auflösung [mV]	1	0.1	0.025
Gleichtaktspannung [V]	+400	+400	+400
Maximale Eingangsspannung [V]	+400	+400	+400
Grenzfrequenz [kHz]	8	8	8
Abfallzeit [μ s] max.	200	200	200
Toleranz	< 1%	< 1%	< 2%

Strombereich	+800mA	+40mA	+2mA
Auflösung [μ A]	5	0.2	0.01
Grenzfrequenz [kHz]	8	8	8
Abfallzeit [μ s] max.	200	200	200
Toleranz	< 1%	< 1%	< 2%

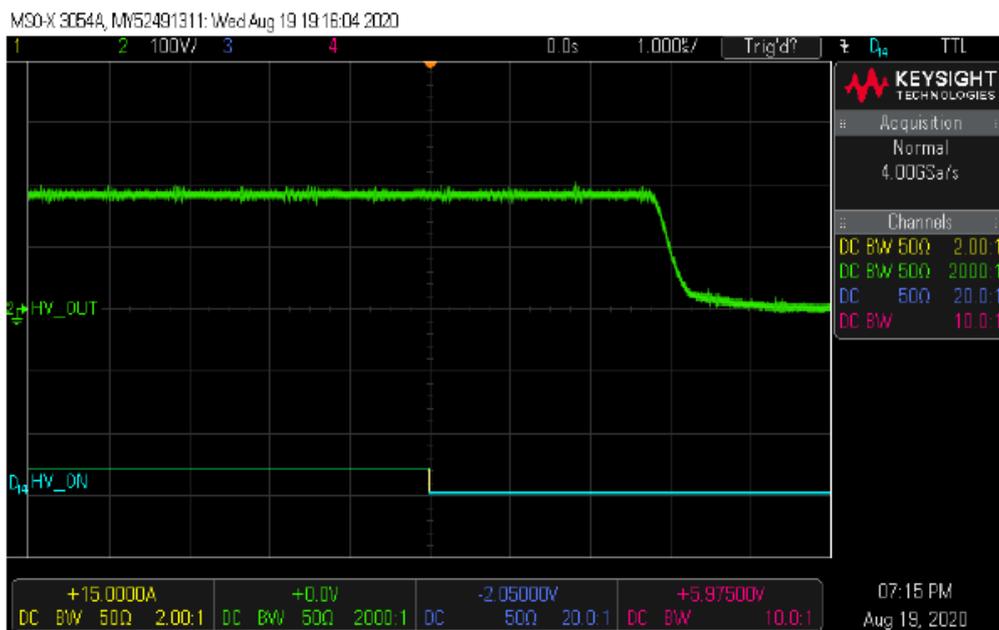
Spannungsbereich	+480V
Auflösung [mV]	5
Grenzfrequenz [kHz]	8
Abfallzeit [μ s] max.	200
Toleranz	< 1%

ADC	
Abtastrate [sps]	15000, 7500, 3750, 1875 (umschaltbar)
Auflösung	24 Bit
Simultan erfasste Kanäle	6
Eingangsbereich [V]	+4
Eingänge	differentiell

Stromgenerator	
Maximale Spannung [V]	+/-400
Maximaler Strom [mA]	+/-750
Maximale Leistung [W]	200
Wirkungsgrad	87%
Abfallzeit [μ s] max.	2
Auflösung [mA]	1
Toleranz	5%

Spannungsversorgung	
Minimale Spannung [V]	21.6
Maximale Spannung [V]	30
Maximaler Strom [A]	10
Ruhestrom [mA] max.	200

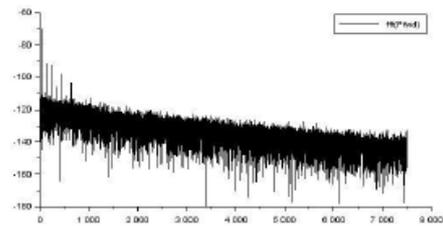
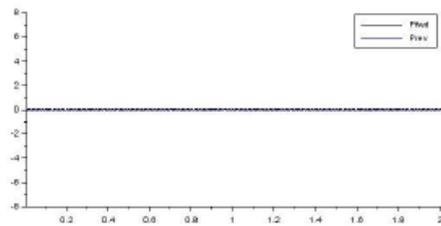
Abschaltvorgang



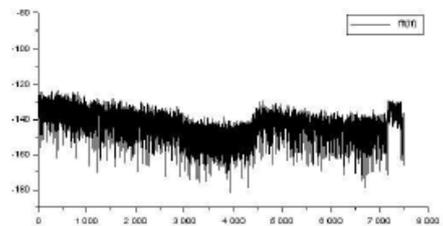
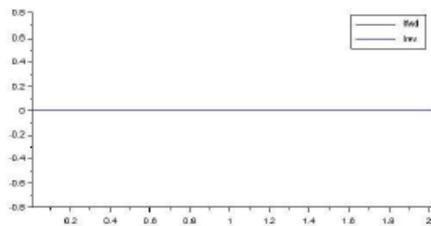
Verzögerung: < 3 μ s, Abfallzeit: <1 μ s

Signalqualität

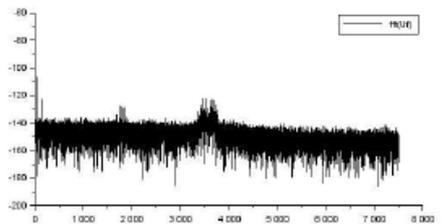
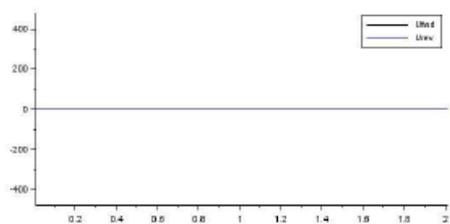
Potentialeingang (8V-Bereich, offen):



Strom (800mA-Bereich):



Spannung:



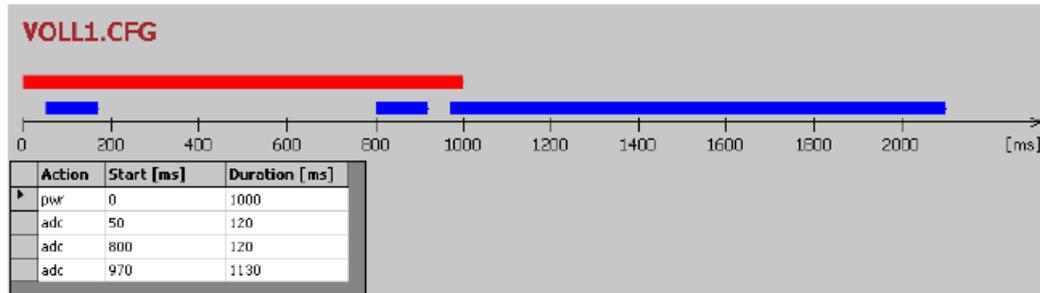
In den Diagrammen ‚Potentialeingang‘ und ‚Spannung‘ sind die allgegenwärtigen 50 Hz-Einstreuungen gut zu erkennen.

Es ist bewusst keine Filterung der Signale vorgesehen worden, diese kann im Zuge der Datenauswertung flexibler implementiert werden.

Messzyklus

Die Zeitpunkte für das Ein- und Ausschalten des Stroms sowie der Beginn und die Länge der Datenaufzeichnung ist frei wählbar, die Auflösung der Zeitangaben beträgt 1ms. Pro Zyklus können bis zu 30 Punkte definiert werden.

Beispiel für einen Messzyklus:



Rot: Stromspeisung aktiv, **Blau:** Datenerfassung aktiv

Die Auswertungssoftware erkennt SP, IM und IP Zyklen automatisch und erzeugt entsprechende Dateien.

Es stehen immer alle Daten zur Verfügung um weitergehende Auswertungen zu ermöglichen. Ein Datenpunkt umfasst dabei 28 Byte im Binärformat, die ASCII-Dateien sind entsprechend umfangreicher.

10.2 Endbericht der Arbeitsgruppe Geophysik der TU Wien

Report: ExploGraf

Adrián Flores Orozco, Lukas Aigner and Timea Katona

21.10.2019

Contents

1	Introduction	7
1.1	The induced polarization method in frequency domain and time domain .	10
2	Measurement overview	12
2.1	First campaign	13
2.2	Second campaign	13
2.3	Third campaign	14
2.4	Fourth campaign	16
3	Processing of induced polarization measurements	17
4	Results from the first campaign - Site characterization	24
5	Results from the second campaign - Separated cables to reduce the influence from electromagnetic coupling	26
6	Results from the third campaign - Measuring the frequency dependence of the induced polarization method	27
7	Results from the fourth campaign - Deep investigations	29
8	Comparing the results from the induced polarization method to the geological information	32
9	Conclusion	39
	Bibliography	40

List of Figures

1.1	Aerial view of the investigated site; The graphite outcrop is visible in the clearing in the forest. The picture was obtained in April 2016, within a drone project - “droneproject.at”.	8
1.2	Geological map of the investigated site provided by the geological survey austria - “GBA”.	9
1.3	Graphite outcrop in the center of the investigated site. The instrument shown was used within this work and further details can be found in chapter 2.	10
1.4	Conceptual model depicting the basic principle behind TDIP (upper two panels) and FDIP (lower two panels).	11
2.1	Image showing the 4 IP measurement devices used within this project. . .	12
2.2	Map that shows the measurements done in the first campaign.	13
2.3	Map that shows the measurements done in the second campaign.	14
2.4	Map that shows the PSIP measurements done in the third campaign. . . .	15
2.5	Map that shows the measurements done in the fourth campaign.	16
3.1	Pseudosection of p1 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.	18
3.2	N-R data analysis for profile p1. The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.	19
3.3	Pseudosection of p2 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.	20
3.4	N-R data analysis for profile p2. The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.	20

3.5	Pseudosection of p3 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.	21
3.6	N-R data analysis for profile p3. The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.	21
3.7	Pseudosection of p5 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.	22
3.8	N-R data analysis for profile p5 (FDIP). The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.	22
3.9	Bivariate correlation of the phase against the measured voltage. The color coding indicates the count of values at each bin.	23
4.1	FDIP results from the first campaign. Compare Figure 2.2 for an overview of the location of the profiles.	24
5.1	TDIP results from the second campaign. Compare Figure 2.3 for an overview of the location of the profile. This profile is called p4 and is located along the middle part of profile p2.	26
6.1	Spectra from PSIP measurements at 3 different locations; Every line color indicates one of 5 individual measurements. Details on the position of the individual measurements and their configuration can be found in 2.3. . . .	27
6.2	TDIP profile p4; The black arrows indicate the position of the PSIP measurements z3, z4 and z5 along the profile.	28
7.1	Results from deep investigations in campaign 4. The top row compares the electrical resistivity from dipole-dipole configuration to multiple gradient configuration. The bottom row shows the same comparison in terms of the phase shift.	29
7.2	Results from deep investigations in campaign 4. The top row shows the electrical resistivity from FDIP and the bottom row shows the results from TDIP. The first column shows the electrical resistivity and the second column the phase shift.	30
7.3	Results from the short profile p6, which is located to the southeast of the investigated site.	31

8.1	Geological map and profile p1	33
8.2	Geological map and profile p2	34
8.3	Geological map and profile p2	35
8.4	Geological map and profile p3.	37
8.5	Comparison of IP profile p5 to the profile p1 and the geological information in terms of electrical resistivity.	38

1 Introduction

We conducted spectral induced polarization (SIP) imaging measurements at a graphite deposit in the Tannholz-forest close to Zettlitz / Wollmersdorf, in Lower Austria (Austria). Figure 1.2 shows a geological map of the site. The site is an abandoned graphite quarry, operated in the period between 1855 and 1967 for the extraction of graphite (see Figure 1.1). The general aim of the investigation is the quantification of the remaining volume of graphite at the site (an outcrop containing graphite can be seen in Figure 1.3). However, limited access to the site hinders the application of core drillings and collection of soil samples. To overcome these limitations, we propose the application of geophysical electrical methods, in particular the SIP technique. The goal of the geophysical investigation is to propose a detailed methodology for the collection and processing of field data in an imaging framework. To achieve this, we conducted a series of measurements at the field-scale using different settings and acquisition protocols to evaluate their advantages and drawbacks. Such an extensive data set does not exist for the characterization of graphite ores. Thus, the analysis presented here should provide a comprehensive data base for future investigations at the site and for exploration of graphite content in other sites.

Graphite is an electric conductor, therefore electrical geophysical methods appear to be the best option for the delineation of graphite at the site. The electrical resistivity tomography (ERT) has become a standard method to characterize changes in the subsurface electrical resistivity ρ (or its inverse, the electrical conductivity, σ). ERT permits to conduct surveys with different geometries as required to cover larger areas (and depth of investigations) or to enhance the resolution at particular areas. However, at the study area besides graphite, the deposit contains large amount of visible of pyrite and chalcopyrite (approximate size of a few millimeters), and iron oxides, such as goethite (Müller 2016). Iron sulfides behave as electric semiconductors, which means they are also associated to low electrical resistivity values, similar to graphite (see report 1). Thus, site investigation can be misleading when based only in ERT results, likely due to an overestimation of graphite content, if the presence of iron sulfides is not taken into account.

The Induced Polarization (IP) method is an extension of the ERT, which provides information about the conductivity and the capacitive properties of the subsurface, commonly expressed in terms of the complex conductivity (σ^*). The application of an external field imposes the polarization of the electrical double layer formed at the grain-fluid interface (e.g., Bucker, Flores Orozco, and Kemna 2018 and Bucker et al. 2019). Moreover, the external field also induced the polarization (thus, IP effect) of the free charges (electrons) within the electric conductors and semiconductors, which results in a large measurable IP response in the so-called electrode polarization (e.g., Bucker,



Figure 1.1: Aerial view of the investigated site; The graphite outcrop is visible in the clearing in the forest. The picture was obtained in April 2016, within a drone project - “droneproject.at”.

Flores Orozco, and Kemna 2018 and references therein). Moreover, IP measurements could be re-collected at different frequencies (commonly < 1 KHz), in the so-called spectral IP (SIP), to investigate the frequency-dependence of the complex conductivity ($\sigma^*(\omega)$). The spectral response is controlled by the properties of the electrical double layer and, in this case, the texture of electric conductors and semiconductors (e.g., Bückner et al. 2019).

Laboratory measurements collected during the first funding period (2017-2018) demonstrated that the electrical conductivity of graphite and iron-sulfides (i.e., pyrite) is similar, hindering the application of ERT as an exploration method. Moreover, measurements at 1 Hz also failed to discriminate between both materials. Nevertheless, the spectral response associated to both (graphite and pyrite) revealed clear variations; thus, promising a suitable technique for an improved characterization of the Zettlitz site. During the second application period we conducted SIP measurements at the field scale over different geometries and locations. These measurements aim at investigating the capabilities of the spectral induced polarization (SIP) method to discriminate between the electrical response of the graphite and iron bearing minerals at the field scale. Data collection was performed with different configurations as required to propose a guideline for future investigations.

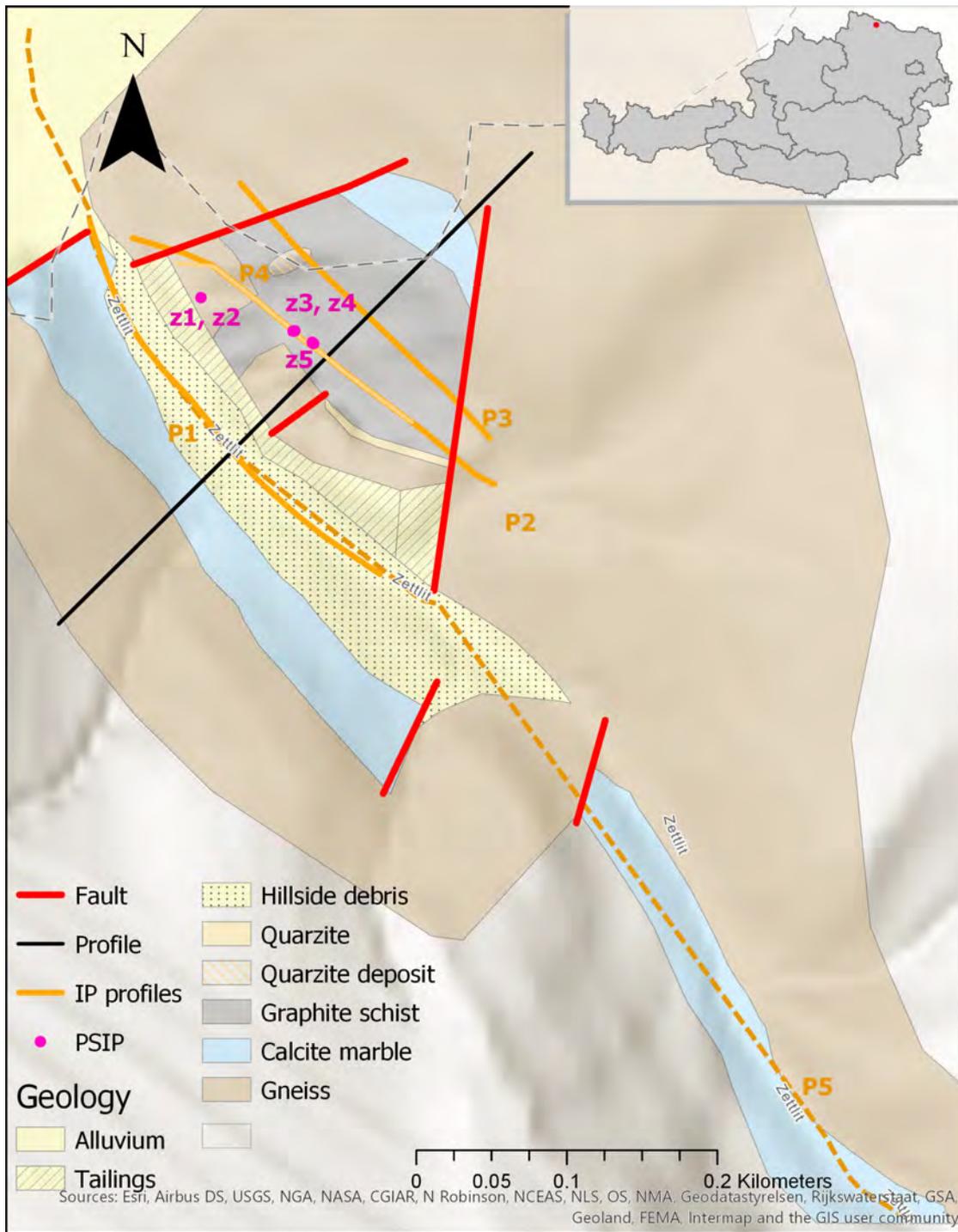


Figure 1.2: Geological map of the investigated site provided by the geological survey austria - "GBA".



Figure 1.3: Graphite outcrop in the center of the investigated site. The instrument shown was used within this work and further details can be found in chapter 2.

1.1 The induced polarization method in frequency domain and time domain

The IP method is based on a four-electrode array, where two electrodes are used to inject a current into the ground (or into probe for laboratory studies) and two electrodes are used to collect measurements of the electrical impedance (i.e., complex-valued voltages). IP measurements might be performed in the time-domain (TDIP) or in the frequency-domain (FDIP). To investigate the benefits of each technique for the characterization of graphite ores, measurements performed at the Zettlitz site were conducted in both frequency- and time-domain.

In TDIP, measurements are commonly expressed in terms of the measured resistance (voltage-to-current ratios) and chargeability values, where the latter is associated to the measurements of the voltage-decay after switching the current off (Figure 1.4 and for further details see Flores Orozco, Gallistl, et al. 2018). In FDIP, a phase-shifted voltage relative to an injected alternating current is measured, and the measurements are given in terms of the resistance and phase of the measured electrical impedance (panels in Figure 1.4 and for further references see Flores Orozco, Bückner, et al. 2018). Measurements can be collected at different frequencies to gain information about the frequency dependence of the electrical properties, which is commonly referred to as spectral induced polarization (SIP). In small laboratory setups only a few 4-point measurements are carried out and SIP data is typically collected between 1 mHz and 10 kHz. By contrast, for field measurements with a much larger number of independent measurements, increasing the number of frequencies below 1 Hz would exponentially increase the acquisition time (e.g., Flores Orozco, Gallistl, et al. 2018 Flores Orozco, Bückner, et al. 2018). Thus, for practical reasons, SIP field data is commonly only collected between 0.06 and 100 Hz (e.g., Flores Orozco, Bückner, et al. 2018).

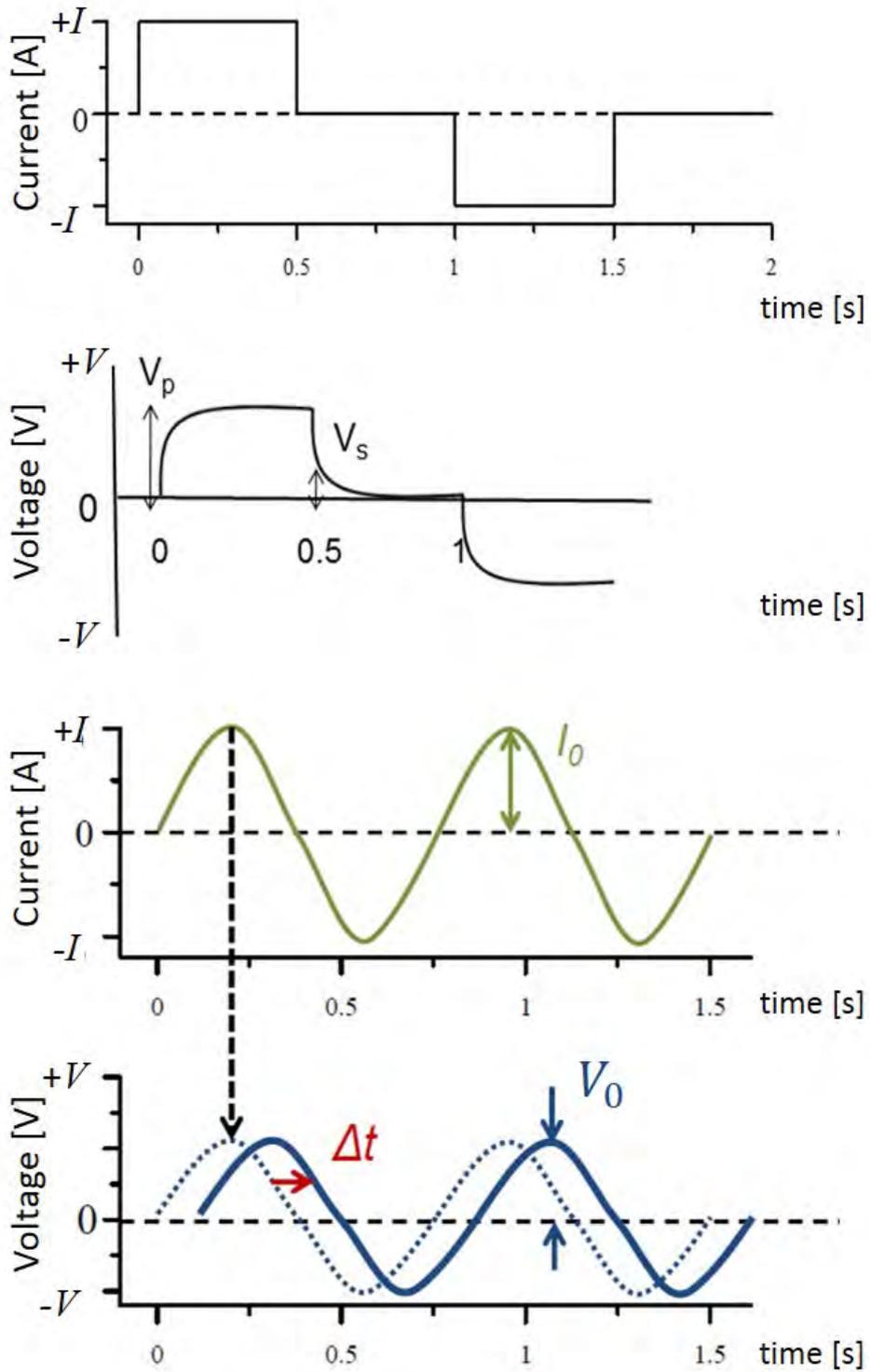


Figure 1.4: Conceptual model depicting the basic principle behind TDIP (upper two panels) and FDIP (lower two panels).

2 Measurement overview

All measurements within the scope of this project were done using different IP acquisition systems (see Figure 2.1) and various configurations in four different campaigns. An overview can be seen in 2.1. Further details on the individual campaigns can be found in the corresponding sections.

	FDIP DD normal [Hz]	FDIP DD reciprocal [Hz]	FDIP MG [Hz]	TDIP DD [s]	Profile length [m]	Electrode spacing [m]	Electrodes	Cable trade	Date
P1	1-225	1-225	-	-	315	5	64	1	23.07.18
P2	1-225	1	1-225	-	315	5	64	1	24.07.18
P3	0.5-225	1 and 5	1	-	252	4	64	1	25.07.18
P4	-	-	-	0.25-1	175	5	72	2	05.12.18
PSIP	-	-	0.1 - 20000	-	1.5 / 0.9	0.5 / 0.3	4	4	14.02.19
P5	1	1	-	0.5	955	10	96	1	24.07.19
P6	0.5-7.5	-	-	-	124	2	64	1	24.07.19

Table 2.1: All measurements done within the scope of this project. The individual campaigns can be distinguished by the different background colors.



Figure 2.1: Image showing the 4 IP measurement devices used within this project.

2.1 First campaign

The first campaign was done between 23.07.2018 and 25.07.2018 at dry surface conditions. The air temperature was around 25°C. An overview of the field configuration can be seen in Figure 2.2. The profile p1 was measured directly at the road, while the profiles p2 and p3 were measured across the graphite outcrop at two different terraces. All measurements within this campaign were done using the DAS-1, Electrical Impedance Tomography System (Multi Phase Technologies, LLC) using 64 stainless steel electrodes. The electrode separation was 5 m for the profiles p1 and p2 (315 m profile length) and 4 m for p3 (252 m profile length). The dipole-dipole configuration was used for all three profiles. Additionally, the multiple gradient configuration was used at profiles p2 and p3. All measurements were done in frequency domain and a detailed overview of the measured frequencies can be found in Table 2.1 above.

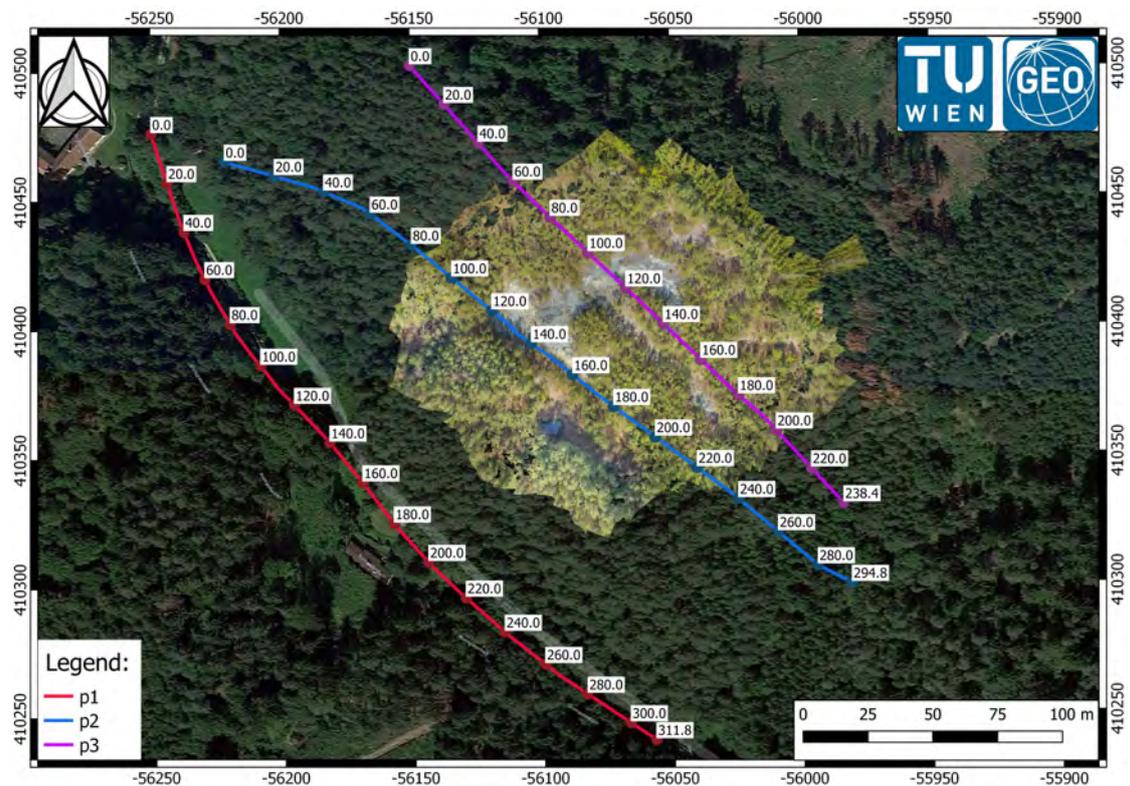


Figure 2.2: Map that shows the measurements done in the first campaign.

2.2 Second campaign

The second campaign was done on 05.12.2018 at frozen surface conditions. The air temperature was around 0°C. An overview of the field configuration can be seen in Figure

2.3. Part of profile p2 was measured again using two different cables to separate dipoles used for current injection and voltage measurements, a common approach to reduce the influence of electromagnetic coupling in IP measurements. Separated cables reduce the profile length, since only half of the available electrodes can be used as possible current dipoles. The resultant shortened profile is called p4 in the subsequent text and it is centered around the graphite outcrop. Measurements within this campaign were done using the Syscal Pro Switch 72 (IRIS instruments), which is capable of deploying 72 electrodes, whereas the DAS-1 allows only the use of 64 electrodes. The electrode separation was 5 m which results in a profile length of 175 m. The data was collected in time-domain using current injection lengths of 0.25, 0.5 and 1.0 s and the dipole-dipole configuration.

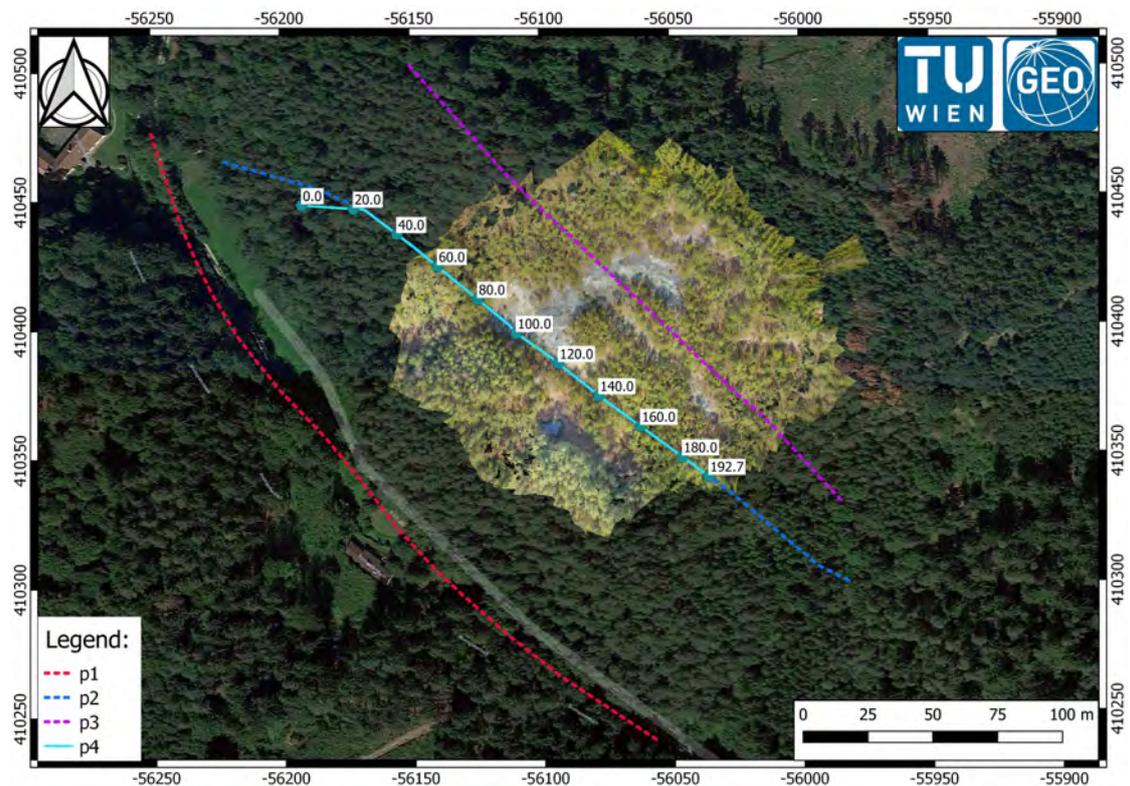


Figure 2.3: Map that shows the measurements done in the second campaign.

2.3 Third campaign

The third campaign was done on 14.02.2019 at semi-dry surface conditions with some parts of the site being covered by snow. The air temperature was around 5°C. All measurements were done using the Portable Spectral Induced Polarization Field/Lab Unit (PSIP), which is a high-performance multi-channel geophysical instrument, developed by Ontash &

Ermac Inc. The PSIP unit is optimized for laboratory and in-situ SIP measurements. The PSIP unit applies sine wave voltages in the frequency range between 1 mHz and 20 kHz, correlates induced voltage (V) and stimulus current (I) and determines Impedance (Z) and phase (Θ). The measurements were done using a standard Wenner configuration, where the outer electrodes were used for current injection (current dipole) and the inner electrodes for voltage measurements (voltage dipole).

In total 5 different SIP measurements were done at three different positions near p2 as indicated in Figure 2.4. Measurements z1 and z2 are located south of P2, because of easier access, due to steep slopes at the beginning of p2. Additionally, we expect lower graphite content at the location of z1 and z2 (see geological map in Figure 1.2). The measurements z1 and z2 were repeated at the same position using an electrode separation of 50 and 30 cm respectively. Although all other measurements were done using an electrode separation of 50 cm the measurements z3 and z4 were repeated due to irregularities in the lower frequencies of the spectrum (see Section 6 and Figure 6.1 for details). The frequency range of the measurements was between 0.1 Hz and 20 kHz, using 58 frequencies distributed logarithmically.

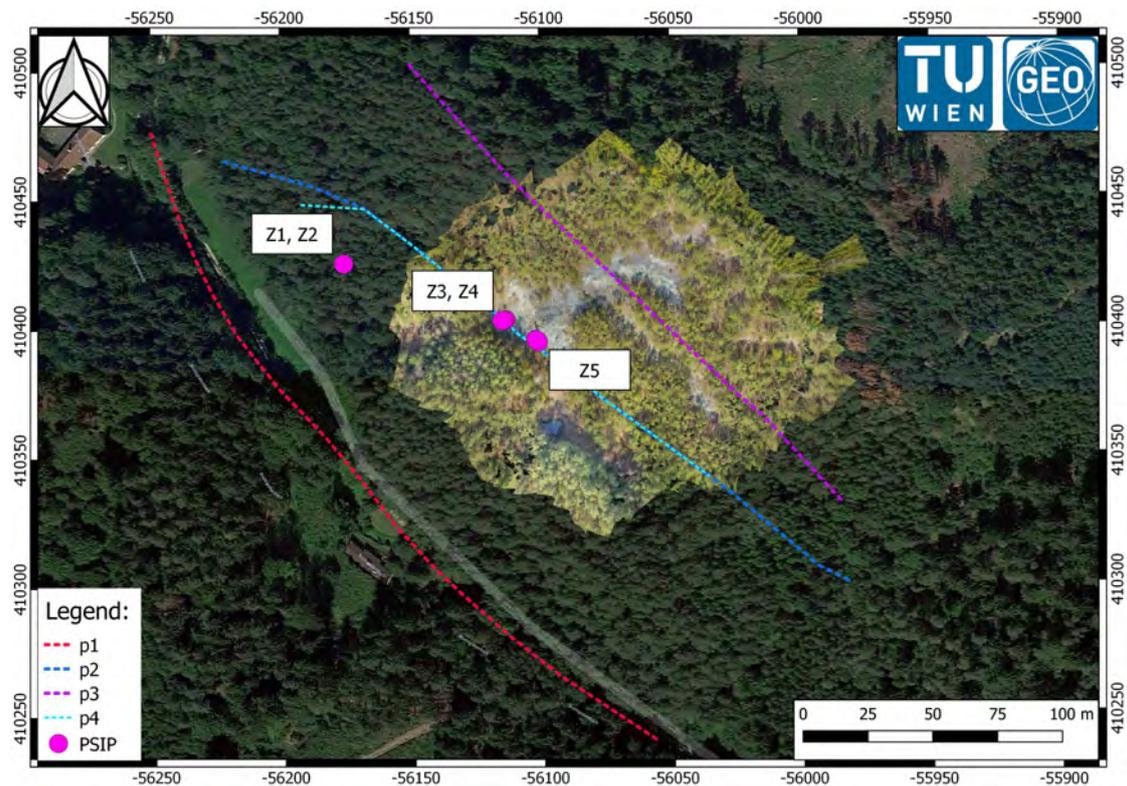


Figure 2.4: Map that shows the PSIP measurements done in the third campaign.

2.4 Fourth campaign

The fourth campaign was done on 24.07.2019 at dry surface conditions. The air temperature was around 25°C. An overview of the field configuration can be seen in Figure 2.5. The profile p5 was measured directly at the road, while the profile p6 was measured further to the southeast (outside of the map), to investigate the continuation of additional graphite deposits. All measurements within this campaign were done using the DAS-1, Electrical Impedance Tomography System (Multi Phase Technologies, LLC) using 64 stainless steel electrodes. The electrode separation was 10 m for profile p5 (955 m profile length) to increase the depth of investigation. Profile p6 was measured with an electrode separation of 2 m resulting in a profile length of 124 m. The dipole-dipole configuration was used for both profiles. Additionally, p5 was also measured using a multiple gradient configuration. All measurements were done in frequency domain, except for p5, which was also measured in time domain. A detailed overview of the measurement configurations can be found in Table 2.1 above.

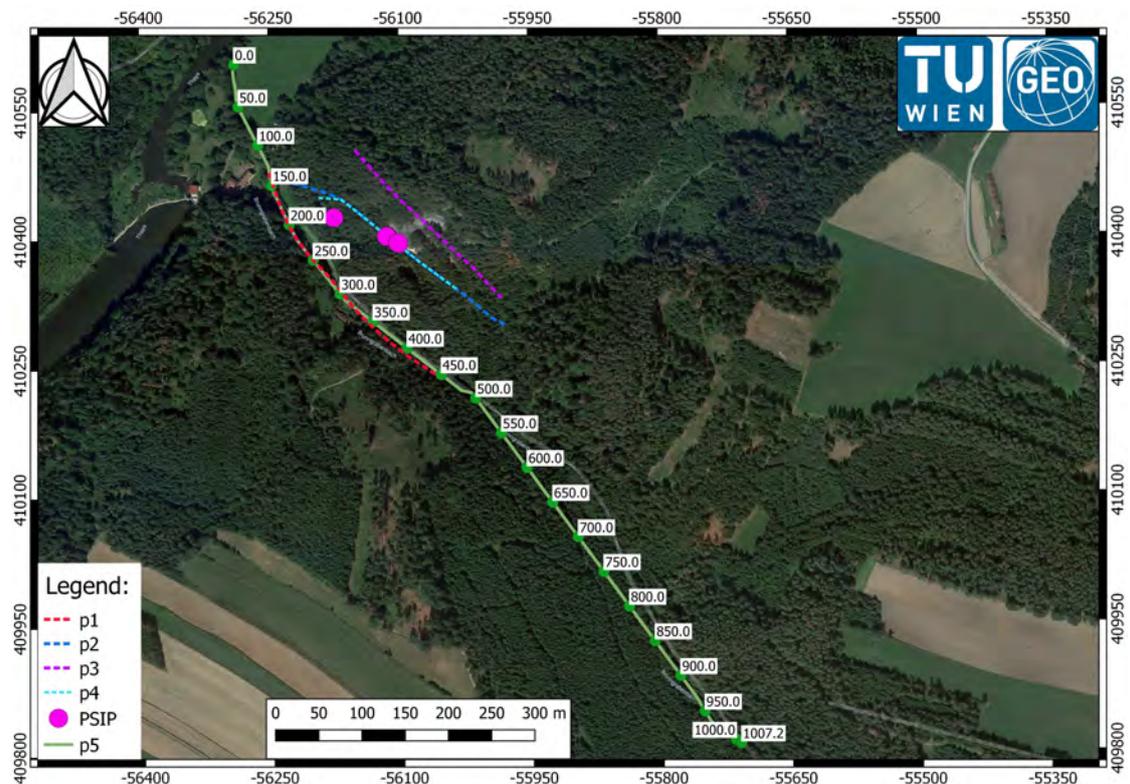


Figure 2.5: Map that shows the measurements done in the fourth campaign.

3 Processing of induced polarization measurements

The processing of IP data within this project is based on two steps: First, a qualitative analysis is based upon the visualization of raw data by creating the so-called pseudosections. In a second step, quantitative analysis is based on the comparison of normal and reciprocal measurements (N-R data analysis). Reciprocal measurements refer to the repetition after interchanging electrodes used for current injection and potential measurements to further identify outliers and quantify data error (Flores Orozco, Kemna, and Zimmermann 2012). To process the IP data, we applied the following steps on all data sets:

1. Visualization of raw data using pseudosections
2. Removal of physical implausible measurements (e.g. negative resistances) and erroneous measurements (e.g. unconnected electrodes)
3. Filtering of the data based upon N-R data analysis

Pseudosections can be used to investigate the spatial distribution and consistency of the calculated apparent resistivity and apparent phase shifts. Since the IP method is a potential method, we expect mainly smooth changes within the pseudosection. Outliers can be identified as rough changes in the pseudosection. Physical implausible measurements (i.e. negative transfer resistances) were completely (meaning both the resistance and corresponding phase) removed from the data set before starting the data filtering. Figure 3.1 shows the pseudosection of profile p1 before and after data filtering.

The filtering of the data is based upon the comparison of normal and reciprocal measurements (N-R data analysis) and details can be found in Flores Orozco et al. 2019. The readings from normal and reciprocal measurements should be the same and the N-R misfit was calculated using equation 3.1 and equation 3.2:

$$\Delta_R = R_N - R_R \quad (3.1)$$

with Δ_R being the resistance misfit. R_N and R_R represent the normal and reciprocal resistance reading respectively.

$$\Delta_\phi = \phi_N - \phi_R \quad (3.2)$$

with Δ_ϕ being the phase misfit. ϕ_N and ϕ_R represent the normal and reciprocal phase reading respectively.

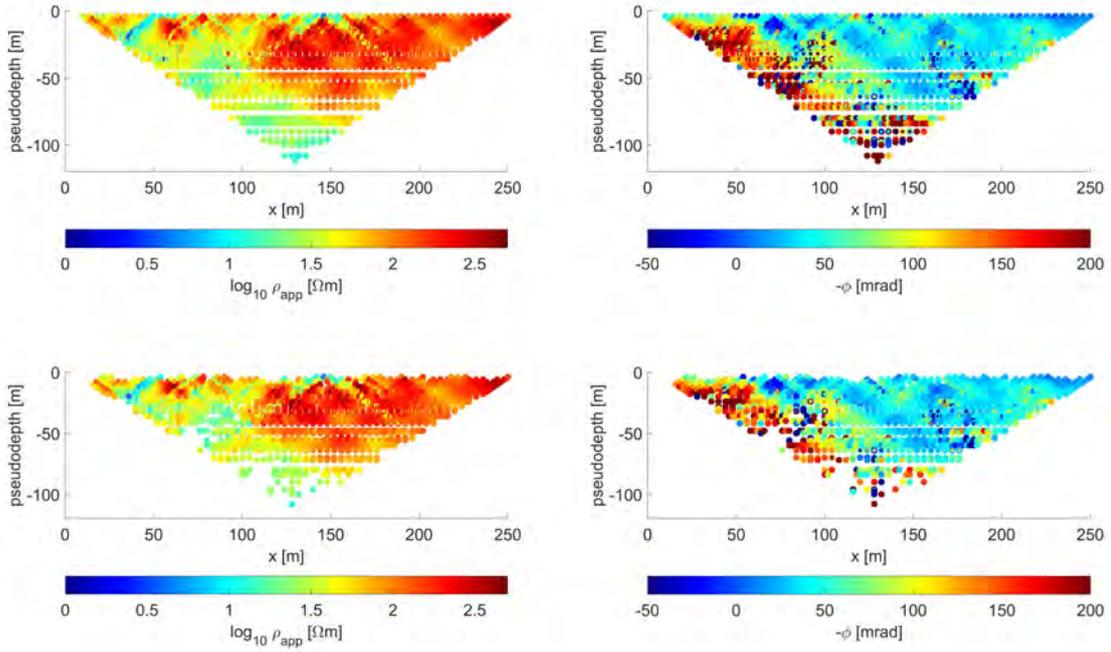


Figure 3.1: Pseudosection of p1 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.

Furthermore, the distribution of the N-R misfit can also be used to quantify the data error (Flores Orozco, Kemna, and Zimmermann 2012). Inversion of the Ip data was performed using CRTomo, a smoothness constrained inversion algorithm developed by Kemna 2000. The filtering of the data based on the N-R analysis was done using two different approaches, which were applied subsequently:

1. Filtering the data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading.
2. Filtering the data points where the N-R misfit exceeds the standard deviation of all N-R misfits ($\sigma_{\Delta_{NR}}$).

Figure 3.2 shows the N-R data analysis of data collected in profile p1 and the colors for both the scatter plot and the histograms correspond to the following scheme:

1. Black points and histogram bars: Raw data after removal of physical implausible measurements
2. Red points and histogram bars: Data after filtering according to: $\Delta_{NR} > 50\%$
3. Blue points and histogram bars: Data after filtering according to: $\Delta_{NR} > \sigma_{\Delta_{NR}}$

The visualization of the N-R data analysis shows three different plots for both the electrical resistivity and the phase shift:

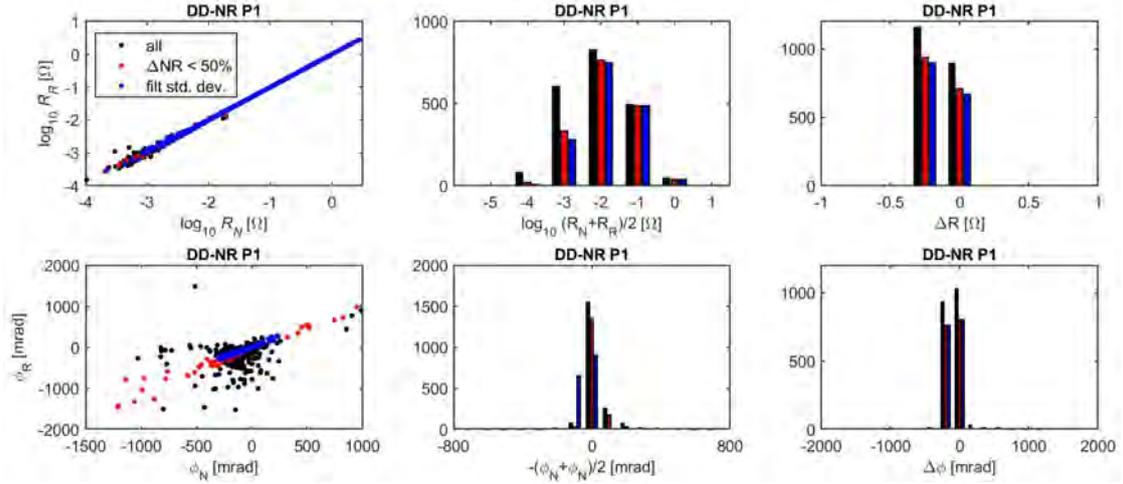


Figure 3.2: N-R data analysis for profile p1. The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.

1. The first column shows a combined scatter plot (data points before and after filtering) of the normal vs. the reciprocal reading. This can be used to assess overall data quality by looking at the deviation from the expected 1:1 line.
2. The second column shows a combined histogram of the data before and after application of the different filters. It shows the distribution of the mean value of the normal and reciprocal readings.
3. The third column shows also a combined histogram of the data before and after application of the different filters. It shows the distribution of the N-R misfit.

The N-R analysis of profile p1 shows mainly consistent results between the normal and reciprocal resistivity readings. The phase readings deviate further from the expected 1:1 line. The histograms of the N-R misfit mainly resemble the expected normal distribution and only a few points have to be removed from the data set.

Figure 3.3 shows the pseudosections before and after data filtering and Figure 3.4 the N-R data analysis of profile p2. Since the N-R analysis shows a stronger deviation in the scatter plot of the resistivity, which is even worse for the phase shift, more points are identified as outliers and are removed from this data set.

Figure 3.5 shows the pseudosections before and after data filtering and Figure 3.6 the N-R data analysis of profile p3. Similar to p3 the N-R misfit is higher than for p1 and a large amount of data points have to be removed from the data set. The high removal of data in profiles p2 and p3 is due to the presence of graphite on the surface which enhances the conduction and results in extremely low voltage measurements. This leads to a low signal to noise ratio (SNR).

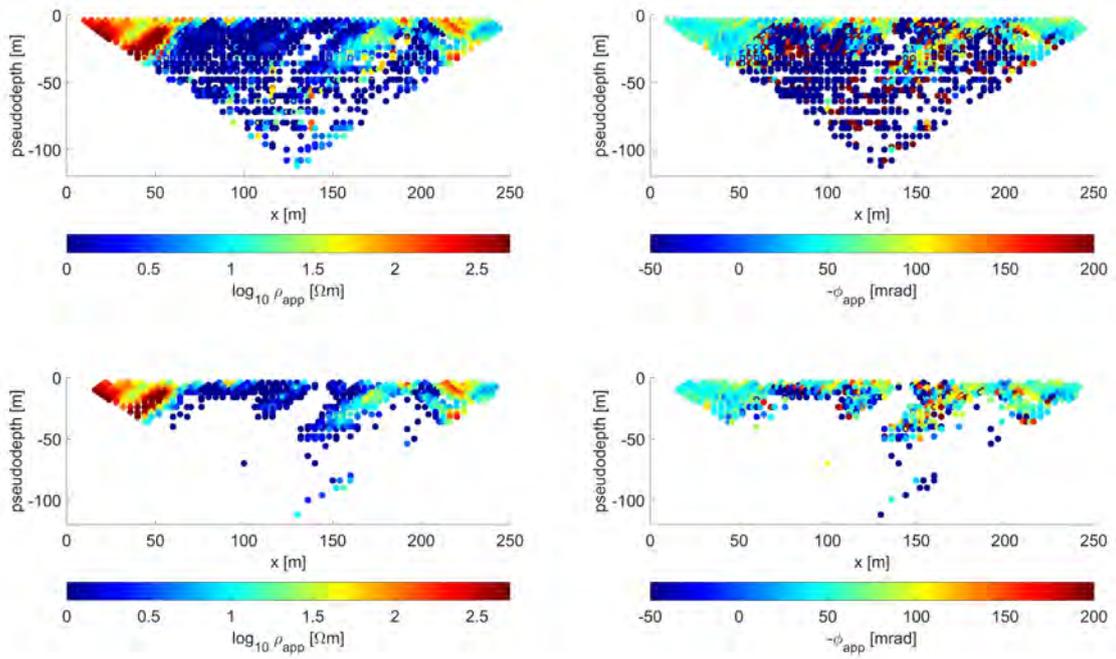


Figure 3.3: Pseudosection of p2 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.

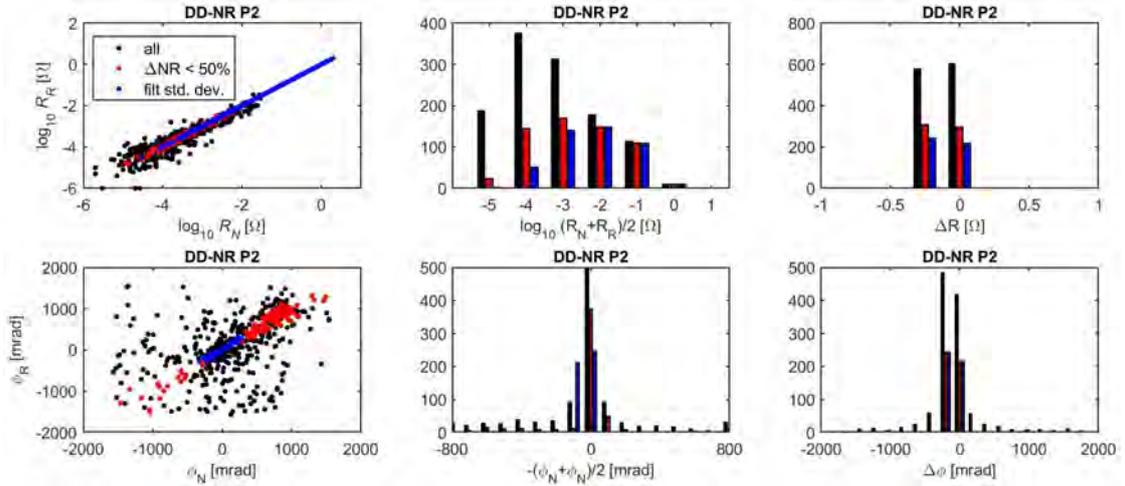


Figure 3.4: N-R data analysis for profile p2. The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.

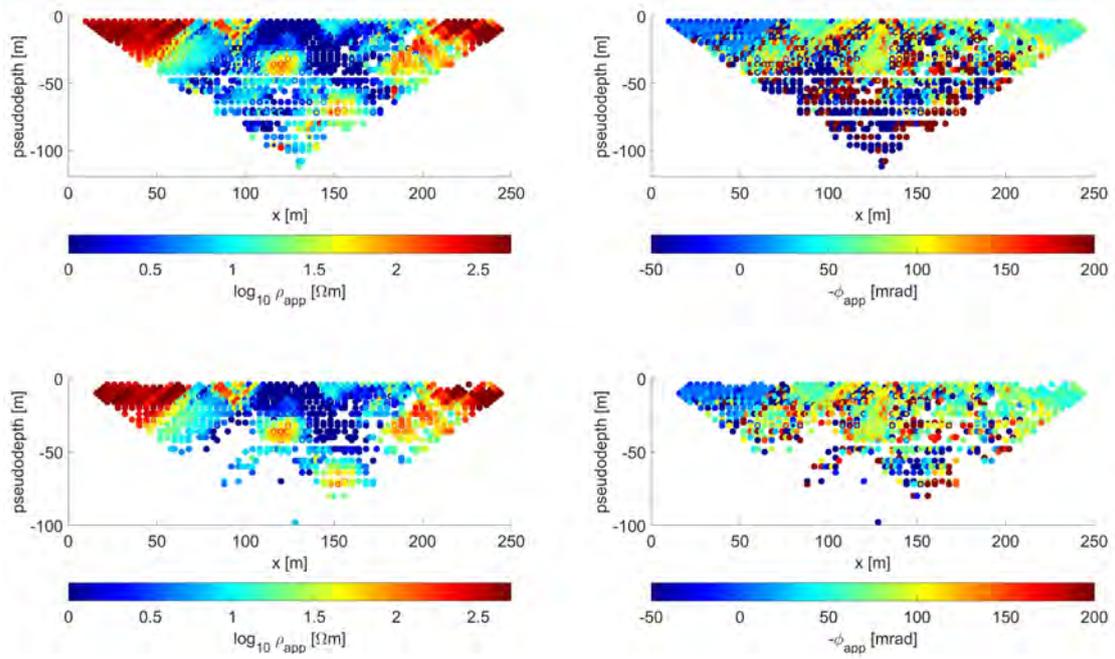


Figure 3.5: Pseudosection of p3 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.

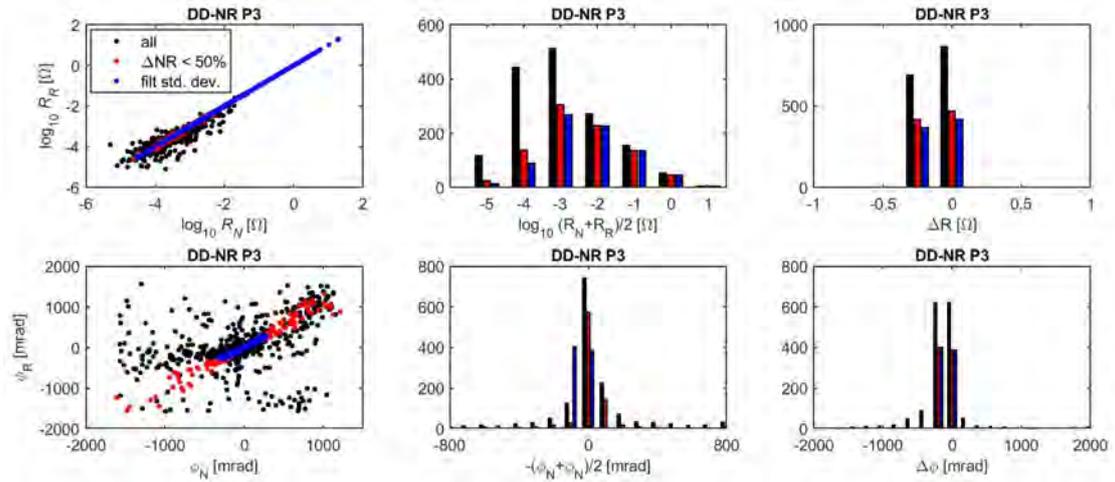


Figure 3.6: N-R data analysis for profile p3. The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.

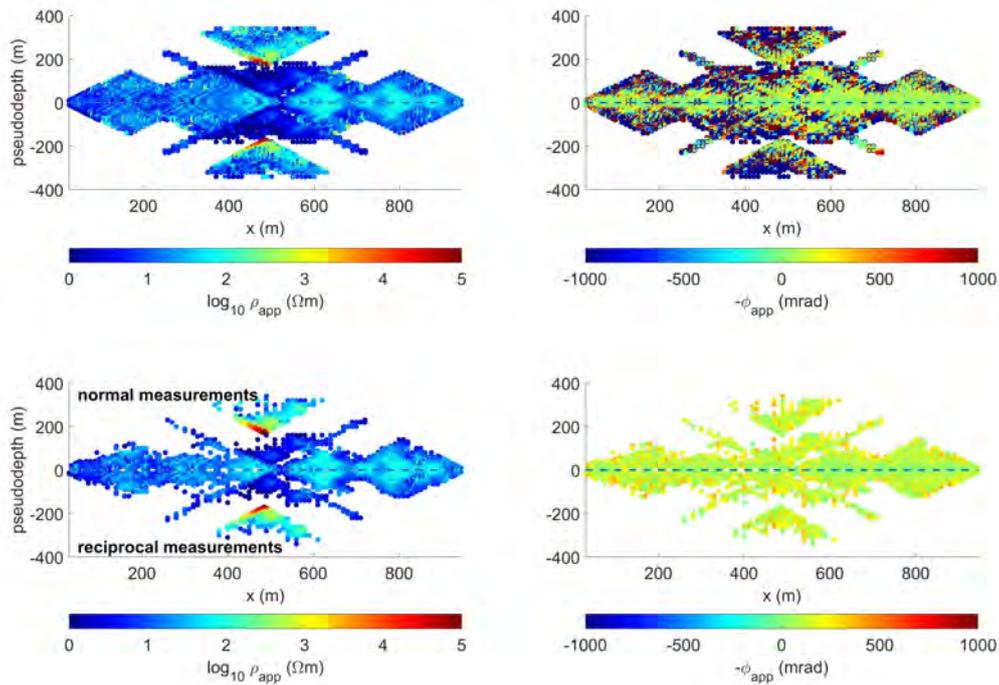


Figure 3.7: Pseudosection of p5 before (top row) and after (bottom row) filtering. The left column shows the electrical resistivity and the right column the IP effect in terms of the apparent phase.

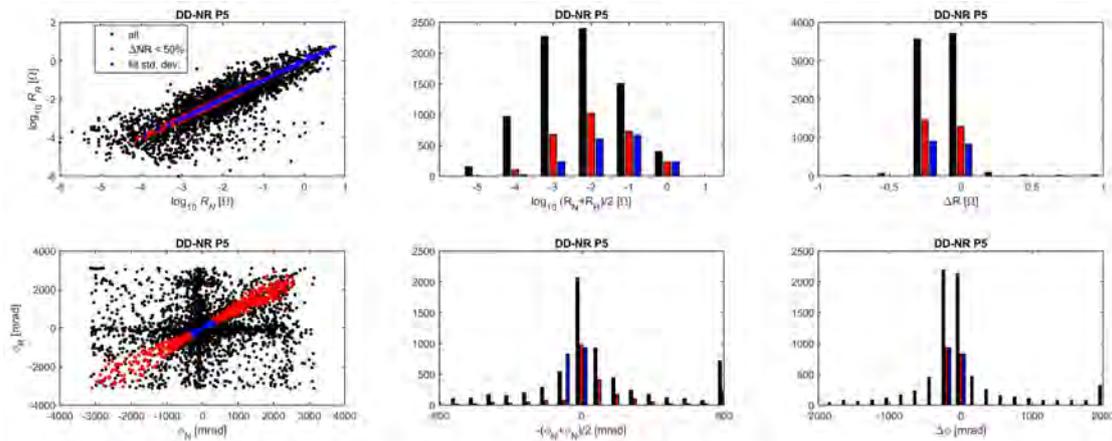


Figure 3.8: N-R data analysis for profile p5 (FDIP). The top row shows the N-R analysis for the electrical resistivity and the bottom row for the phase shift. Black colors represent data before filtering; red colors after removing data points where the N-R misfit exceeds 50% of either the normal or the reciprocal reading; blue colors after removing data points where the N-R misfit exceeds double the standard deviation of all N-R misfits.

Figure 3.7 shows the pseudosections before and after data filtering and Figure 3.8 the N-R data analysis of profile p5. The scatter plot of normal vs. reciprocal readings reveals the strongest deviations from the expected 1:1 line. This is related to the larger electrode separation (10 m) of profile p5 which reduces the SNR and contributes to the contamination of the data with electromagnetic coupling (Flores Orozco, Bucker, et al. 2018). Subsequently, also the phase values show large deviations and almost 2/3 of the data points had to be removed. Nonetheless, due to the high number of measured quadrupoles in the electrode configuration designed, there are still enough data points left to run the inversion to obtain a plausible fitting.

Measurements in p2 and p3 reveal a large number of data with a positive apparent phase, which theoretically is not possible. Hence, we also plotted the phase against the voltage to gain further information about the reasons for the data distribution. Figure 3.9 shows a correlation between low voltages and high absolute phase shift (ϕ) values. The location of the low voltage values correlates to the visible graphite outcrop. Since the lowest current injection was 27 mA, the low voltage values are not related to low current injections. Therefore, the low voltage values can be related to the high conductivity of the graphite.

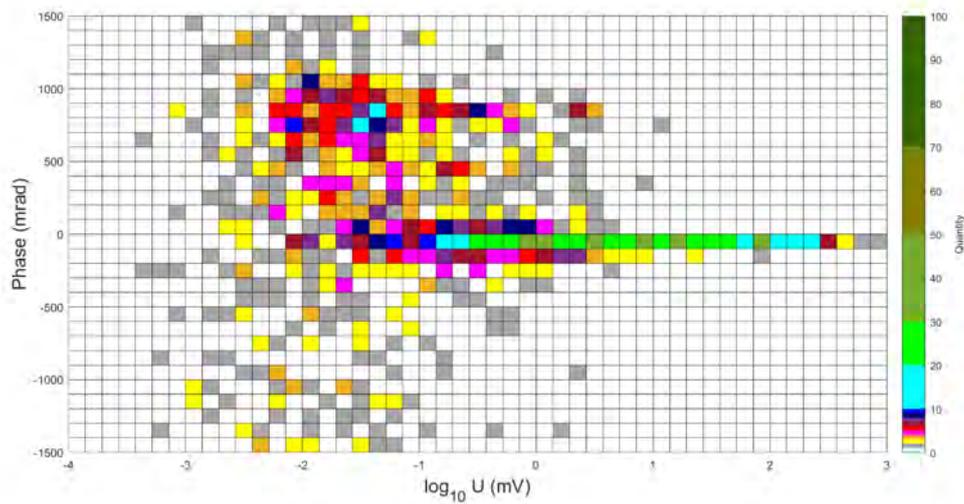


Figure 3.9: Bivariate correlation of the phase against the measured voltage. The color coding indicates the count of values at each bin.

4 Results from the first campaign - Site characterization

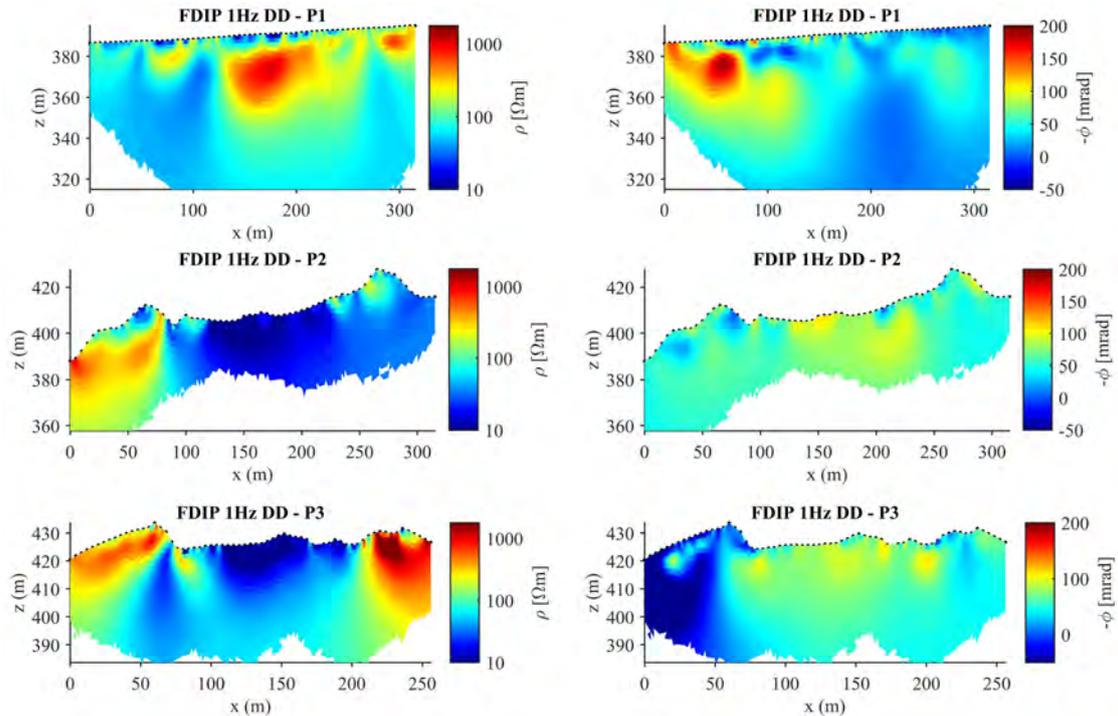


Figure 4.1: FDIP results from the first campaign. Compare Figure 2.2 for an overview of the location of the profiles.

The results from the first campaign are mainly used to characterize the site in general to provide information for further investigations. Figure 4.1 shows the resulting FDIP images at 1 Hz for p1, p2 and p3 in each row respectively. The left column presents the electrical resistivity and the right column the IP-effect in terms of the phase shift. All three profiles are orientated west-east and show an inhomogeneous structure with abrupt lateral changes. The results at p1 can be described by 3 different electrical units:

1. The first 100 m of the subsurface consists of mainly low to intermediate electrical resistivity with a shallow high resistivity anomaly between 60 and 90 m profile distance. This anomaly is surrounded by the lowest electrical resistivity within this profile, which indicate two possible fault strands. The phase shift at the same

position shows the highest anomaly (up to 200 mrad) of all profiles between 50 and 70 m profile distance.

2. Between 120 and 220 m profile distance the subsurface consists of high electrical resistivity up to 1000 Ωm . The phase shift at the same position shows low to intermediate values.
3. The latter part of the profile (220 - 320 m profile distance) consists of intermediate electrical resistivity and a high resistivity anomaly at the end of the profile. The phase shift in the same part of the profile shows intermediate values, which contain two slightly more polarizing anomalies of approximately 100 mrad.

The results at p2 (see middle row in Figure 4.1) can also be described by three different electrical units:

1. The first 75 m of the subsurface consists of mainly high electrical resistivity with a shallow low resistivity anomaly at the peak at the beginning of the profile. The phase shift at the same position shows low values.
2. Between 80 and 220 m profile distance the subsurface consists of the lowest electrical resistivity down to 10 Ωm . The phase shift at the same position shows intermediate values with a few less polarizing anomalies.
3. The last part of the profile (220 - 320 m profile distance) consists of intermediate electrical resistivity at the top, followed by a low resistivity anomaly, which stretches towards the end of the profile. The phase shift in the same part of the profile shows low values.

The results at p3 (see bottom row in Figure 4.1) are similar to p2 except for two main differences:

1. The electrical resistivity in the last part of the profile (220 - 250 m profile distance) is significantly higher and shows values of over 1000 Ωm .
2. The low resistivity anomaly in the middle of the profile is narrower by approximately 50 m. Interestingly this does not hold true for the distribution of the high phase shift values. The high phase shift values in p3 are distributed over a wider part of the profile than in p2.

The combination of low electrical resistivity and intermediate phase shift values in the middle of both p2 and p3 suggests the presence of graphite in the subsurface. To investigate this area further and to reduce the influence of EM coupling we conducted measurements with separated cables in this part of the profile. The measurements were focused between 100 and 200 m profile distance and are presented in the upcoming section.

5 Results from the second campaign - Separated cables to reduce the influence from electromagnetic coupling

The aim of the second campaign is to provide a more detailed look into the middle part of p2 (profilemeter 75 to 250), where we expect the highest graphite content in the subsurface. To reduce the influence of electromagnetic coupling on the data we decided to use separated cables for current injections and voltage measurements. The results of TDIP measurements for three different pulse lengths (0.25 s, 0.50 s and 1.00 s) are shown in Figure 5.1. The electrical resistivity shows almost no dependence on the pulse length of the current signal. However, the phase shift shows an overall increase in absolute phase shift values. In particular the low phase shift values between 120 m and 170 m profile distance is decreasing significantly with increasing the pulse length. This significant decrease can likely be attributed to reduced electromagnetic (EM) coupling effects for longer pulse lengths. Therefore, we can say that the EM coupling is still a factor for shorter pulse lengths.

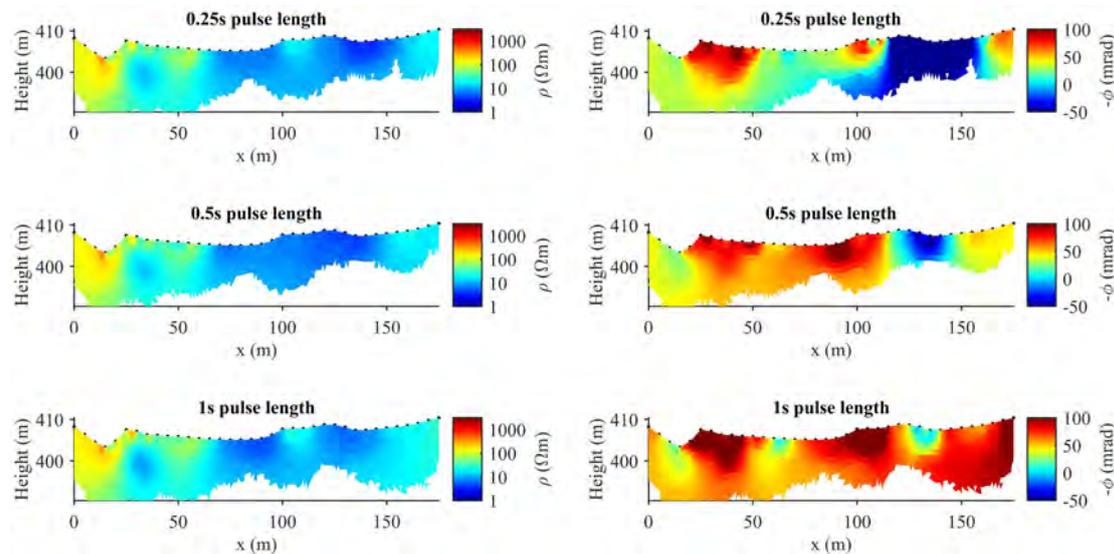


Figure 5.1: TDIP results from the second campaign. Compare Figure 2.3 for an overview of the location of the profile. This profile is called p4 and is located along the middle part of profile p2.

6 Results from the third campaign - Measuring the frequency dependence of the induced polarization method

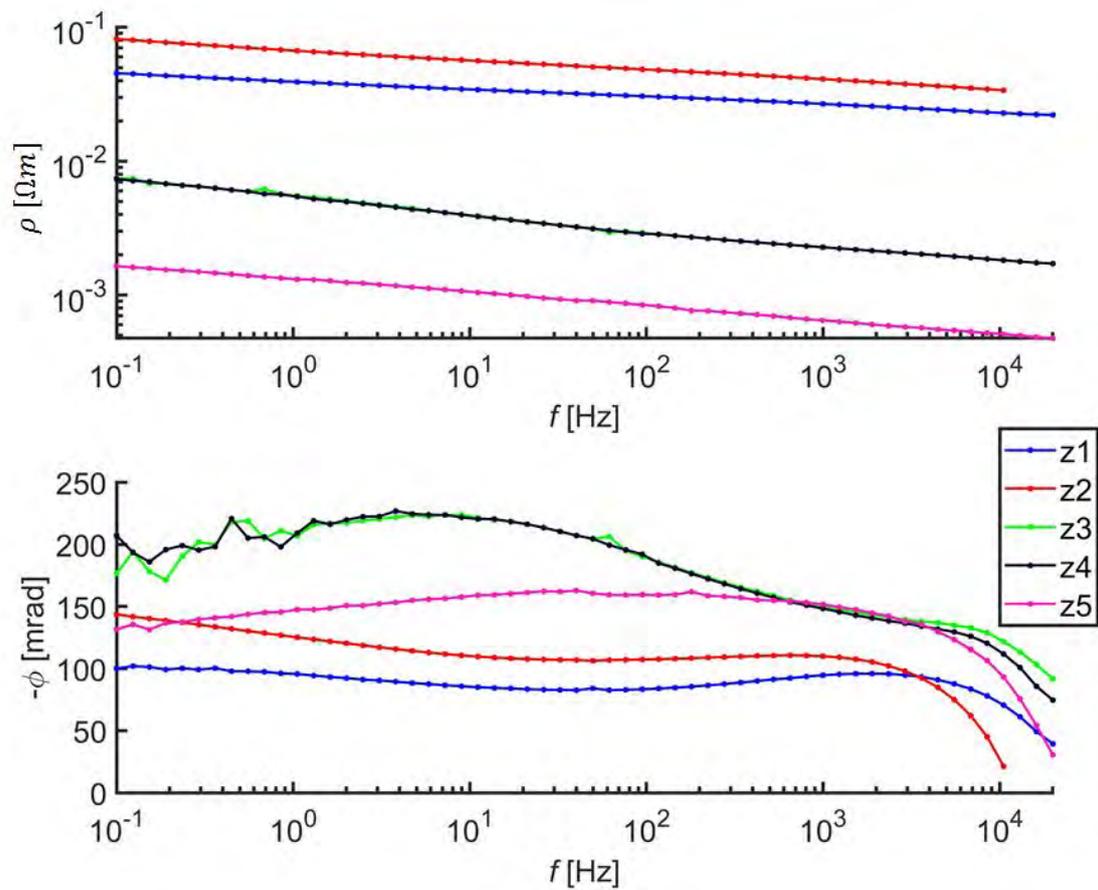


Figure 6.1: Spectra from PSIP measurements at 3 different locations; Every line color indicates one of 5 individual measurements. Details on the position of the individual measurements and their configuration can be found in 2.3.

Figure 6.1 shows the spectra measured at three different positions along P2 (see Figure 2.4 for details). All measurements are presented in terms of the magnitude and phase of the complex resistivity. Although the spectra measured at points z1 and z2 were

measured at the same position, they show differences that are caused by the change in electrode spacing. The spectra z3 and z4 were also performed at the same position (see Figure 6.2), to confirm the noisy signal at low frequencies, yet revealing consistent results. The spectrum z5 was measured directly above the high IP anomaly (see Figure 6.2), where graphite rocks are visible at the surface.

The magnitude of complex resistivity, or simply resistivity (ρ), shows a correlation with the observed in-situ features, namely an important decrease in the resistivity magnitude values, for measurements in the graphite outcrops. Accordingly, the higher resistivity values corresponds for measurements at positions z1 and z2, where no visible graphite is visible at the surface. Consistent with these, the highest polarization response ($-\phi$) corresponds to visible graphite at the surface, while lower values are also related to z1 and z2.

A sharp relaxation peak occurs in all phase spectra ($-\phi$) between 2 and 5 kHz. Additionally, a relaxation peak characterized by a much smaller polarization values can be seen at around 100 Hz in z4 and z5, and at 2 Hz in z1. Furthermore, the phase spectra of z3 and z4 show a relaxation peak with the highest $-\phi$ values at 7 Hz, while the spectra of z5 shows a dispersed curve (wider spectra), with its peak around 26 Hz.

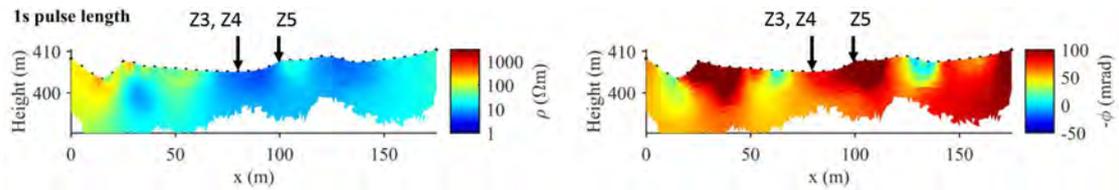


Figure 6.2: TDIP profile p4; The black arrows indicate the position of the PSIP measurements z3, z4 and z5 along the profile.

7 Results from the fourth campaign - Deep investigations

Figure 7.1 and Figure 7.2 present the results from the fourth campaign, which is aiming at providing information on deeper structures. These measurements were also emphasize the difference between the dipole-dipole (DD) and the multiple gradient (MG) configuration. The expectation for MG measurements was to increase the SNR. Additionally, the measurements were repeated in frequency domain to enable a comparison to the results from time domain measurements. The TDIP measurements were done using a 500 ms pulse length and the FDIP measurements using a 1 Hz sine current signal. The

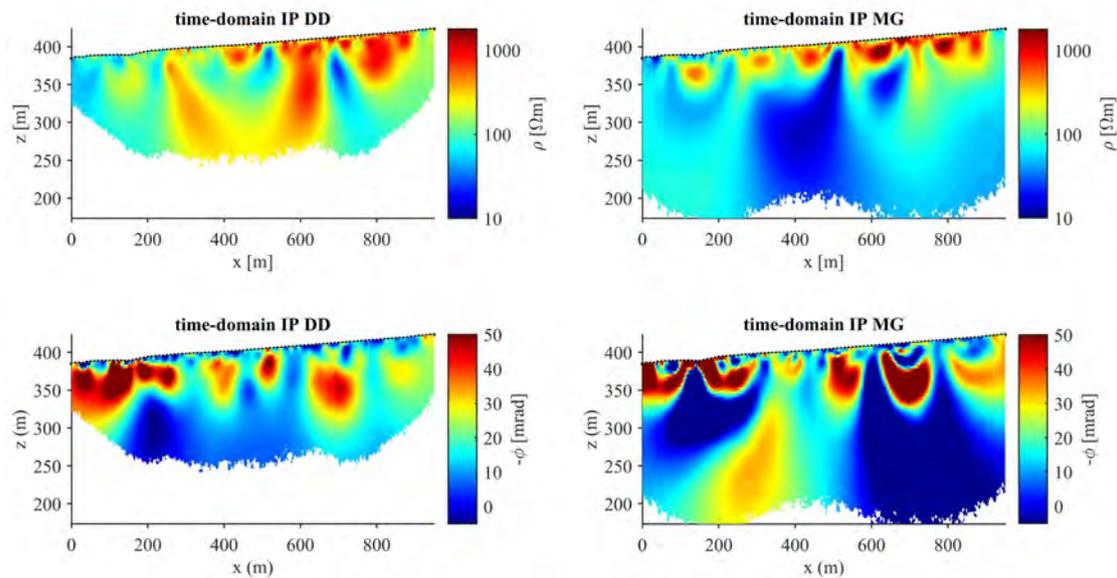


Figure 7.1: Results from deep investigations in campaign 4. The top row compares the electrical resistivity from dipole-dipole configuration to multiple gradient configuration. The bottom row shows the same comparison in terms of the phase shift.

comparison of measurement configurations in Figure 7.1 shows similarities within the first 30 m of the subsurface for both the electrical resistivity and the phase shift. Below 40 m the multiple gradient configuration is likely to loose vertical resolution and results only in poorly resolved model parameters. However, the results from DD measurements provide reliable information on the change in electrical resistivity down to 100 m below the surface. The phase shift images are affected by the same problem.

In a second step we compare inversion results for data collected with DD configurations

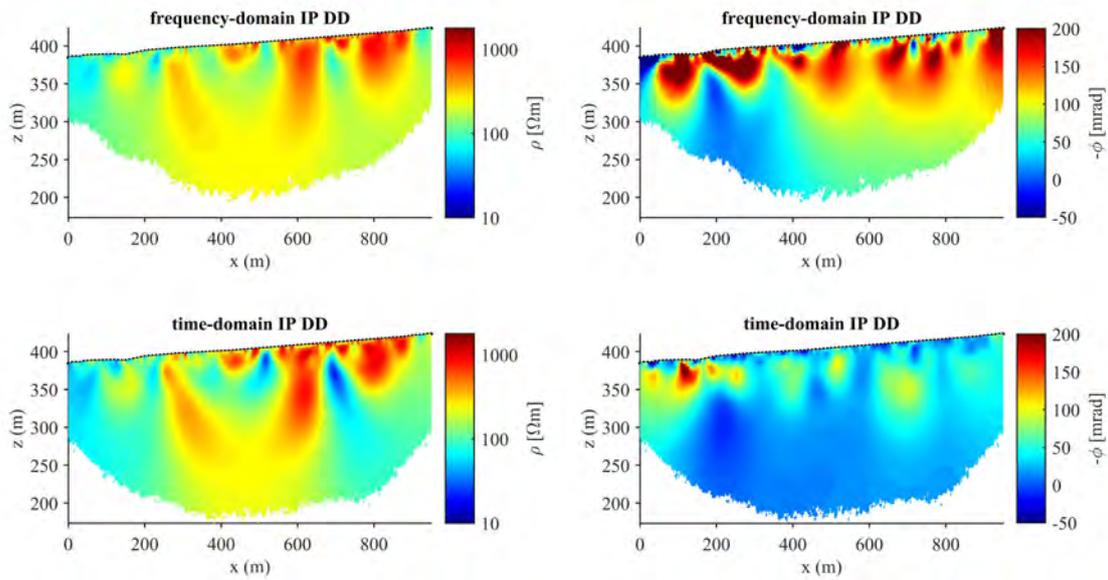


Figure 7.2: Results from deep investigations in campaign 4. The top row shows the electrical resistivity from FDIP and the bottom row shows the results from TDIP. The first column shows the electrical resistivity and the second column the phase shift.

on both frequency-domain (FDIP) and time-domain (TDIP). The latter were collected using a pulse length of 1 s and the former were collected at 1 Hz. The comparison of FDIP (top row of Figure 7.2) and TDIP (bottom row of Figure 7.2) reveals consistent images in the electrical resistivity. Although the phase shift images reveal a consistent distribution of anomalies with high phase shift, the values in TDIP are lower and reveal less contrast between features. This can be likely attributed to a difference in measurement frequency (TDIP: ca. 2 Hz; FDIP: 1 Hz), as well as possible distortions in the FDIP due to electromagnetic coupling.

To assess the capability of the method to investigate a site, with few a priori knowledge, an additional profile (p6) was measured to the southeast of the graphite quarry. The results, in terms of electrical resistivity, can be described by three adjacent vertical structures:

1. The first unit extends from 0 to 38 m profile distance and consists of subsurface materials with high electrical resistivity ($\rho > 50 \text{ } \Omega\text{m}$).
2. The second unit extends from 38 to 60 m profile distance at the top of the subsurface. With increasing depth, the low resistivity anomaly ($\rho < 10 \text{ } \Omega\text{m}$) stretches further along the profile until approximately 70 m.
3. The third electrical unit shows an increase to higher electrical resistivity until it reaches $100 \text{ } \Omega\text{m}$ at the end of the profile.

The results in terms of the phase shift show a different image, which can be described in principle by a two layer model.

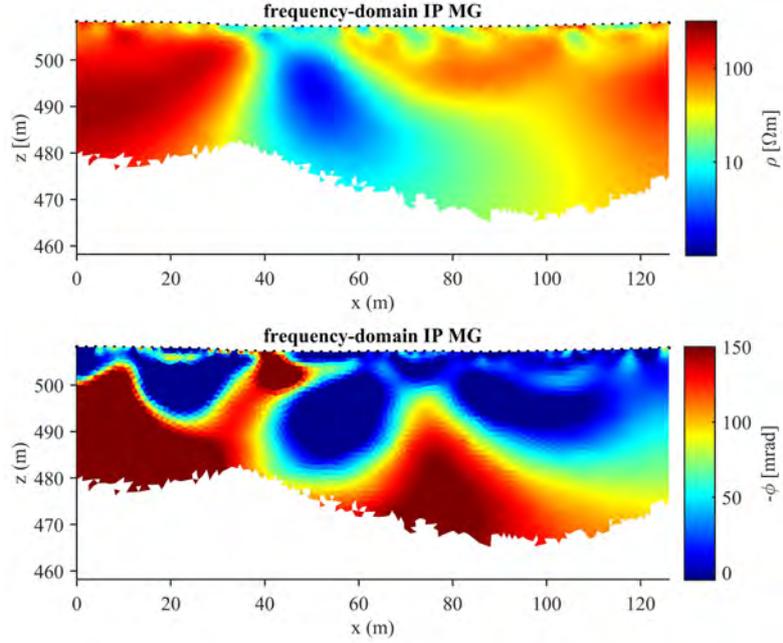


Figure 7.3: Results from the short profile p6, which is located to the southeast of the investigated site.

1. The first layer consists mainly of low polarizing ($-\phi < 50$ mrad) materials and is interrupted by a highly polarizing anomaly ($-\phi > 100$ mrad) at approximately 40 m profile distance. This layer extends from the surface to a varying depth from 5 m to 25 m.
2. The second layer consists of highly polarizing materials ($-\phi > 100$ mrad) with increasing depth along the profile. The contact to the top layer is interrupted at approximately 10 m and 80 m profile distance by two peaks, which reach up to a depth of 5 m (first peak) and 15 m (second peak).

8 Comparing the results from the induced polarization method to the geological information

To understand the geophysical data, we require further geological information. Hence, a complete interpretation of the IP imaging results will be provided by the partners in the Geological Survey Austria (GBA). Nonetheless, a first interpretation of the IP imaging results can be presented here based on a direct comparison with the existing geological information of the site. In the following, we will present a first interpretation of the electrical images resolved for the data collected during the four campaigns described above.

During the first characterization, performed in 2018, we collected data along three different profiles for a general investigation of the site. In case of the Profile p1, we can observe that at its position, the geological map reveals only a lateral interface at the contact between the calcite marble and the hillside debris. In Figure 8.1, the contacts are marked in the geological map (i.e., Figure 8.1 left-hand) as well as in the electrical imaging results (Figure 8.1 right-hand), approximately at 10 and 43 m along profile direction. Imaging results are expressed in terms of the magnitude (ρ) and phase (ϕ) of the complex resistivity. The expectation is that low ρ values should be related to the presence of graphite, which is an electrical conductor. Hence, a first indication of the graphite can be suggested approximately at 100 m (along profile direction), as indicated in the electrical images presented in Figure 8.1. Moreover, due to the high mobility in electrical conductors (i.e., graphite), we also expect high induced polarization (IP, expressed in terms of ϕ) response as observed in the laboratory experiments conducted during the first year (i.e., ExploGRAF report delivered in 2018). The high IP response for electronic conductors has also been demonstrated through numerical models (e.g. Bückner, Flores Orozco, and Kemna 2018; Bückner et al. 2019). Accordingly, IP images reveal high values in the conductive anomaly, sustaining our interpretation, as indicated in Figure 8.1. Moreover, high IP values can also be observed at the beginning of the profile, in the position where the geological map indicates calcite marble. Such lithology is typically associated to high resistivity values, corresponding to compact rocks with poor matrix conduction. However, our images reveal modest resistivity values ($\rho < 100 \Omega\text{m}$), likely suggesting some inclusions of graphite in the calcite rock. Such interpretation is further sustained by the high polarization response observed ($-\phi > 150 \text{ mrad}$), which is an untypical response for calcite marble. However, to validate such interpretation, analysis of rock samples have to be conducted in the laboratory.

Besides the two anomalies described before, imaging results for data collected along

profile p1 reveal relatively high IP ($-\phi \approx 50$ mrad) and resistivity ($\rho > 500 \Omega\text{m}$) values. This is likely associated to the presence of unconsolidated hillside debris, with some occurrence of graphite. The relative high resistivity values in presence of electronic conductors can be explained by the poor compaction and saturation of the hillside debris, with graphite presented as disseminated grains; i.e., they do not form continuous pathways for current conduction. However, to sustain such interpretation it is required to drill and retrieve materials from different depths along profile p1.

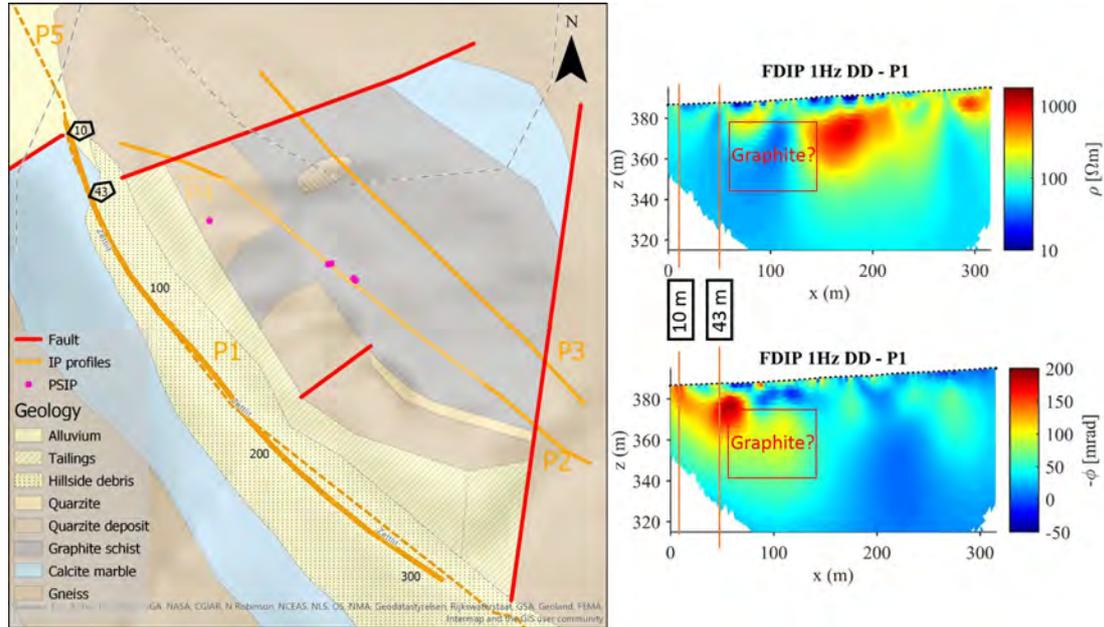


Figure 8.1: Geological map and profile p1

The electrical images presented in Figure 8.2 also reveal higher conductivity values to the east section of profile p2, beyond the limit of the expected graphite anomaly, especially when compared to the resistivity values to the west section of the profile. Such variation indicates the possible occurrence of graphite schist at deeper location to the west from the one indicated by the geological map. However, analysis of the IP response, contradicts such interpretation, considering that the anomaly with the highest polarization response ($-\phi > 100$ mrad) is only observable between approximately 125 and 250 m along the profile direction, in a more moderate dimension than the one observed in the geological map. The discrepancy is likely related to the fact that the high IP response is indicating the highest volumes of graphite; while the resistivity decreases even in low volumes of electric conductors (i.e., graphite). The observed high IP values ($-\phi > 50$ mrad) along the entire electrical image for data collected along p2 clearly indicates that graphite is present to some extent in the subsurface, with variations in the amplitude of the IP response related to the volumetric content. Hence, Figure 8.2 reveals higher graphite content between 125 and 250 m (along the direction of p2), and lower concentrations to the borders of the profile, where the geological map describes

quartzite deposits.

The depth of the graphite-rich formation can be approximated to 30 m, by considering the vertical extension of the high polarizable anomaly described above. The blanked regions below the conductive anomaly indirectly indicate a contact to a more resistive material which results in a loss of sensitivity during the modeling of the data. Here, highly conductive zones are more sensitive, as these easily permit the flow of high current densities; whereas resistive materials hinder current flow and tend to reduce the sensitivity of the data. In our case, we blanked model parameters associated to low sensitivity, which in our case was defined as a factor 1000 below the highest sensitivity resolved through the inversion. It is important to notice here that along profile p2, besides the presence of graphite, iron sulfides, such as pyrite and chalcopyrite, were observed at the study area, as presented in Figure 8.3. These iron sulfides are electric semi-conductors, thus contributing to the low electrical resistivity values. Moreover, these minerals are typically related to high IP response (e.g., Flores Orozco et al. 2011, Flores Orozco, Williams, and Kemna 2013); thus, also contributing to the high polarizable anomaly. As discussed within the laboratory results in the first report (2018), the electrical response of graphite and iron minerals is practically the same for the low frequencies (i.e., below 10 Hz). Hence, it is not possible, so far, to discriminate between graphite-rich areas and areas with high content of iron sulfides.

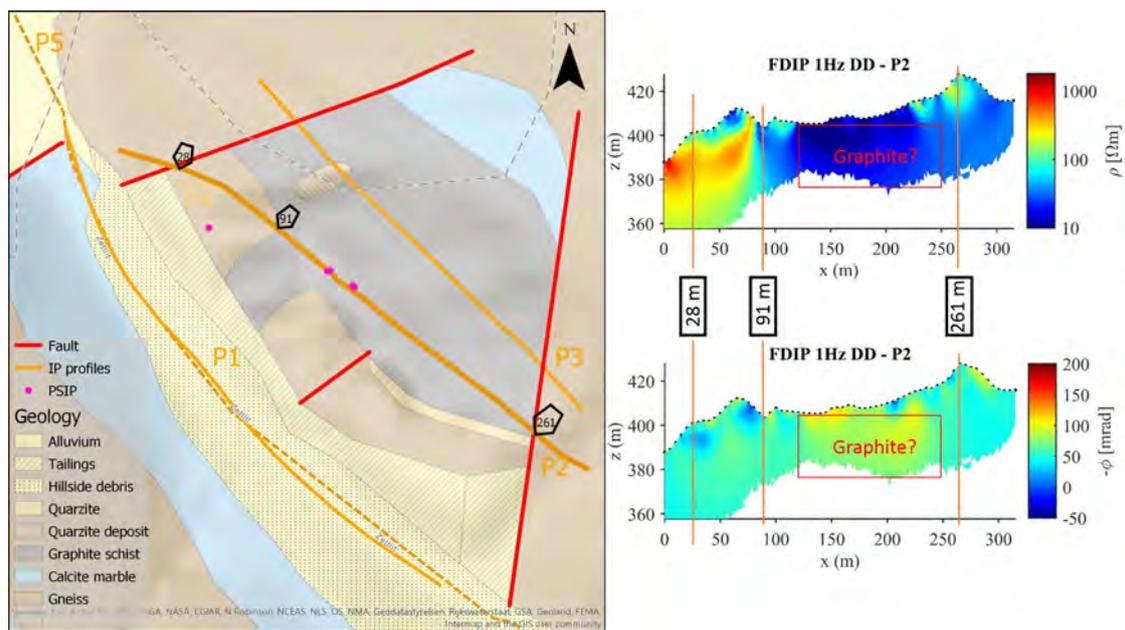


Figure 8.2: Geological map and profile p2

Imaging results for data collected along profile p3 are a good example to illustrate the complexity of the study area as well as the potential of the IP method. In this case, the geological map marks four different contacts between the quartzite and the graphite schist units, as presented in Figure 8.4. In general, the graphite is expected between 28

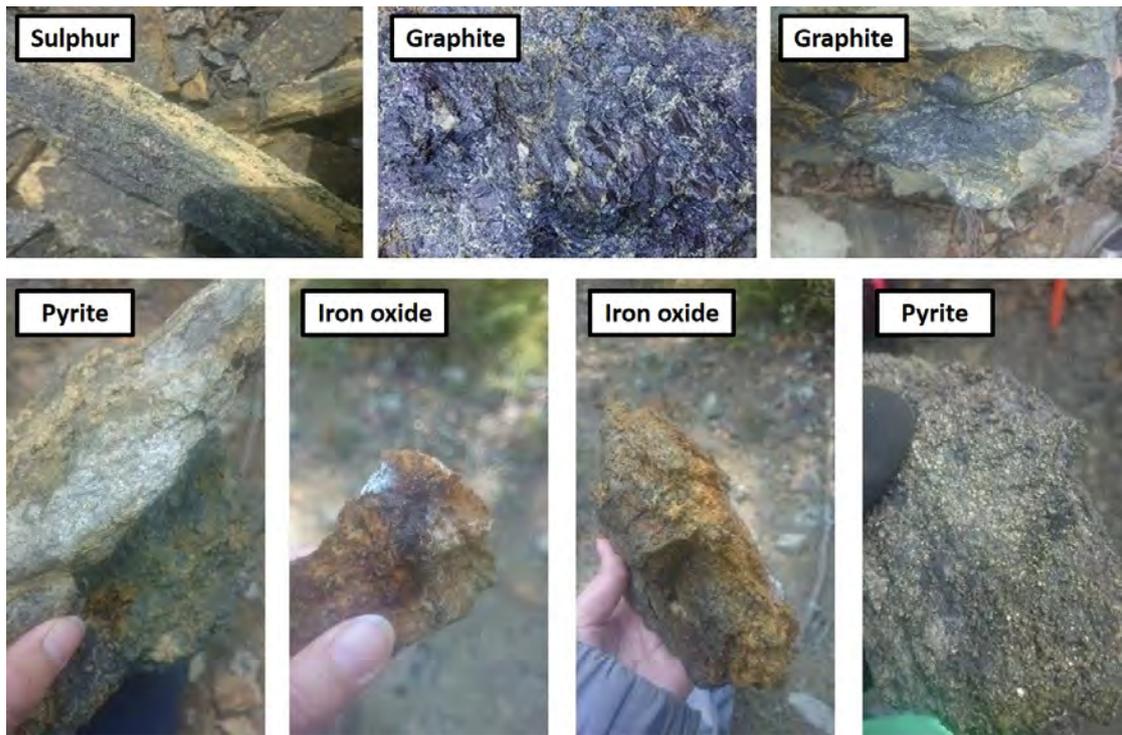


Figure 8.3: Geological map and profile p2

and 208 m along the direction of p3, which is consistent with the lowest conductivity values ($\rho < 10 \Omega\text{m}$). However, some discrepancy can be observed, regarding the high resistivity values ($\rho > 300 \Omega\text{m}$) between 28 and 57 m in the electrical images, which suggests that this area is likely related to low volumetric content of graphite, which is thus expected to be present as disseminated grains. Such interpretation is supported by the IP image, which in general reveals only modest polarization response ($-\phi > 20$ mrad), which represent the lowest values observed at the study area. However, a fine structure can be observed with higher IP values ($-\phi \approx 50$ mrad) within the first 50 m along the direction of p3. The graphite-rich unit along profile p3 can be defined within 57 and 208 m along profile direction, with a depth of approximately 15 m, as indicated in the highly conductive and polarizable anomaly presented in Figure 8.4. Such anomaly resolves in general low resistivity values ($\rho < 10 \Omega\text{m}$), consistent to those resolved along profile p2 discussed above (Figure 8.2). In the case of the IP effect, the resolved values are also high ($-\phi > 100$ mrad). However, the anomaly reveals larger lateral changes than those resolved in the resistivity model. Such spatial changes might indicate subsurface variations in the volumetric content of graphite. However, analysis of the actual graphite content in soil samples is required for a quantitative interpretation.

Consistent to the interpretation discussed for data collected along profile p2 above, the electrical model presented in Figure 8.4 also suggests a higher graphite content to the east side of the profile p3 (between 200 and 250 m along profile direction) in comparison with the west regions of the profile (between 0 and 50 m along profile direction). Such observation is based on the higher polarization values observed in Figure 8.4, which extend beyond the area limited by the geological map. This apparent discrepancy is only related to the fact that the geological map is based on direct observations on the surface materials and in outcrops; while the electrical images provide information on the subsurface properties, extending the investigations to depths not accessible to surface observations.

We also note here that iron sulfides were not observed in the vicinity of p2, which suggests that most of the response observed in Figure 8.4 is only related to graphite schist in the subsurface. However, without materials retrieved from drillings at different positions and depths, it is not possible to provide a final interpretation of the electrical images.

Figure 8.5 presents the comparison of the profile p1 and the extended profile p5. Both were collected on the same area, but with different number and separation of electrodes. Hence, they are also related to different resolution and depth of investigation. Nonetheless, as observed in the electrical images, both reveal consistent distribution of the electrical properties (resistivity and polarization). On the one hand, the phase images in Figure 8.5 reveal that the high polarization values discussed above for the hillside debris can still (see Figure 1.2) be observed for a longer profile, extending practically over 1 km along the direction of p1 and with a depth of 70 m. Such polarizable anomaly ($-\phi > 100$ mrad) can only be explained by the presence of graphite and, to some extent possible iron sulfides, engaged in electrode polarization mechanisms. Such interpretation is supported by the modest resistivity values ($\rho < 200 \Omega\text{m}$) resolved for these materials, where clear lateral variations resolve also values below $10 \Omega\text{m}$, which can be attributed

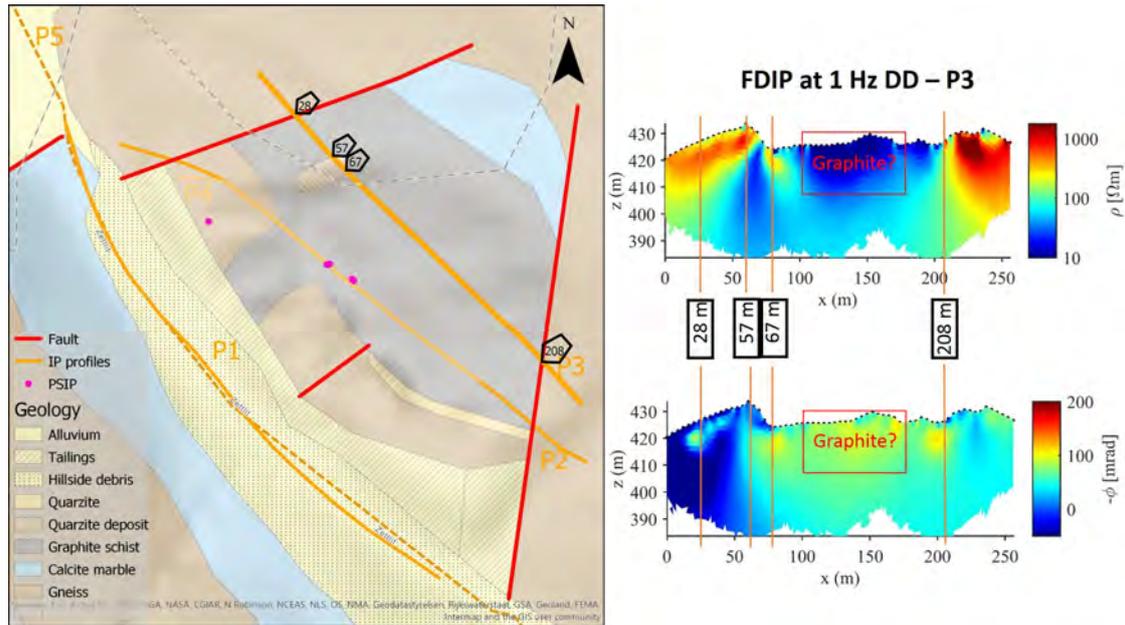


Figure 8.4: Geological map and profile p3.

to graphite, as discussed above.

The large electrode separation permits to inject larger current densities and to extend the depth of investigation. Hence, imaging results for data collected along p5 permit to estimate a maximum depth of 70 m for the graphite-schist formation. Below such depth, the polarization response decreases significantly, and the resistivity values increase. Such observation was also inferred during the first characterization survey (i.e., profile p1). However, the analysis of the data collected along profile p5, facilitates the interpretation considering the larger depth of investigation expected for the larger number of electrodes and their separation (i.e., 96 electrodes with a separation of 10 m between them, for a total length of 950 m).

The maximum depth of 70 m for the graphite-schist unit can be also confirmed by the consistent vertical variations resolved for data collected along p5 with both time- and frequency-domain (TDIP and FDIP) measurements. The comparison of imaging results presented in Figure 7.2 in chapter 7, demonstrate that both measuring techniques provide consistent results, with practically the same resistivity model, and the same structures in the IP image. Variations in the amplitude of the IP response between TDIP and FDIP data are only related to changes in the texture of the electric conductor (i.e., graphite), which results in variations of the length scale controlling the polarization. Hence, the higher polarization observed at low frequencies (i.e., 1 Hz) is clearly related to the large graphite grains, which in turn correspond to slow polarization processes. Such effect is also observed during the comparison of imaging results for TDIP data collected with different pulse length provided in Figure 5.1. Here, we observe an increase in the polarization response by increasing the pulse length, as expected for slower polarization

processes. The migration of ions along large grains to establish a perfect polarization of the free charges is much slower than the ion migration around small minerals. Hence, the polarization at large pulse lengths is likely supporting the interpretation of large graphite grains, likely in the order of centimeters.

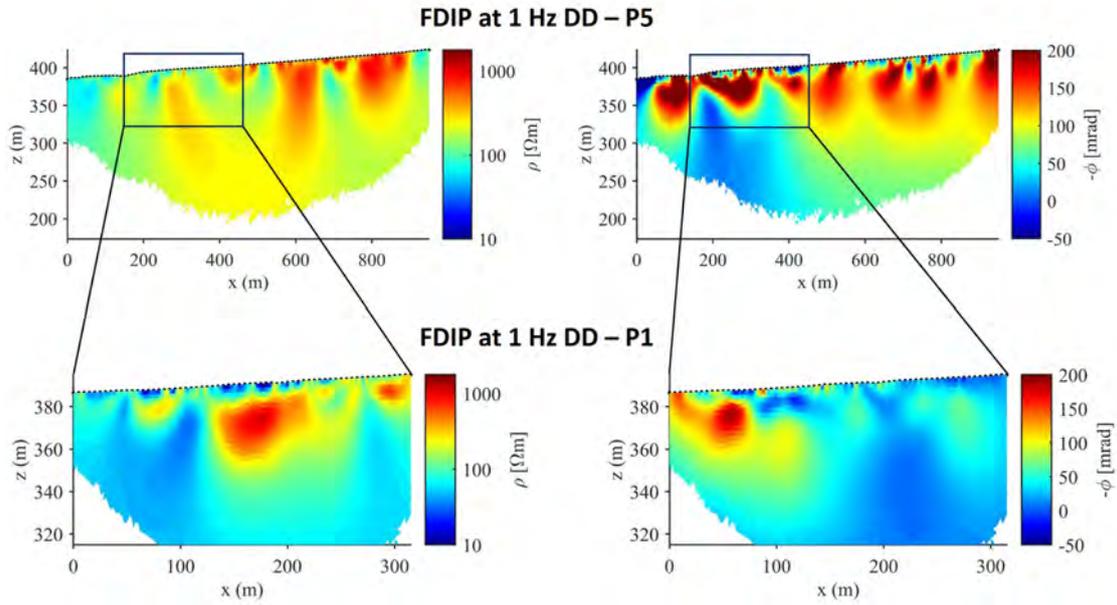


Figure 8.5: Comparison of IP profile p5 to the profile p1 and the geological information in terms of electrical resistivity.

9 Conclusion

The main objective of this project was to develop a new methodology for the characterization of graphite at the field scale. This field-scale methodology is based on the application of the induced polarization (IP) method at various scales. Our results demonstrate that the IP method is a suitable method for the characterization of graphite in the subsurface and our findings can be summarized by the following four points:

1. The IP method permits to extend geological investigations to discriminate between high and low graphite content.
2. The electrical resistivity of graphite-rich formations is quite low (below 10 Ωm), yet for such low values, the analysis of only resistivity images hinders a proper identification of variations in volumetric content of graphite.
3. The IP method reveals an extremely large response in conductive areas, associated to the polarization of electric conductors, such as the graphite. The field observations presented in this report are consistent with the laboratory measurements presented during the first report of the “ExploGRAF” project (2018).
4. The IP imaging results suggest that the graphite-rich unit has a depth between 15 and 30 m and stretches from north to south of the study area (i.e., at the position of profiles p3 and p2). At the position of profile p1 (the southernmost profile), the graphite concentration is expected to be low, yet, the low electrical conductivity values and the high IP response, indicate that sediments contain significant volumetric content of graphite. This significant volumetric content extends to a depth of approximately 70 m.

Bibliography

- Bücker, Matthias, Adrián Flores Orozco, and Andreas Kemna. 2018. Electrochemical polarization around metallic particles—part 1: the role of diffuse-layer and volume-diffusion relaxation. *Geophysics* 83 (4): E203–E217.
- Bücker, Matthias, Sabine Undorf, Adrián Flores Orozco, and Andreas Kemna. 2019. Electrochemical polarization around metallic particles—part 2: the role of diffuse surface charge. *Geophysics* 84 (2): E57–E73.
- Flores Orozco, Adrián, Matthias Bücker, Matthias Steiner, and Jean-Philippe Malet. 2018. Complex-conductivity imaging for the understanding of landslide architecture. *Engineering geology* 243:241–252.
- Flores Orozco, Adrián, Jakob Gallistl, Matthias Bücker, and Kenneth H Williams. 2018. Decay curve analysis for data error quantification in time-domain induced polarization imaging. *Geophysics* 83 (2): E75–E86.
- Flores Orozco, Adrián, Andreas Kemna, Andrew Binley, and Giorgio Cassiani. 2019. Case history analysis of time-lapse data error in complex conductivity imaging to alleviate anthropogenic noise for site characterization. *GEOPHYSICS* 84 (2).
- Flores Orozco, Adrián, Andreas Kemna, and Egon Zimmermann. 2012. Data error quantification in spectral induced polarization imaging. *Geophysics* 77 (3): E227–E237.
- Flores Orozco, Adrián, Kenneth H Williams, and Andreas Kemna. 2013. Time-lapse spectral induced polarization imaging of stimulated uranium bioremediation. *Near Surface Geophysics* 11 (5): 531–544.
- Flores Orozco, Adrián, Kenneth H Williams, Philip E Long, Susan S Hubbard, and Andreas Kemna. 2011. Using complex resistivity imaging to infer biogeochemical processes associated with bioremediation of an uranium-contaminated aquifer. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 116 (G3).
- Kemna, Andreas. 2000. *Tomographic inversion of complex resistivity: theory and application*. Der Andere Verlag.
- Müller, Nina-Luise. 2016. *Die grafitlagerstätte zettlitz; geologische bearbeitung des rohstoffvorkommens*. Montanuniversität, Leoben.