

*Validierung des Einsatzes geoelektrischer
Verfahren für die Untersuchung des tieferen
Untergrundes bis 350 m*

Projekt ÜLG75

Endbericht 2019

(07.2017 bis 12.2019)

von

RÖMER, A., OTTOWITZ, D., JOCHUM, B., BIEBER, G., PFEILER, S.,
SLAPANSKY, P., HEIDOVITSCH, M.

92 S., 74 Abb., 12 Tab.

Wien, Juni 2020

PROJEKTLEITUNG: MAG. A. RÖMER

MITARBEITERINNEN UND MITARBEITER:

MAG. D. OTTOWITZ	GEOPHYSIK
MAG. S. PFEILER	GEOPHYSIK
MAG. G. BIEBER	GEOLOGIE
MAG. B. JOCHUM	GEOPHYSIK
DR. P. SLAPANSKY	GEOLOGIE
M. HEIDOVITSCH	TECHNIKER

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

Die Projektdurchführung erfolgte im Rahmen des Lagerstättengesetzes im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung und des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Überblick	3
2	Geoelektrische Messungen/Geoelektrikprofile	5
2.1	Grundlage der geoelektrischen Datenanalyse	8
2.2	Profile Achau 2, 3, 4.....	13
2.3	Profil Bruckneudorf	22
2.4	Profil Neusiedl am See.....	27
2.5	Profil Winden am See	32
2.6	Profil Frauenkirchen	37
2.7	Profil Schmidatal	45
2.8	Profil Sibratsgfäll	49
2.9	Profile Ortenburg	54
2.10	Resümee Tiefe Geoelektrik.....	62
3	Geoelektrische Messungen/Stollenmessungen	64
3.1	Einleitung/Ausgangslage	64
3.2	Vorarbeiten	65
3.3	Methodik und Ergebnisse der verschiedenen Messkampagnen	67
3.4	Resümee geoelektrische Stollenmessungen.....	90
4	Literatur	92

1 Einleitung und Überblick

Im Rahmen des ÜLG-Projektes „Validierung des Einsatzes geoelektrischer Verfahren für die Untersuchung des tieferen Untergrundes bis 350 m (ÜLG-75)“ wurden einerseits geoelektrische Testmessungen zur Bewertung der Praxistauglichkeit von langen Profilen (ca. 2km), sowie deren Ergebnisbewertung und andererseits umfangreiche Messungen untertage in Stollenabschnitten des Salzbergwerkes von Hallstatt, durchgeführt.

Die Qualitätskontrolle und die Inversion der Messdaten wurde v.a. mit den Programmen Proc_GM4D (Version 1.0, ©KIGAM, Korea), AGI EarthImager2D (Version 2.4.1, ©AGI USA, USA) und Res2dinvx64 (Version 4.08, ©Geotomo, Malaysia) vorgenommen. Bei dem Programm Proc_GM4D (Version1.0, ©KIGAM, Korea) handelt es sich um ein, im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit dem geolog. Dienst der Republik Korea (KIGAM) entwickeltes Datenanalysetool für geoelektrische (Monitoring)Daten.

Die Messungen untertage (Stollenmessungen) wurden in Kooperation mit den Kollegen des Naturhistorischen Museums Wien und mit Rücksprache mit der Salinen AG im Salzbergbau Hallstatt durchgeführt. Die Messungen bzw. die Auswertungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Univ. Thessaloniki und Kollegen vom geolog. Dienst KIGAM.

Der Rohstoffbezug des Projektes ÜLG-75 ergibt sich aus der Tatsache, dass nach der entsprechenden Evaluierung der Einsatzmöglichkeit der tiefen Geoelektrik und der Anwendung der Geoelektrik im Bereich von Untertagemessungen im Stollen, diese Methoden systematisch bei rohstoffspezifischen Fragestellungen, entsprechender Zieltiefen und physikalischen Randbedingungen (entsprechende Kontraste des elektr. Widerstand) einsetzbar sind.

Hinsichtlich der 6-monatigen Verlängerung des Projektes sind im folgenden jene Projektaufgaben angeführt, welche aufgrund der über den Rahmenantrag hinausgehenden, zusätzlichen Projektmittel durchgeführt worden sind:

- Durch die von der GBA eingeführte Umstellung auf organisationsübergreifendes Projektmanagement an der GBA waren sowohl Schulungen für Projektleiter und Projektmitarbeiter, als auch zusätzliche Tätigkeiten in diesem Rahmen (Softwareeinführung, Projekteinpfege) nötig.
- Weitere Messungen unter Vollraumbedingungen, d.h. eine zusätzliche Messkampagne in bekannten Stollenbereichen des Salzbergwerkes in Hallstatt konnte durchgeführt werden. Die erhobenen Daten wurden in Zusammenarbeit mit den Kollegen von KIGAM (Republik Korea) - als Entwickler der Inversionssoftware Proc_Geomon4D - detailliert ausgewertet (Datenanalyse, gemeinsame Dateninversion aller bestehenden Vollraummessungen).

- Die interessanten Ergebnisse dieser Auswertung und deren Interpretation führten zu einer Einreichung eines Tagungsbeitrages für die „Near Surface Geoscience Conference (EAGE)“ im September 2020 (mittlerweile angenommen).

Zusätzlich ist es wichtig ist zu erwähnen, dass das Projekt ÜLG-75 „Validierung des Einsatzes geoelektrischer Verfahren für die Untersuchung des tieferen Untergrundes bis 350 m“ ursprünglich mit einer 3-jährigen Laufzeit beantragt und genehmigt wurde. Durch die Notwendigkeit das ÜLG-76 Projekt „Entwicklung eines feldtauglichen Messgerätes für Induzierte Polarisationsmessungen auf Basis der GBA Eigenentwicklung GEOMON 4D“ zu verlängern, wurde die Laufzeit des ÜLG-75 Projektes entsprechend um ein Jahr verkürzt. Der Stand des Projektes Mitte 2019 und der weitere Ausblick ließ eine vorzeitige Beendigung des Projektes ÜLG-75 mit 31.12.2019 dahingehend zu, als dass zu dem Zeitpunkt eine Vielzahl von Feldmessungen und die dazugehörigen Analysen und auch ausreichend Resultate der verschiedenen Messkampagnen der Untertagemessungen mit validen Ergebnisse vorlagen, um daraus ein entsprechendes wissenschaftliches Fazit zu ziehen.

2 Geoelektrische Messungen/Geoelektrikprofile

Im Rahmen des Projektes wurden 8 Untersuchungsgebiete mit 12 geoelektrischen Profilen bearbeitet.

Tab. 1 gibt einen Überblick über die Messgebiete der geoelektrischen Testmessungen der Oberflächengeoelektrik.

	Messgebiet	Bundesland	Anzahl der Profile	Bohrung vorhanden	bestehende Geoelektrik vorhanden
1	Achau	NÖ	3	X	
2	Bruckneudorf	Bgld.	1	X	X
3	Neusiedl am See	Bgld.	1		X
4	Winden	Bgld.	1	X	X
5	Frauenkirchen	Bgld.	1	X	X
6	Schmidatal	NÖ	1	X	X
7	Sibratsgfall	Vbg.	1		X
8	Ortenburg	Bayern (D)	3		

Tab. 1: Überblick über die geoelektrischen Messgebiete der Oberflächengeoelektrik

Abb. 1 zeigt einen Überblick über die Lage der Messgebiete in Österreich und die Lage des Messgebietes in Bayern.



- | | |
|---|----------------------------|
| 1 | Messgebiet Achau |
| 2 | Messgebiet Bruckneudorf |
| 3 | Messgebiet Neusiedl am See |
| 4 | Messgebiet Winden am See |
| 5 | Messgebiet Frauenkirchen |
| 6 | Messgebiet Schmidatal |
| 7 | Messgebiet Sibratsgöll |
| 8 | Messgebiet Ortenburg |

Abb. 1: Lage der bisherigen Messgebiete (Umgebung Wien)

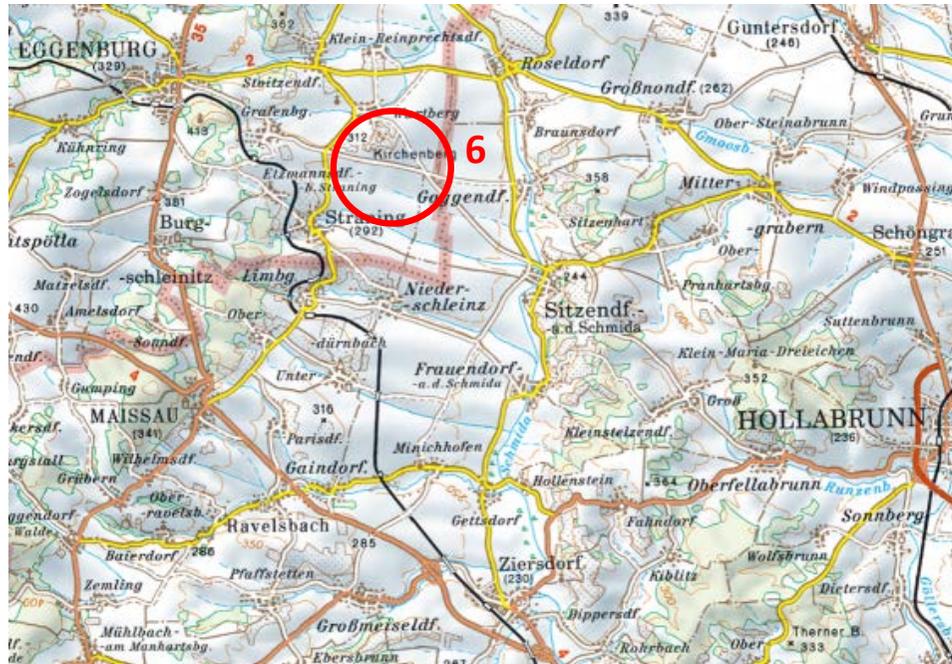
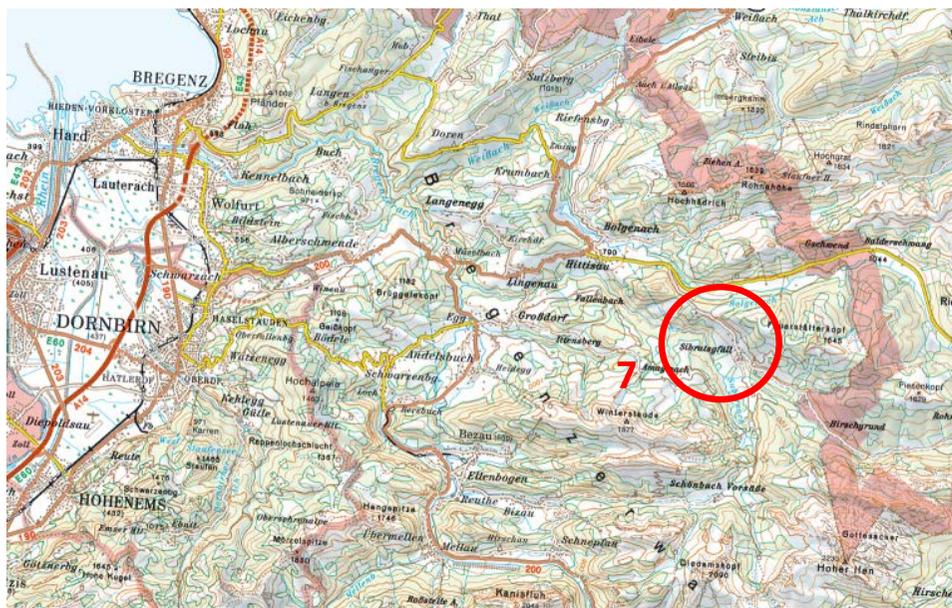
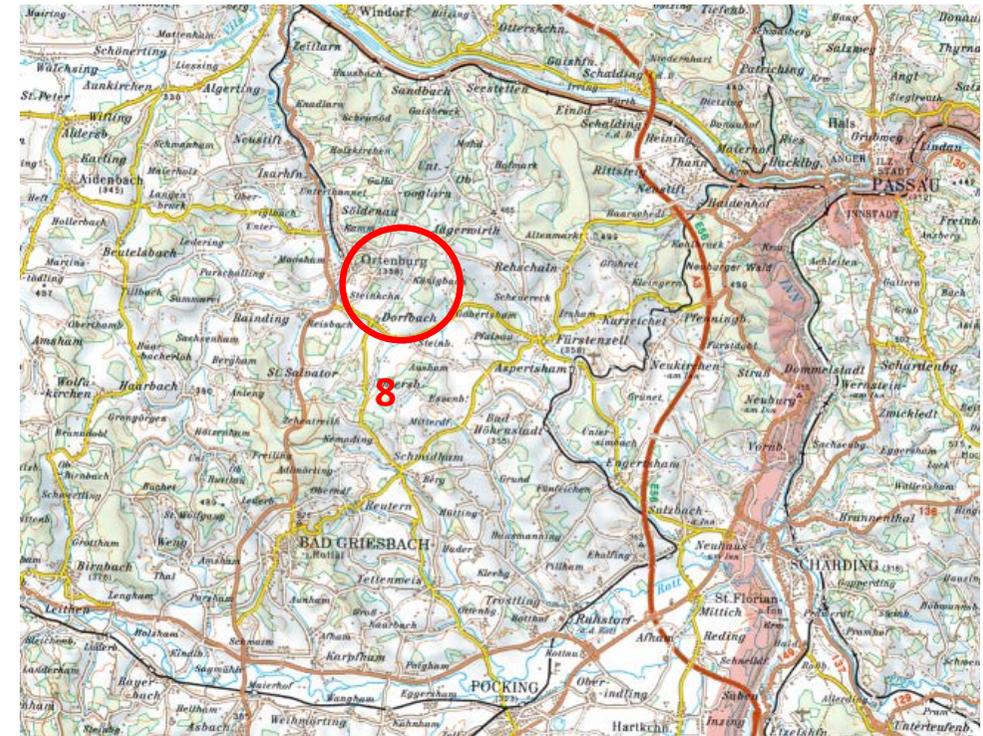


Abb. 1: Lage der anderen Messgebiete Schmidatal, Sibratsgfäll (links) und Ortenburg (rechts)



2.1 Grundlage der geoelektrischen Datenanalyse

Für eine Abschätzung und Analyse der Datenqualität von geoelektrischen Messparametern (Strom- Spannungswerte, Signal/Noiseverhältnis, Störsignale) und für die Inversion der Daten wurden die drei verfügbaren Programmpakete (Proc_GM4D (Version1.0, ©KIGAM, Korea), AGI EarthImager2D (Version 2.4.1, ©AGI USA, USA) und Res2dinvx64 (Version 4.08, ©Geotomo, Malaysia) herangezogen. Vor allem für die Datenanalyse kamen hauptsächlich die beiden Softwarepakete (Proc_GM4D (Version1.0, ©KIGAM, Korea), AGI EarthImager2D (Version 2.4.1, ©AGI USA, USA) zum Einsatz. Das Programm Proc_GM4D entstand in einer Kooperation mit KIGAM (Republik Korea) und wurde im Rahmen dieser Entwicklung speziell auf das Messgerät GEOMON4D (Eigenentwicklung der GBA) zugeschnitten und soll deshalb näher erläutert werden.

ProcGeomon4D 2 bzw. DC2DPro

Da diese Softwaremodule Teil eines Kooperationsprojektes mit KIGAM darstellen und somit als Eigenentwicklung bezeichnet werden kann, können die einzelnen Datenverarbeitungsschritte wesentlich detaillierter erläutert werden, als bei der Beschreibung kommerzieller Softwarepakete, wo diesbezüglich keine entsprechenden Details verfügbar sind. Daher ist der folgende Abschnitt relativ umfangreich und beinhaltet die detaillierte Beschreibung der Datenauswertung.

Die Software ProcGeomon4D_2 besteht aus zwei Modulen, wobei vor allem das für die Datenfilterung zuständige Modul (ProcGeomon4D_2) eine Eigenentwicklung der GBA (in Zusammenarbeit mit KIGAM) darstellt. Der Inversionsalgorithmus ist zwar kommerziell erhältlich (Eigenentwicklung von KIGAM) wurde aber in der aktuell verwendeten Form auf die Messdaten des verwendeten geoelektrischen Messsystem Geomon4D abgestimmt. Dadurch ist es möglich, dass Informationen aus den Rohdaten auch für die Dateninversion nutzbar gemacht werden. Das Softwaremodul für die Datenfilterung macht sich seinerseits die Besonderheit des an der Geologischen Bundesanstalt entwickelten geoelektrischen Messsystems Geomon4D zunutze, bei dem alle Einzelwerte eines Messpunktes (gesampelte Messwerte über Messperiode) aufgezeichnet werden. Übliche kommerzielle Systeme liefern lediglich einen einzelnen Wert pro Messpunkt, der den Mittelwert aus den gemessenen Samples darstellt. Genau in den Samples an sich stecken aber wichtige Information über die Datenqualität. Da es unmöglich ist die Gesamtheit der aufgezeichneten Samples pro Messung (4300 Messpunkte zu je 600 Samples) einzeln zu analysieren, werden statistische Kenngrößen zu den einzelnen Messpunkten auf Basis einer Sampleanalyse berechnet. Diese kondensierte Information zur Datenqualität stellt die Grundlage für die entsprechenden Filteroperationen dar. Die Filteroptionen sind sehr vielfältig und können separat für jeden verfügbaren Datensatz manuell angepasst werden. Im Folgenden werden die verfügbaren Filteroperationen anhand von ein paar exemplarischen Beispielen beschrieben.

Den ersten Schritt der Datenfilterung bildet eine einfache Grenzwertfilterung, die im Zuge des Dateneinlesens in der Software umgesetzt wird. Hierbei ist vor allem entscheidend, dass durch

die berechneten statistischen Kenngrößen zu jedem einzelnen Messpunkt eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter für die Filterung verfügbar ist, was ein optimales Filterergebnis gewährleistet. Abb. 2 zeigt das entsprechende Eingabefenster in dem die unterschiedlichen Grenzwerte für die Filterung eingestellt werden können. Diese Parameter reichen von den direkt gemessenen elektrischen Spannungen („Uf“ und „Ur“) über den eingespeisten elektrischen Strom („Cf“ und „Cr“) bis zu den Standardabweichungen einzelner Parameter. Des Weiteren ist ein Signal-Rauschverhältnis definiert, das die Qualität des einzelnen Messpunktes wiedergibt.

	Min.	Max.
- Uf	-50	50
- Ur	-50	50
- Uf-Ur	0.0001	1000
- Cf	0.0005	50
- Cr	0.0005	50
- Cf-Cr	0	1000
- Resis.	0.0001	100
- SP	-2	2
- App. R.	0.0003	1e+006
- S Dev. (R)	0	100
- S/N Ratio	0.05	1e+035
- S Dev. (C)	0	100
- S Dev. (Uf)	0	200
- S Dev. (Ur)	0	200
- Slope (Uf)	0	1000
- Slope (Ur)	-1000	1000

Abb. 2: Parameter für die Grenzwertfilterung

Nach dem Dateneinlesen und der entsprechenden Grenzwertfilterung erfolgt im nächsten Schritt eine Analyse der einzelnen Elektrodenpositionen hinsichtlich der Datenqualität. Dies kann anhand der Betrachtung der Standardabweichung des berechneten elektr. Widerstandes oder anhand der Steigung der gemessenen elektr. Spannung erfolgen. Hier wird jeweils der Medianwert des gesamten Datensatzes mit dem Medianwert der Messpunkte jeder einzelnen Elektrode verglichen. Eine entsprechend hohe Abweichung zwischen den Medianwerten kann als Hinweis für eine nicht funktionierende Elektrode gewertet werden. Um nicht zu sensibel auf bestimmte Schwankungen der Datenqualität entlang des Profils zu sein, ist hier

standardmäßig als Grenzwert das 5fache vom Gesamtmedianwert eingestellt – dies lässt sich natürlich individuell einstellen und muss hin und wieder (zum Teil je nach genereller Datenqualität) angepasst werden. Die Darstellung dieser Filteroption zu den vier Elektroden der 4-Punktanrdnung (A-B, M-N) wird in Abb. 3 gezeigt. Die dünne schwarze horizontale Linie in den Diagrammen deutet den entsprechenden Medianwert für den gesamten Datensatz an. Überschreitet der berechnete Wert zu den einzelnen Elektroden diesen Wert um das entsprechend eingestellte Vielfache wird die Elektrode für das Löschen empfohlen (schwarz dargestellt). Nun liegt es im Ermessen des Benutzers, ob die zu Eliminierung Empfohlenen Datenpunkte tatsächlich gelöscht werden oder nicht. Die Filterung selber kann in mehreren Schritten erfolgen, da nach deren Anwendung immer eine Neuberechnung der Medianwerte (entsprechend den noch verfügbaren Datenpunkten) erfolgt.

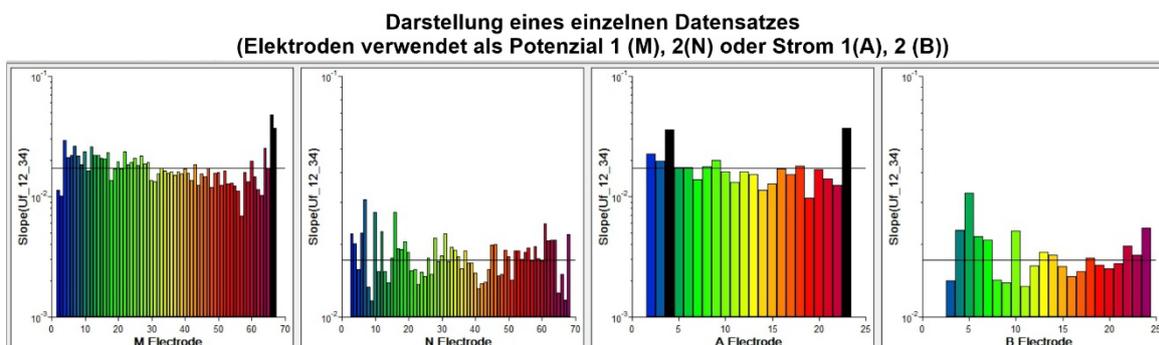


Abb. 3: Darstellung der Elektrodenfilterung für einen einzelnen Datensatz; die einzelnen Diagramme stellen von links nach rechts die Betrachtung für die Elektroden M, N, A und B dar, die jeweilige schwarze horizontale Linie entspricht dem Medianwert des gesamten Datensatzes; zu filternde Elektroden werden als schwarze Balken dargestellt

Im nächsten Schritt der Datenfilterung wird der Fokus auf noch immer im Datensatz vorhandene „ungewöhnliche“ Datenpunkte gelegt. Hier erfolgt die endgültige Bestimmung dieser Punkte in einem dreistufigen Verfahren, dass die Häufigkeitsverteilungen des Datensatzes hinsichtlich scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand, des Signal-Rauschverhältnisses und der Standardabweichung des Widerstandes analysiert. Die genaue Vorgehensweise bei der Filterung wird in Abb. 4 dargestellt. Als erstes werden anhand der Häufigkeitsverteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes ungewöhnlich hohe bzw. niedrige Werte (± 2 *Standardabweichung) des Datensatzes als genauer zu betrachtende Datenpunkte definiert. Im nächsten Schritt wird kontrolliert, in welchem Bereich der Häufigkeitsverteilungen des Signal-Rauschverhältnisses und der Standardabweichung des Widerstandes diese Datenpunkte liegen. Befinden sie sich in diesen Häufigkeitsverteilungen außerhalb der jeweiligen Standardabweichung ($\pm\sigma$) werden diese Datenpunkte aus dem Datensatz herausgefiltert. In diesem letzten Schritt lässt sich das Filterkriterium insofern definieren, dass die zu filternden Datenpunkte nur in jeweils einer dieser Häufigkeitsverteilungen außerhalb der Standardabweichung liegen müssen oder in beiden. Wenn gewünscht, kann auch nur eine Häufigkeitsverteilung (Signal-Rauschverhältnis

oder Standardabweichung des Widerstandes) für diese Filterung als Kriterium herangezogen werden. Diese mehrstufige Bewertung gewährleistet ein optimales Filterergebnis.

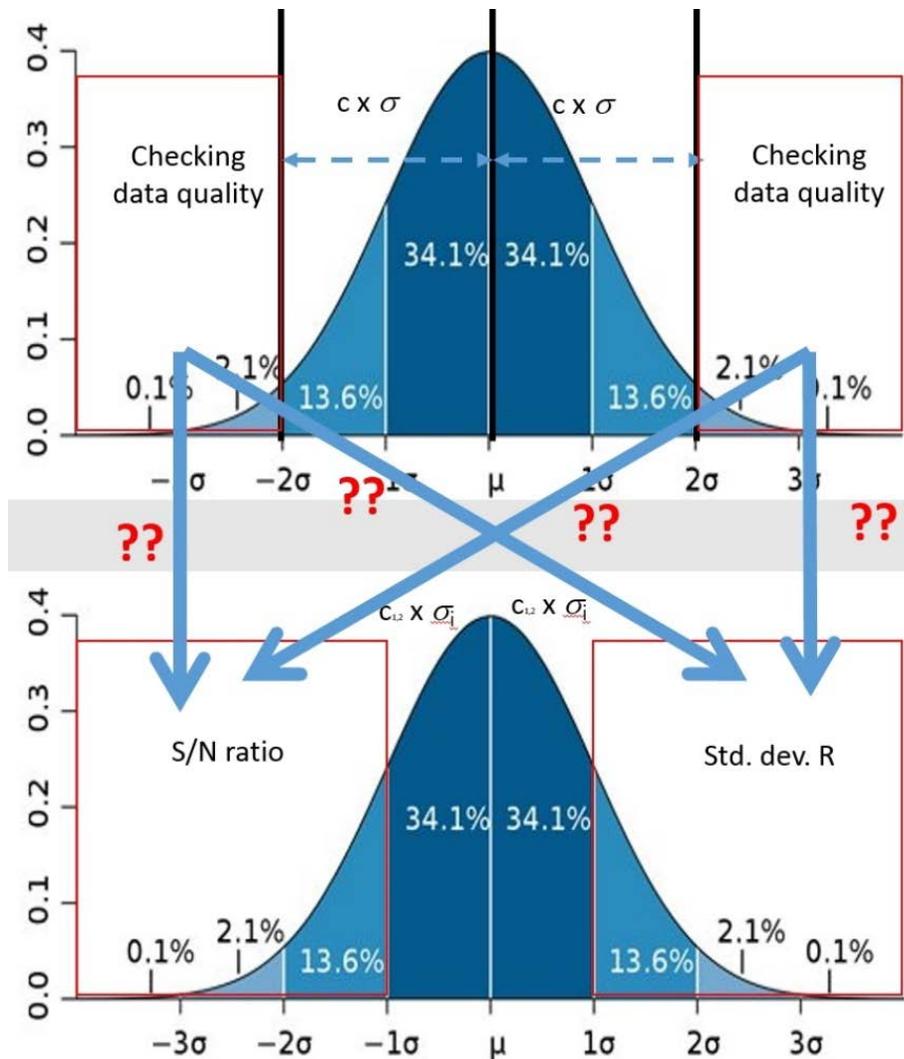


Abb. 4: Schematische Darstellung der Vorgangsweise bei der Filterung ungewöhnlicher Datenpunkte eines Datensatzes; oben: Häufigkeitsverteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes mit dem Hinweis (rot umrandeter Bereich) welche Datenpunkte der genaueren Betrachtung unterzogen werden; unten: Häufigkeitsverteilungen von Signal-Rauschverhältnis (links) und Standardabweichung vom Widerstand (rechts) mit Hinweis auf den Bereich außerhalb der jeweiligen Standardabweichung (rot umrandeter Bereich)

Im Großen und Ganzen wurden hier nur die Filtermethoden, die sich in mehr oder weniger automatischer Weise anwenden lassen beschrieben. Es bestehen natürlich noch diverse Möglichkeiten in der Software auf manuelle Weise Daten zu eliminieren. Dies erfolgt anhand sogenannter „Cross-Plots“, wo nach Belieben die aus den Samples berechneten Parameter in Form von Punktwolkendiagrammen zueinander in Relation gestellt werden können. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 5 dargestellt. Anhand dieser Diagramme können Besonderheiten

einzelner Datenpunkte bzw. Datenpunktgruppen erkannt werden und nach entsprechender Bewertung können hier einzelne Datenpunkte bzw. Punktgruppen individuell gefiltert werden. Diese Filteroption stellt natürlich einen völlig subjektiven Vorgang dar und Bedarf natürlich der entsprechenden Erfahrung um die Plausibilität der einzelnen Datenpunkte in den Datenpunktverteilungen korrekt einschätzen zu können.

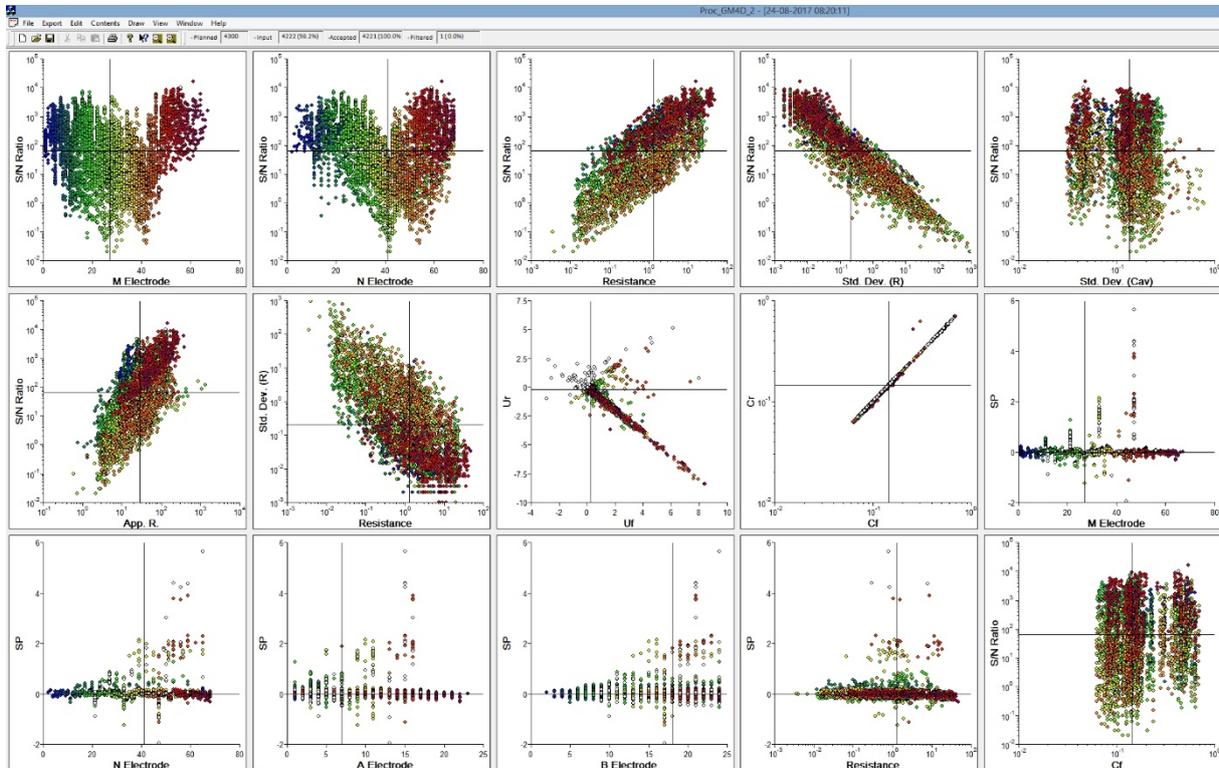


Abb. 5: Exemplarische Darstellung einer beliebigen Anzahl der sogenannten „Cross-Plots“, die jeweils zueinander dargestellten Parameter sind der Achsenbeschriftung zu entnehmen, Datenpunkte, die weiß (mit schwarzer Umrandung) erscheinen wurden bereits im Zuge vorangegangener Filteroptionen gefiltert

Nachdem all diese Filteroperationen durchgeführt wurden, wird der Datensatz schlussendlich der Inversion zugeführt, woraufhin nach Bedarf eine sogenannte rms-error-Datenreduktion erfolgen kann.

Auch wenn für die Inversion ein anderes Softwarepaket zum Einsatz kommt, wird die Betrachtung der jeweiligen Daten mit der Eigenentwicklung Proc_Geomon4D_2 durchgeführt, da diese umfangreichen Filtermöglichkeiten vorliegen. Der entsprechend gefilterte Datensatz kann anschließend für die Inversion in anderen Softwarepaketen im gewünschten Datenformat exportiert werden. Nach einem Vergleich der Inversionsergebnisse wird eine optimale Filterstrategie (nur rms-Datenreduktion oder Einbindung entsprechender Filteroptionen der Proc_Geomon4D_2 Software) für die Daten gewählt.

2.2 Profile Achau 2, 3, 4

Die hier präsentierten Messergebnisse erfolgen in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Geothermie der FA Hydrologie und Geothermie der GBA im Rahmen von Testmessungen für Thermalwasservorkommen im Raum Achau.

Das Untersuchungsgebiet liegt auf dem Laxenburger Hoch, auf der sogenannten Hochscholle des südlichen Wiener Beckens. Von der Fachabteilung Hydrogeologie und Geothermie der GBA wird an der Erstellung eines stratigrafischen Konzepts gearbeitet. Als Reservoir dieses hydrothermalen Vorkommens wurde der Leithakalk identifiziert. Neben der hydraulischen und thermischen Bewertung des Leithakalks steht auch die Frage seiner Tiefenlage im Raum. Um diese Tiefenlage mittels Geoelektrik zu bestimmen, wurden insgesamt drei geoelektrische Profile mit einer Länge von jeweils knapp zwei Kilometern aufgenommen (siehe Abbildung 6), welche Daten zur Bestimmung der Tiefe des Leithakalks liefern sollen.

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 1, Messgebiet 1) liegt südlich von Wien und ist, wie bereits erwähnt, durch umfangreiche anthropogene Einbauten geprägt. Neben der nahen L16 (Ödenburger Strasse) befinden sich 220kV Hochspannungsleitungen und Gasleitungen im Messgebiet. Außerdem verläuft unmittelbar (N-S verlaufend) parallel zu Profil 2 und in ca. 500 m Entfernung zu Profil 3 die Pottendorfer Linie zwischen Wiener Neustadt und Wien Meidling.

Unter diesem Aspekt der anthropogenen Beeinflussung bezüglich möglicher elektrischer Störeinflüsse ist auch die Datenqualität der einzelnen Profile zu beurteilen. So waren bei allen Profilen deutliche 50 Hz und 16 2/3 Hz (Bahn) Einstreuungen festzustellen.

2.2.1. Geoelektrik

Details zu den geoelektrischen Profilen sind in der nachfolgenden Tabelle 2 angegeben. Die Lage der Profile auf der topographischen Karte zeigen die Abb. 6 und 7.

Geoelektrikprofil	Datum	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	max. Eindringtiefe [m]	Messrichtung
Profil 2	02.05.2018	20	1840	384	N-S
Profil 3	14.06.2018	20	1840	384	N-S
Profil 4	15.11.2018	20	1840	384	N-S

Tab. 2.: Spezifikation der Geoelektrikprofile Achau

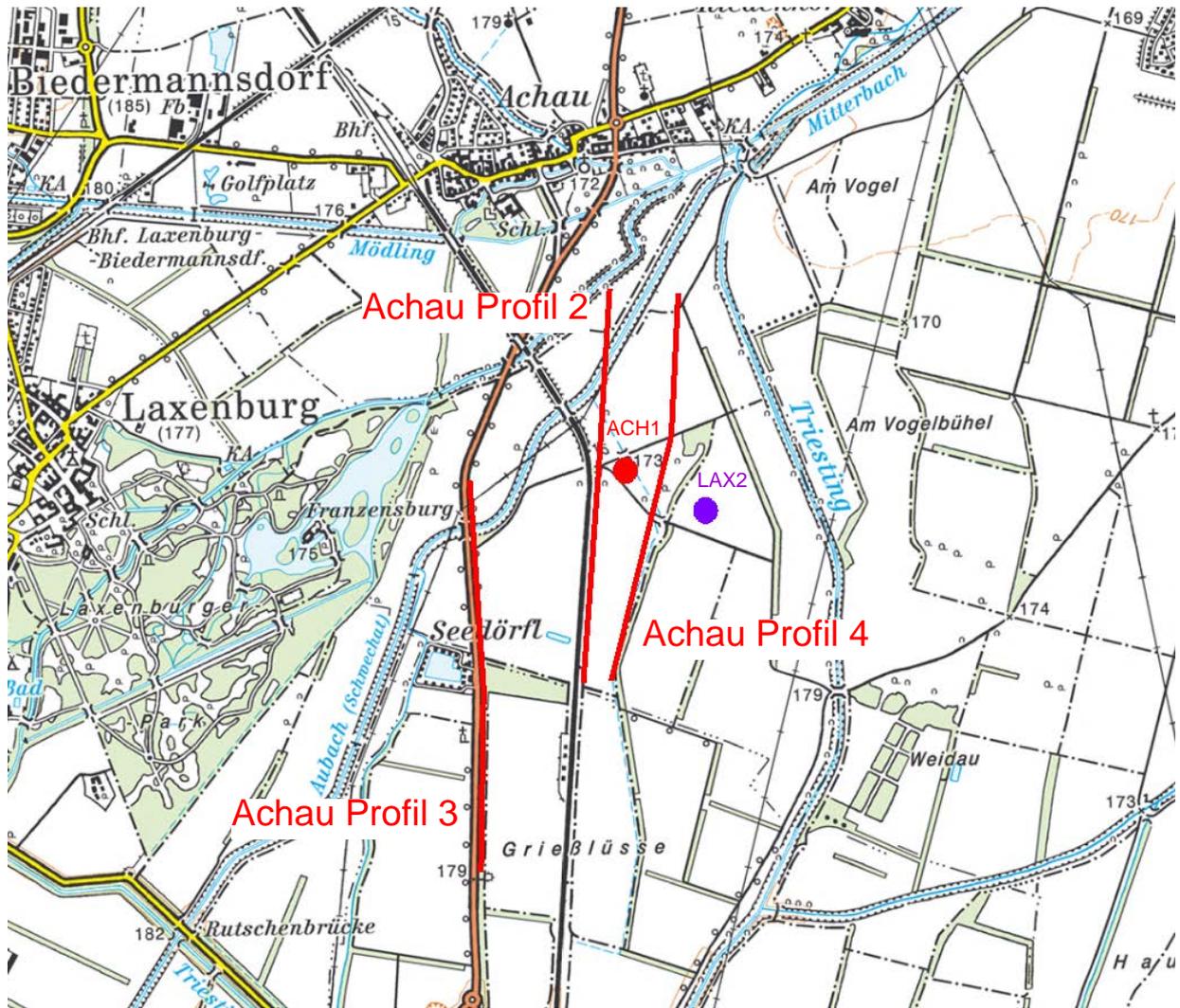


Abb. 6: Lage der geoelektrischen Profile Achau 2, 3, 4 (Karte AMap)

Lage der Bohrung ACH1 ● und LAX2 ●

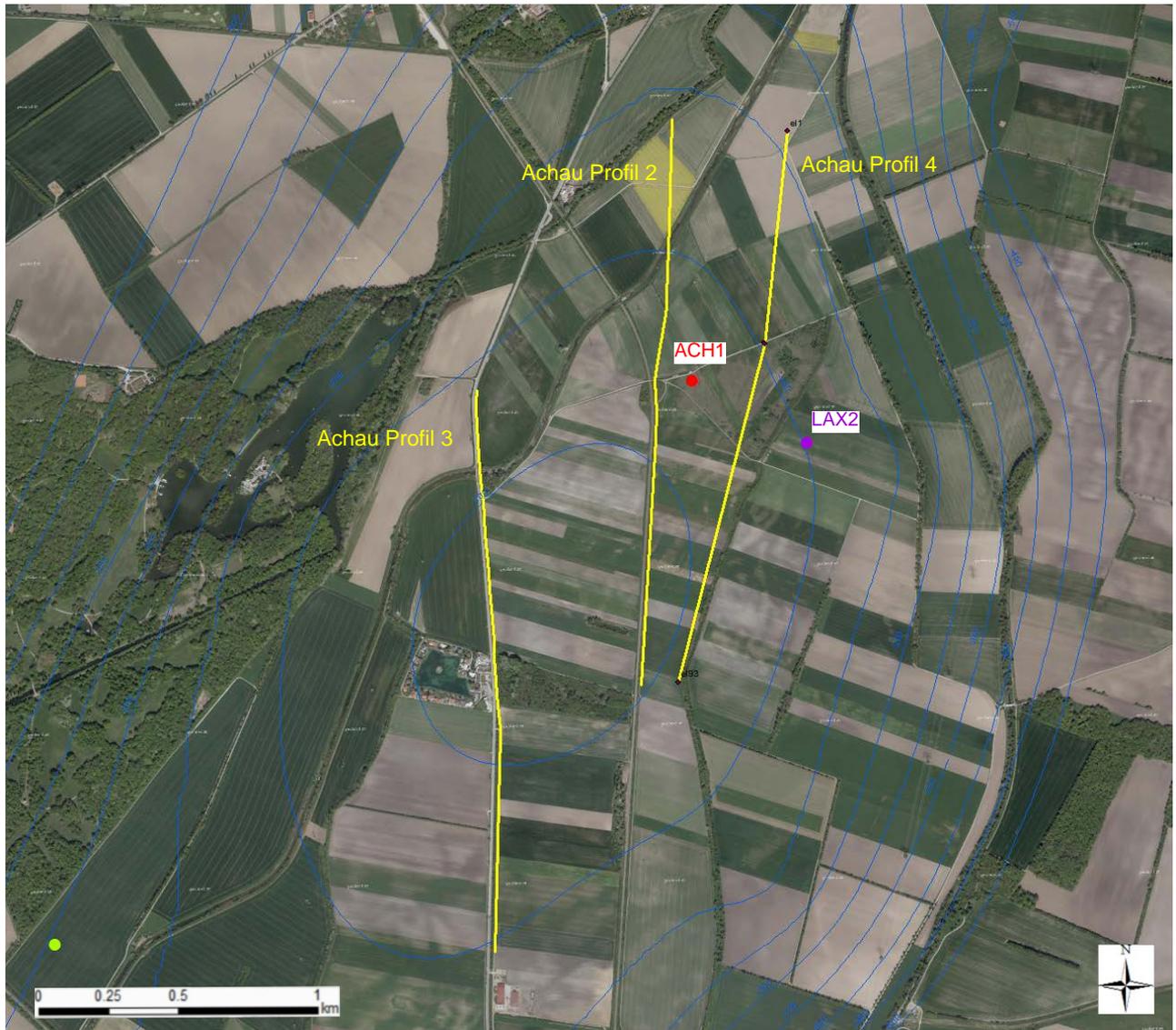
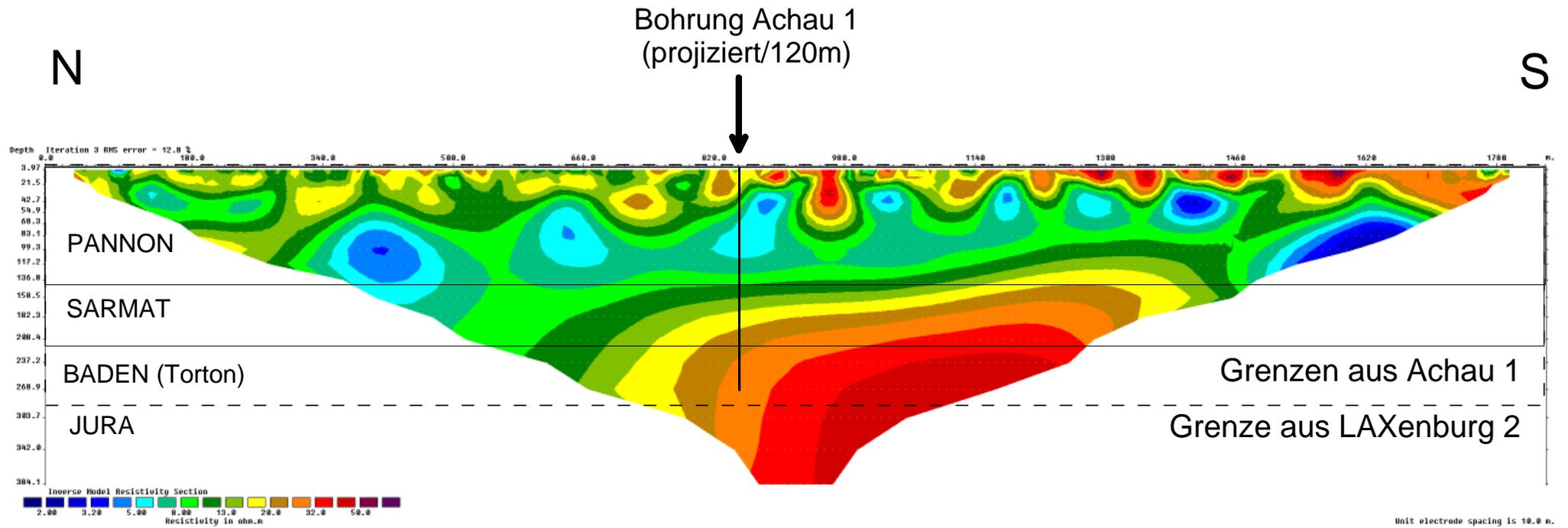


Abb. 7: Lage der Geoelektrikprofile Achau, 1, 2, 3, Lage der Bohrung ACH1 ● und LAX2 ●

(Karte Google Maps), Isolinien entsprechen der Tiefe des tertiären Untergrundes nach KRÖLL & WESELY (1993), Farbpunkte zeigen die Lage der Bohrungen.

Achau Profil 2

Das erste vermessene Profil wurde möglichst nahe der Bohrung Achau 1 gelegt. Das Ergebnis der Inversion ist in Abb. 8 dargestellt. Zusätzlich sind die aus der Bohrung Achau 2 entnommenen Schichtgrenzen (Pannon/Sarmat/Torton (Baden) aus der Bohrung Achau 1 und Baden (Torton)/Jura aus Bohrung Laxenburg 2) eingezeichnet. Die Bohrbeschreibungen der Schichtfolgen deuten auf sehr ähnliche lithologische Verhältnisse der einzelnen Schichtfolgen hin (v.a. als Tonmergel beschrieben). Die Unterkante Pannon zeichnet sich aber deutlich als Schicht mit dem geringsten elektr. Widerstand ab. V.a. die Schichtgrenze Pannon/Sarmat in 145 m ist gut zu erkennen, die weiteren Grenze Sarmat/Torton in 215 m und die aus der Bohrung Laxenburg 2 entnommene Grenze zum Jura in 290 m Tiefe ist durch die sehr flachen Gradienten des elektr. Widerstandes nicht deutlich zu erkennen. Die Schichtgrenze Baden (Torton) zu Jura liegt bei Laxenburg 2 in 290 m Tiefe. Laut Untergrundkarte des Wr. Beckens zeigt das Relief eigentlich einen ca. 50 m Anstieg der Basis, der aber durch die Tatsache, dass bei der Bohrung Achau 1 noch in 270 m warmes Wasser aus dem Baden (Torton) angetroffen wurde, relativiert wird. Aus den Ergebnissen könnte man ein Einfallen der Schichten gegen Norden interpretieren, welcher auch durch einen Anstieg der Basis der tertiären Bedeckung Richtung Süd (Südwesten) in der Untergrundkarte ersichtlich ist.



Achau Profil 2

Abb. 8: Inversionsergebnis für Achau Profil 2

Achau Profil 3

Die ersten Auswertungen von Profil Achau 3 ergaben zunächst relativ schlüssig zu interpretierende Ergebnisse. Nach eingehenden Analysen der einzelnen Samples musste aber festgestellt werden, dass eine Stromplatte defekt war und die Daten sich nach umfangreichen Qualitätschecks und Auswerterversuchen als leider nicht sinnvoll verwertbar herausgestellt haben. Der Qualitätscheck beruht auf der Betrachtung berechneter (statistischer) Parameter aus den einzelnen Samples (600 an der Zahl pro Messpunkt). Abb. 9 zeigt als Beispiel einerseits die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Messpunkte zu unterschiedlichen Parametern und andererseits sogenannte Crossplots verschiedener Parameter, die entsprechende Abhängigkeiten und Korrelationen widerspiegeln und so eine Bewertung der Datenqualität ermöglichen. Die beiden roten Kreise in Abb. 9 deuten auf die Messkombinationen, bei denen ein Strom von 1.2 Ampere eingespeist wurde, hin. Dies entspricht dem maximalen Strom, den das Messgerät liefern kann. Da bei den restlichen Messkombinationen deutlich geringere elektrische Ströme beobachtet wurden, liegt der Schluss nahe, dass es sich hier um eine Fehlfunktion handelt. Eine schlussendliche Bestätigung dieser Annahme erfolgte durch die Betrachtung des LOG-Files (Textfile in der der komplette Messablauf aufgezeichnet wird), wo klar ein schadhaftes Relais identifiziert werden konnte. Das Problem bei dieser Fehlfunktion ist, dass nicht nur Messkombinationen, die direkt mit dem schadhaften Relais zu tun haben, unbrauchbar sind, sondern auch ein nicht verifizierbarer Einfluss auf den Rest der Messkombinationen besteht. Dadurch kann der Datensatz für die Verarbeitung schlichtweg nicht verwendet werden.

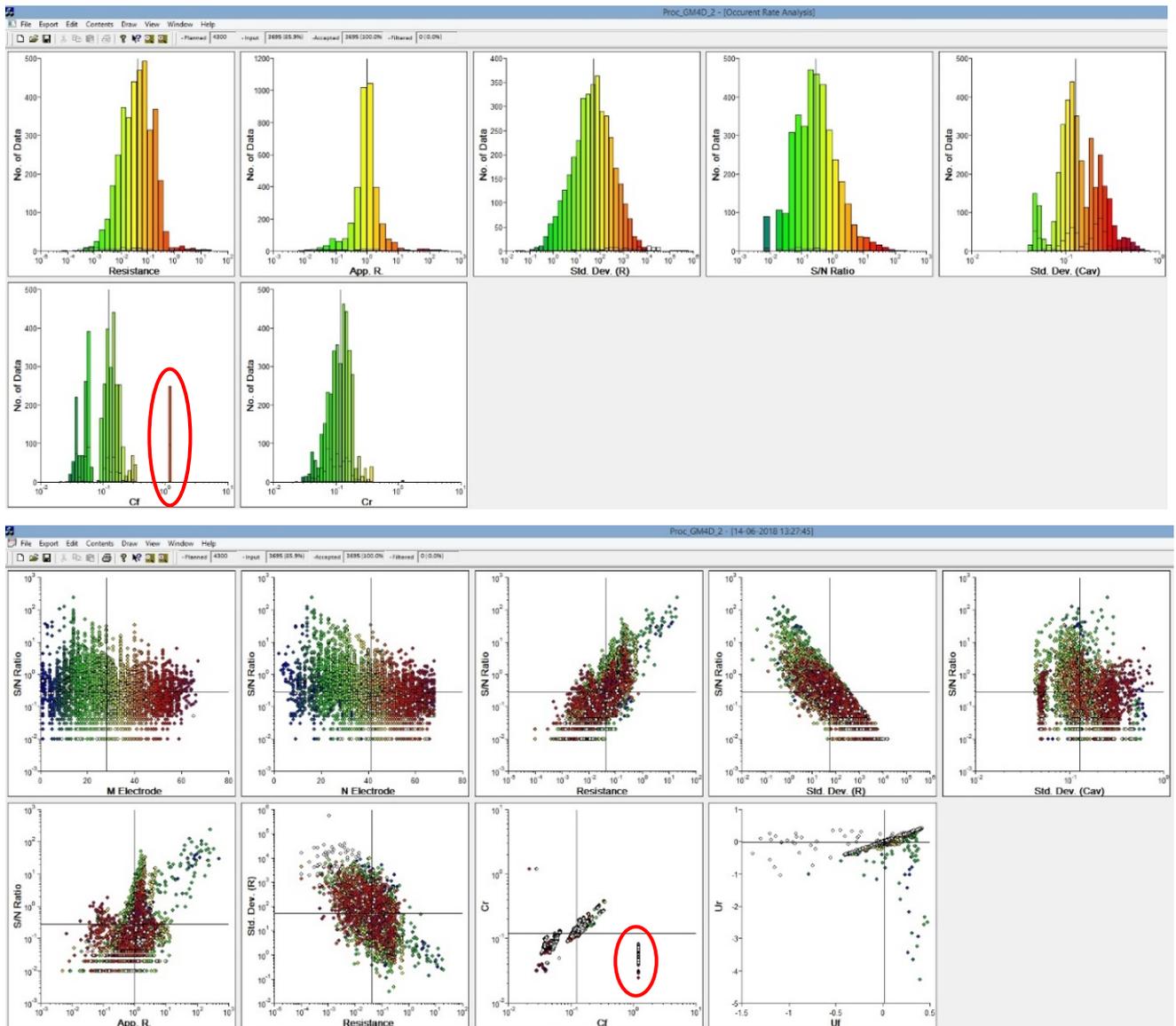


Abb. 9: Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Messpunkte zu unterschiedlichen Parametern (oben), sogenannte Crossplots zu verschiedenen Parameter (unten), in Rot eingekreister Bereich markiert Messpunkte, die auf das fehlerhafte Relais zurückzuführen sind.

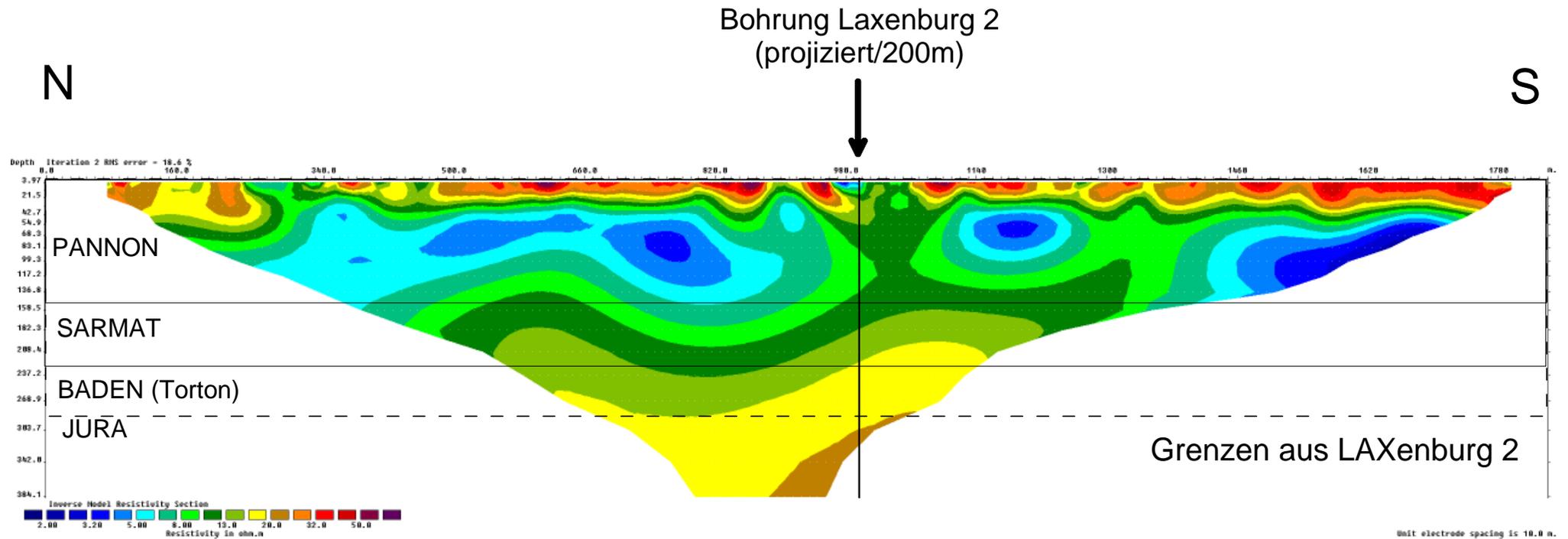
Achau Profil 4

Die Resultate für Geoelektrik Profil Achau 4 sind im Prinzip ähnlich zu den Ergebnissen für Profil 2. Ein Unterschied besteht in der Tatsache, dass bei Profil 4 die elektr. Widerstände in der Tiefe noch ein wenig niedriger sind als bei Profil 2. Allerdings liegen die Schichtgrenzen (aus Bohrung Laxenburg 2 entnommen, die ca. 200 m östlich vom Profil 4 liegt) auch ein wenig tiefer als bei der Bohrung Achau 1. Ebenfalls wurden hier die aus den Bohrungen entnommenen Schichtgrenzen eingezeichnet (siehe Abb. 10).

2.2.3. Resümee

Die in dem Untersuchungsgebiet zahlreich vorkommenden anthropogene Störeinflüsse (v.a., z.B. Bahn, Stromleitungen, Gasleitungen etc.) stellen einen limitierenden Faktor hinsichtlich der Datenqualität bei geoelektrischen Messungen dar, was z.T. auch zu Einschränkungen bei der Eindringtiefe durch den Wegfall von verrauschten Datenpunkten, die durch ihre großen Dipolabstände besonders anfällig für Störsignale sind, geführt hat. Des Weiteren wurde nach einer intensiven Qualitätskontrolle festgestellt, dass bei Profil 3, welches bei der ersten Auswertung ein auf den ersten Blick „vernünftiges“ Ergebnis geliefert hat, das Messgerät einen Defekt in einer der beiden Stromplatten aufgewiesen hat und schlussendlich die Ergebnisse verworfen werden mussten.

Bei der Auswertung der Profile Achau 2 und 4 konnte der aus den Bohrungen Achau 1 und Laxenburg 2 ersichtliche Schichtaufbau grundsätzlich nachvollzogen werden. Erkennbar war der doch durchwegs geringe elektr. Widerstand ($< 50 \text{ Ohmm}$). Bei den detaillierten Bohrbeschreibungen von Achau 1 werden die einzelnen Schichtfolgen sehr oft als mergelig bzw. als Tonmergel angesprochen und weisen daher auch lithologisch keine großen Differenzierungen auf. Es sind auch keine ausgeprägten Kontraste des elektr. Widerstandes zu erkennen, wodurch als Konsequenz auch ein sehr flacher Gradient des elektr. Widerstandes mit der Tiefe besteht. Auch aus diesem Grund wäre eine noch größere Eindringtiefe notwendig, um die entsprechenden Tiefenlagen auch des Beckenuntergrundes ausreichend miterfassen zu können. Bei den hier vorliegenden Teufenverhältnissen war dies nicht möglich. Außerdem hat sich gezeigt, dass durch die, v.a. laterale Auflösung in größeren Tiefen deutlich längere Profile nötig wären, um Strukturen über längere Strecken verfolgen zu können.



Achau Profil 4

Abb. 10: Inversionsergebnis für Achau Profil

2.3 Profil Bruckneudorf

Das hier präsentierte Ergebnis des geoelektrischen Profils Bruckneudorf BN_P_20_tief wurde als zusätzliche Ergänzung zu einem bereits bestehenden Profil (BN_P_20) gemessen. Tab. 3 gibt die Spezifikationen der beiden Profile wieder. Abb. 11 zeigt die Lage der beiden Profile.

Geoelektrikprofil	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	Messrichtung	Max. Eindringtiefe [m]
Profil Bruckneudorf BN_P20_tief	20	1680	NW-SE	350

Tab. 3: Spezifikation des Geoelektrikprofils Bruckneudorf (Bgl.d.)

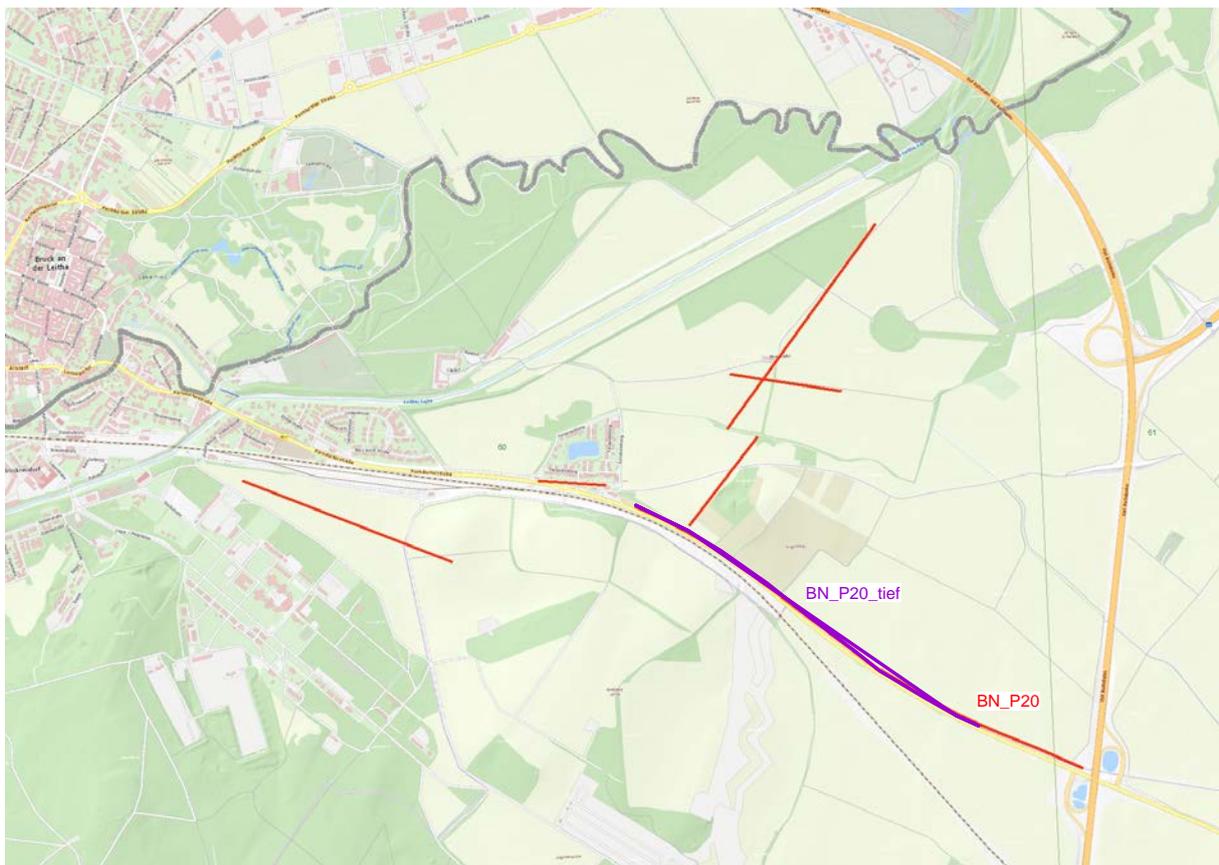


Abb. 11: Lage der geoelektrischen Profile BN_20_P und BN_P_20_tief (mit zusätzlichen benachbarten Geoelektrikprofilen) (Ausschnitt aus Datenbank Geophysis, Kartengrundlage: Geoland).

Abb. 12 zeigt die Lage (Nummerierung CP xx) der Bohrungen im Messgebiet Bruckneudorf aus der Karte der Basis der tertiären Beckenfüllung (Kröll, Wessely, 1993). Die Zahlen bei den Bohrungen haben folgende Bedeutung: Oben: absolute Höhe der Geländeoberkante [m], Mitte: absolute Höhe des Grundgebirges/Basis der tertiären Bedeckung über N.N [m], Unten: Tiefe bis zum Grundgebirge/Basis der tertiären Bedeckung [m].

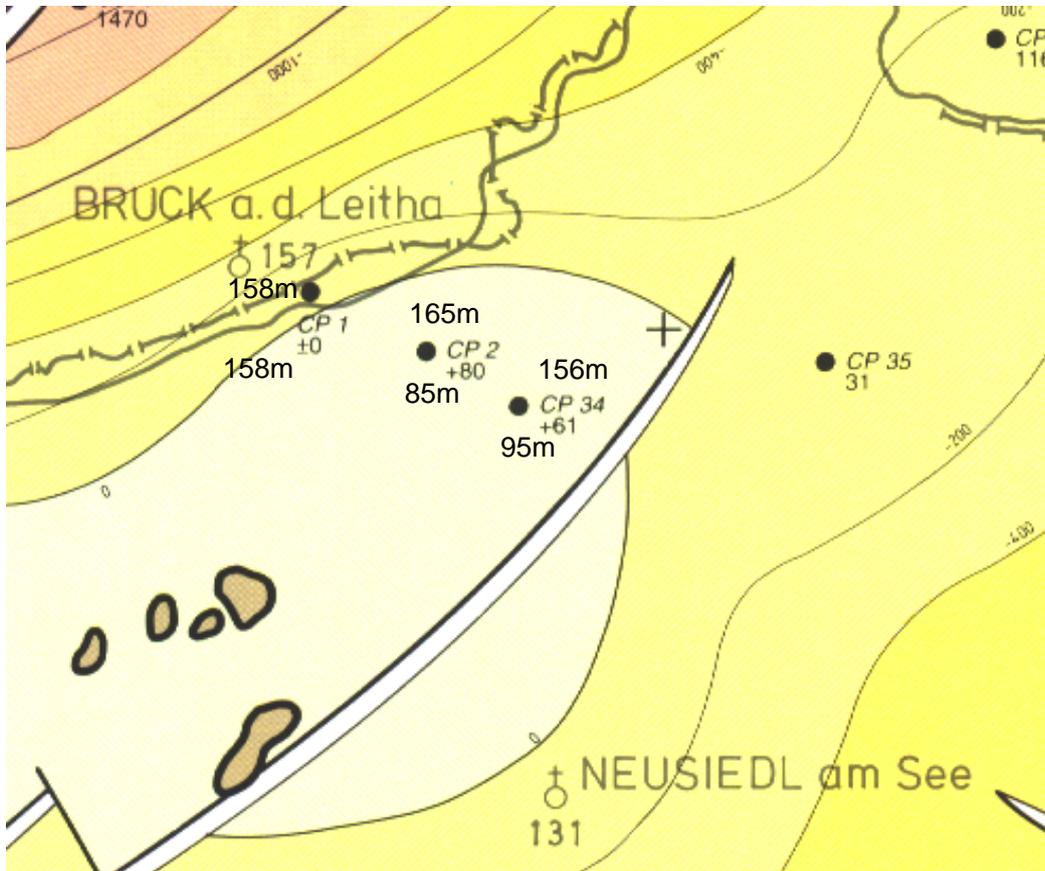


Abb. 12: Lage der Bohrungen im Messgebiet und entsprechende Informationen zur Tiefe des Grundgebirges/Basis der tertiären Bedeckung aus den (Ausschnitt aus Kröll, Arthur; Wessely, Godfrid: Wiener Becken und angrenzende Gebiete: Strukturkarte - Basis der tertiären Beckenfüllung 1:200.000, 1993, GBA, Wien)

In den Abbildungen 13 und 14 sind Qualitätsparameter der Messwerte abgebildet. Abb. 13 gibt einen Überblick über die Messdaten bzw. der mit der mittels automatischer Spikefilterung und dem Ausschluss negativer Messdaten entfernten Daten. Man erkennt, dass nur wenige Messpunkte wegfallen. Abb. 14 zeigt die Messparameter Spannung [mV] und Strom [mA]. Die Werte der Stromeinspeisung sind absolut ausreichend (> 180 mA), die Werte der gemessenen Spannung liegen in einem brauchbaren Wertebereich. Somit kann die Datenqualität als sehr gut bezeichnet werden.

In Abb. 15 ist das Inversionsergebnis des geoelektrischen Profils Bruckneudorf BN_P_20_tief dargestellt. Die projizierte Lage der Bohrung CP 4 und die Tiefe zum Grundgebirge ist ebenfalls eingetragen. Die höherohmigen Bereiche im Liegenden stellen somit das kristalline Grundgebirge dar. Die hangenden niederohmigen Abschnitte sind der tertiären Beckenfüllung (größtenteils Pannon) hauptsächlich aus Schluff/Ton bestehend, zuzuordnen.

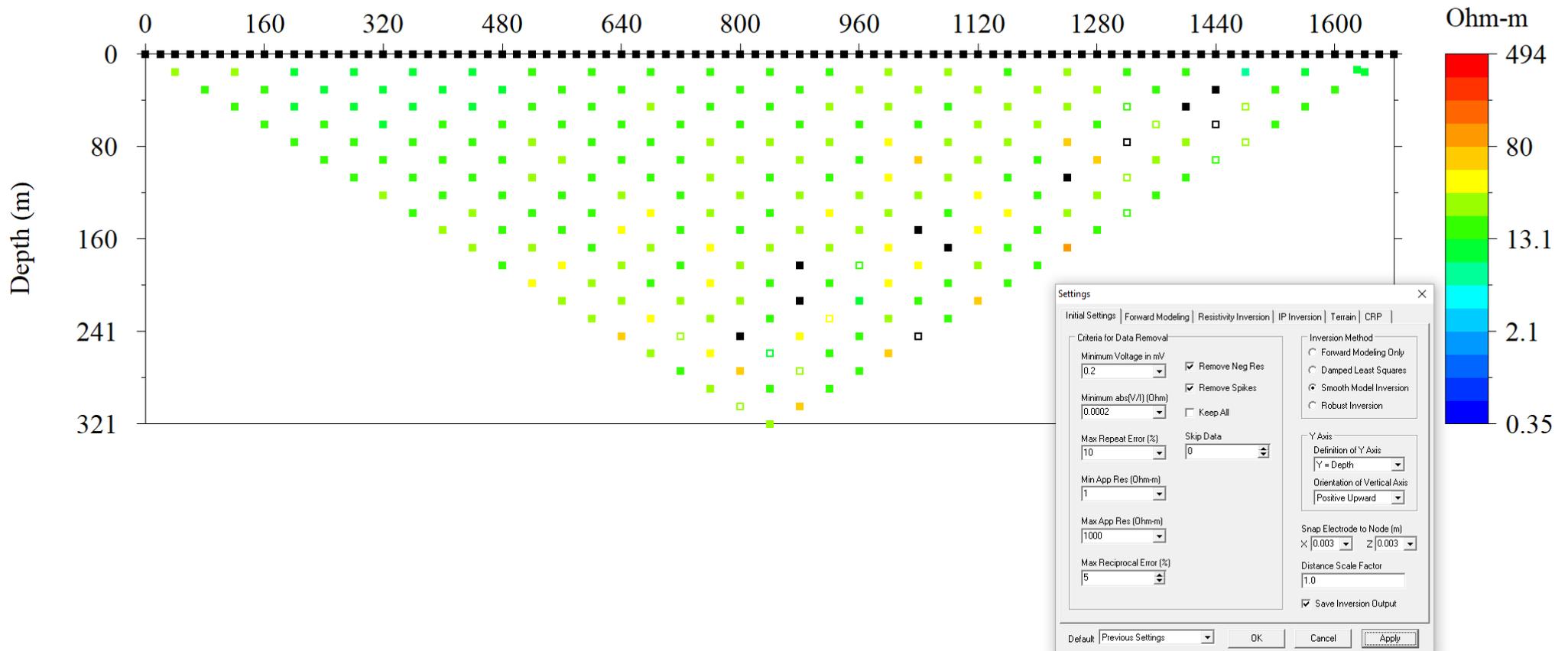


Abb. 13: Ergebnis der automatisierten Datenqualitätsanalyse (Programm EarthImager 2D, vers. 2.4.1., Advanced Geoscience Inc., USA), Spikefilterung und Entfernung negativer Messdaten

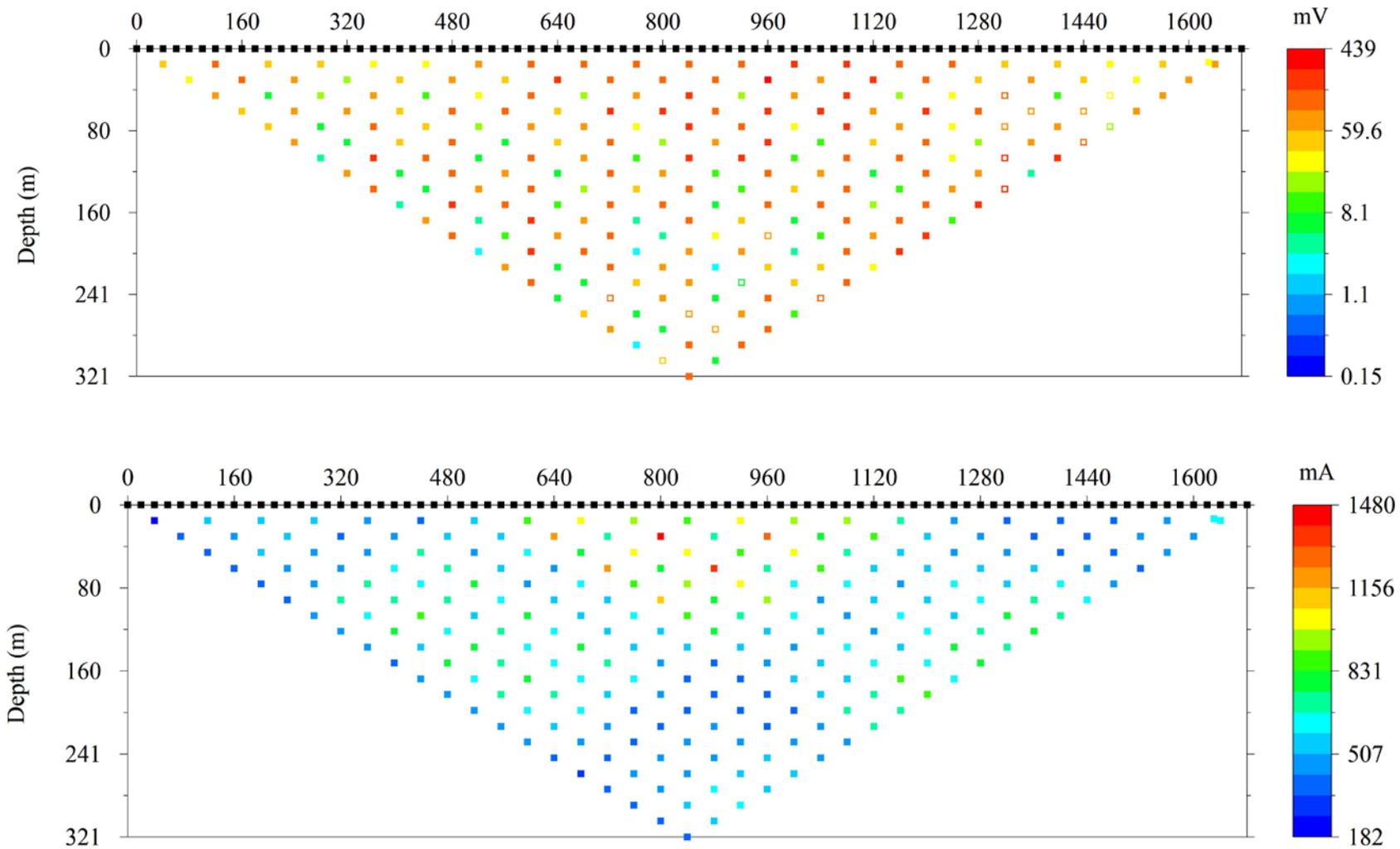


Abb. 14: Darstellung der gemessenen Spannungswerte [mV] – oben und der eingespeisten Stromstärke [mA] - unten

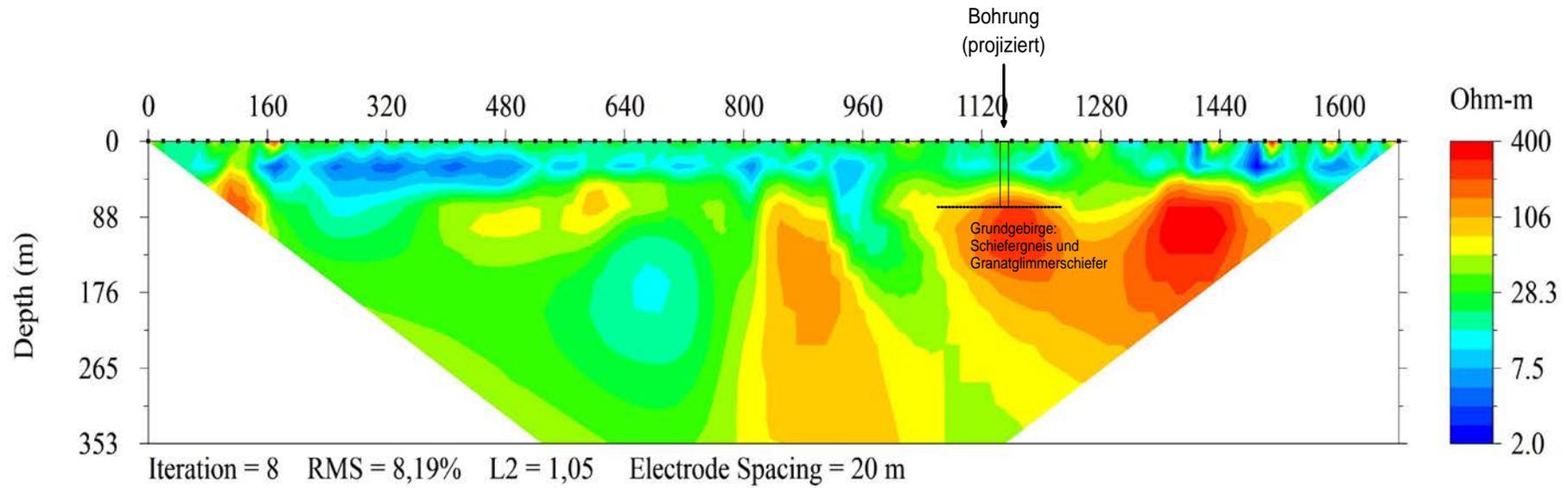


Abb. 15: Ergebnis des Geoelektrikprofils Bruckneudorf BN_P_20_tief.

2.4 Profil Neusiedl am See

Das Profil Neusiedl am See mit der Bezeichnung N_P_20_tief wurde als Vergleichsprofil für ein bereits bestehendes Profil nördlich von Neusiedl am See vermessen (Lage der Profile siehe Abb. 16). Ziel war es, tieferliegende Strukturen im Bereich der Hanftalstörung aufzulösen. Tab. 4 zeigt die Spezifikationen für die Profile.

Geoelektrikprofil	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	Messrichtung	Max. Eindringtiefe [m]
Profil Neusiedl am See N_P_20_tief	20	1840	SW-NE	387
Profil Neusiedl am See N_P_20	10	1400	SW-NE	190

Tabelle 4: Spezifikation des Geoelektrikprofils Neusiedl am See (BglD.)

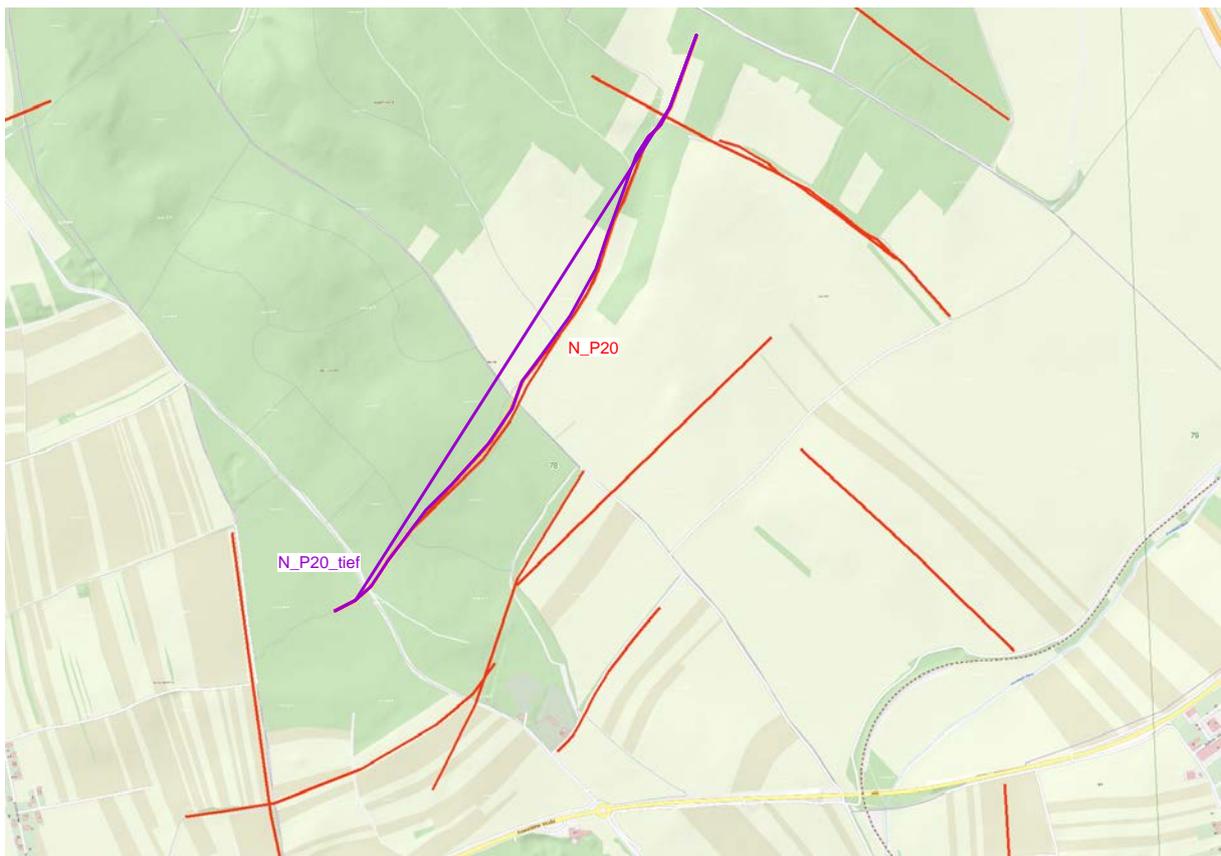


Abb. 16: Lage der geoelektrischen Profile N_20_P und N_P_20_tief (mit zusätzlichen benachbarten Geoelektrikprofilen) (Ausschnitt aus Datenbank Geophysis, Kartengrundlage: Geoland).

Das Profil N_P_20_tief wurde mit einer größeren Auslagenlänge (1840 m) als Profil N_P_20 vermessen. Die Analyse der Qualitätsparameter (Strom/Spannung, Spikes, negative Daten) zeigt (siehe Abb. 17), dass nach den gewählten Qualitätskriterien nur einige wenige Messpunkte (Summe aller gemessenen Messpunkte ist 4300) wegfallen und die Datenqualität dementsprechend als sehr gut zu bezeichnen ist.

Die Zweiteilung der Widerstandsverteilung in eine niederohmige ($< 50 \Omega\text{m}$) Sequenz im Hangenden und in einen höherohmigen Abschnitt im Liegenden (100 bis 200 Ωm) wird damit bestätigt (siehe Abb. 18.) Die reliefierte Oberkante des höherohmigen Widerstandkörpers im Liegenden (grüner Farbton) wird auf interne, strukturektonische Phänomene (Störungen/Brüche/Versetzungen) zurückgeführt. Die Mächtigkeit der niederohmigeren Sequenz im Hangenden variiert zwischen 80 und 150 Meter (Profilmeter 800 bis 900). Dieser niederohmige Bereich (40 bis 80 Ωm) im Hangenden wird als feinklastische Ablagerung mit wechselndem Gehalt an Feinsand, Schluff und Ton angesprochen.

Abb. 19 zeigt nochmals das Ergebnis von Profil „Neusiedl am See N_P_20_tief“ in einer anderen Farbdarstellung und mit benachbarten Messprofilen. Durch die tiefere Erfassung des Untergrundes ist nun eine eindeutigere Interpretation der geologischen Gesamtsituation im Hinblick auf die Lage des kristallinen Grundgebirges möglich.

Scatter Plot of Surface Apparent Resistivity Data

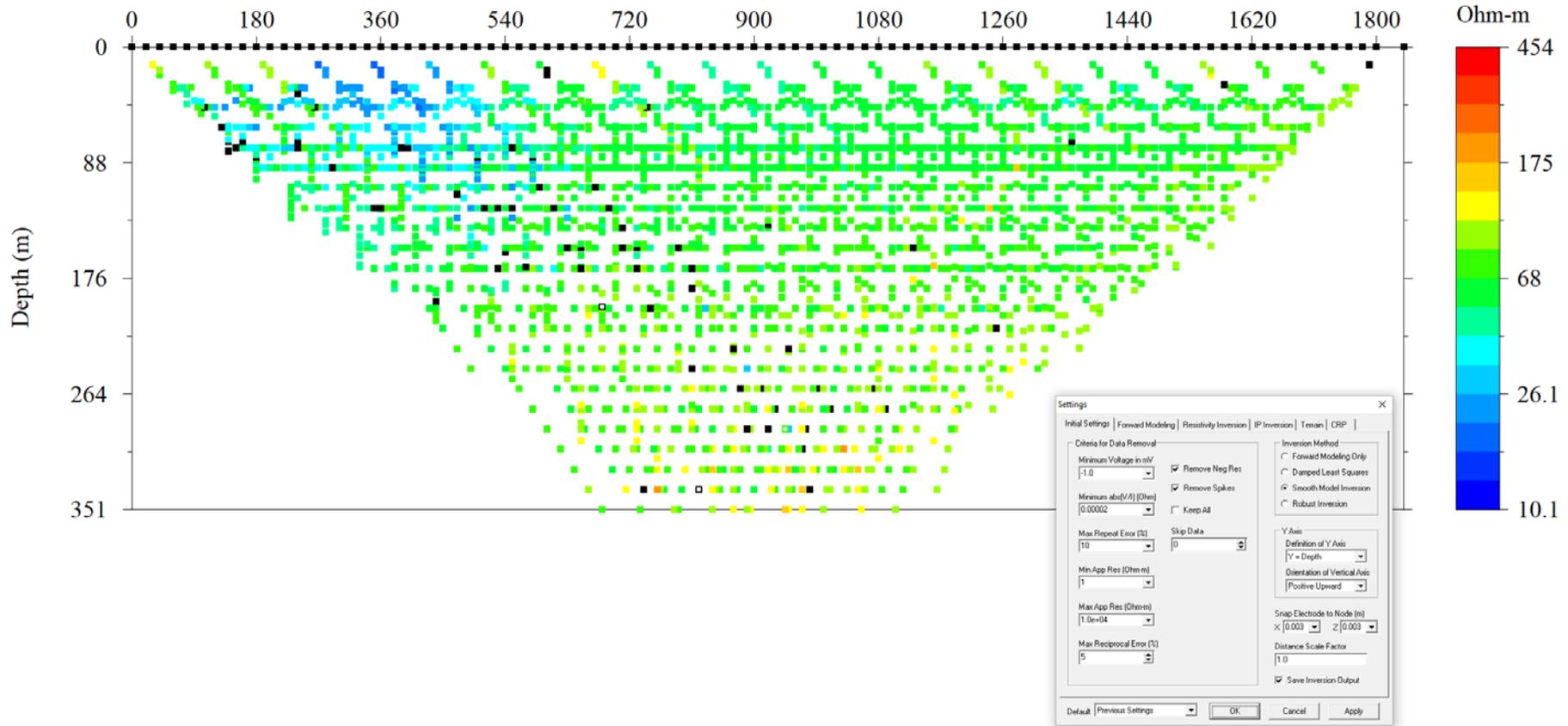


Abb. 17: Ergebnis der automatisierten Datenqualitätsanalyse (Programm EarthImager 2D, vers. 2.4.1., Advanced Geoscience Inc., USA), Spikefilterung und Entfernung negativer Messdaten

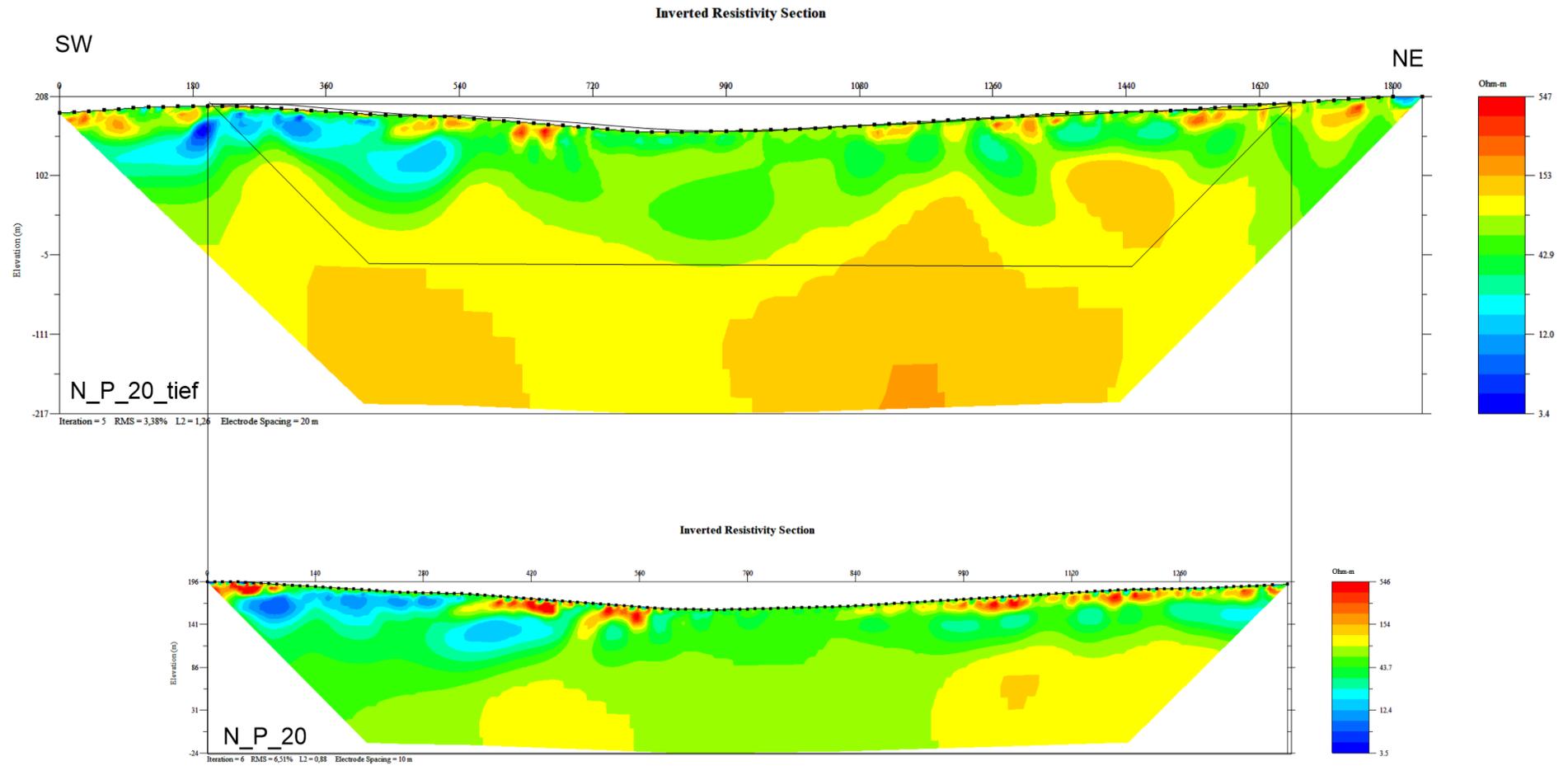


Abb. 18: Vergleich der beiden Geoelektrikprofile N_P_20 mit N_P_20_tief, lagebezogen

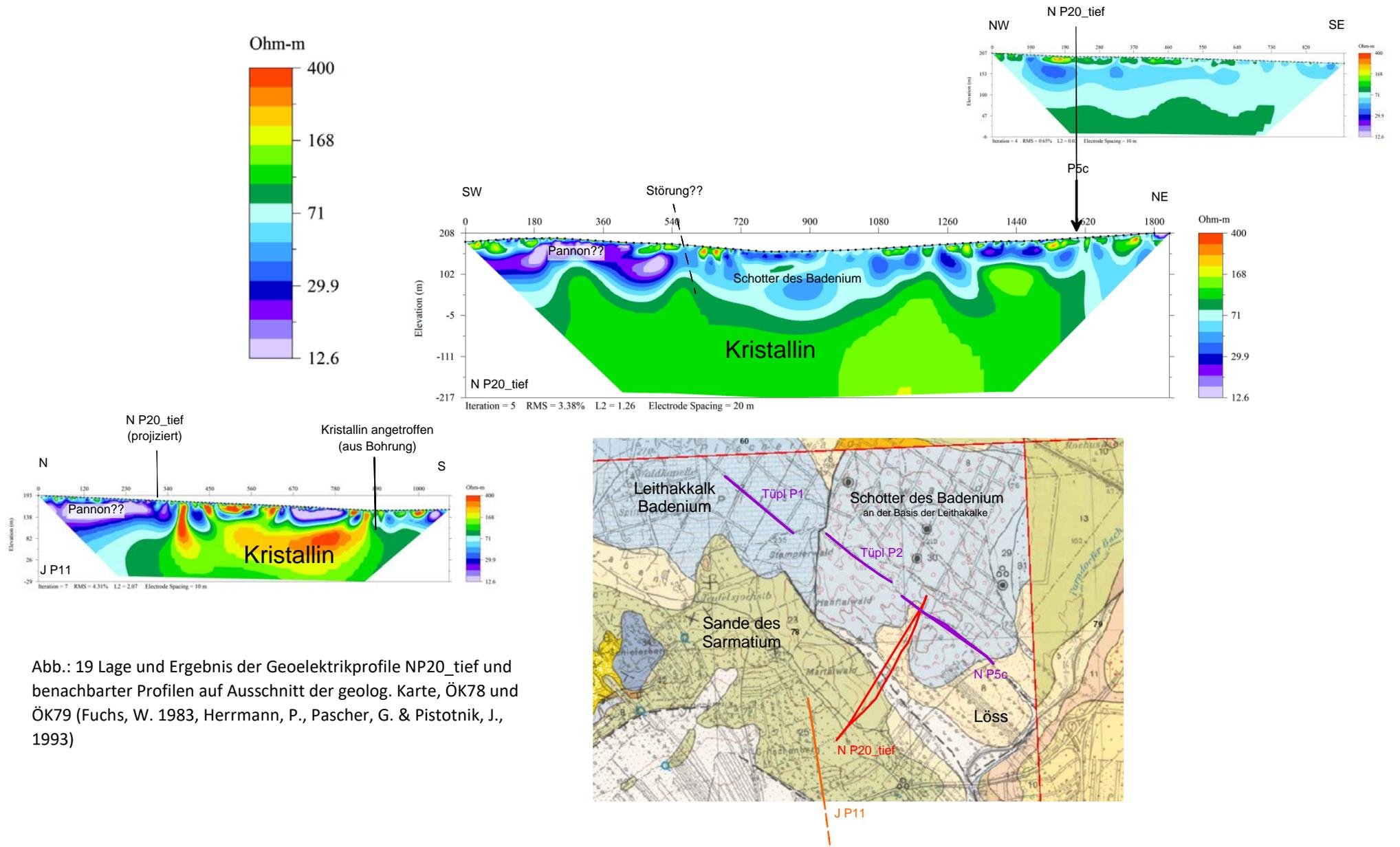


Abb.: 19 Lage und Ergebnis der Geoelektrikprofile NP20_tief und benachbarter Profile auf Ausschnitt der geolog. Karte, ÖK78 und ÖK79 (Fuchs, W. 1983, Herrmann, P., Pascher, G. & Pistotnik, J., 1993)

2.5 Profil Winden am See

In der Nähe einer, im Rahmen eines Projektes mit dem Wasserleitungsverband nördl. Burgenland abgeteuften Bohrung (Winden EKB01), wurde ein geoelektrisches Profil mit einer Profillauslage von 1840 m vermessen (Profil W_P1_tief, siehe Abbildung 20 mit Lage der Bohrung Winden EKB01 und weiterer Profile im Messgebiet). Tab 5 gibt die Spezifikationen des Profils W_P1_tief wieder.

Geoelektrikprofil	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	Messrichtung	Max. Eindringtiefe [m]
Profil Winden am See W_P1_tief	20	1840	SW-NE	387

Tabelle 5: Spezifikation des Geoelektrikprofils Winden am See (Bgl.)

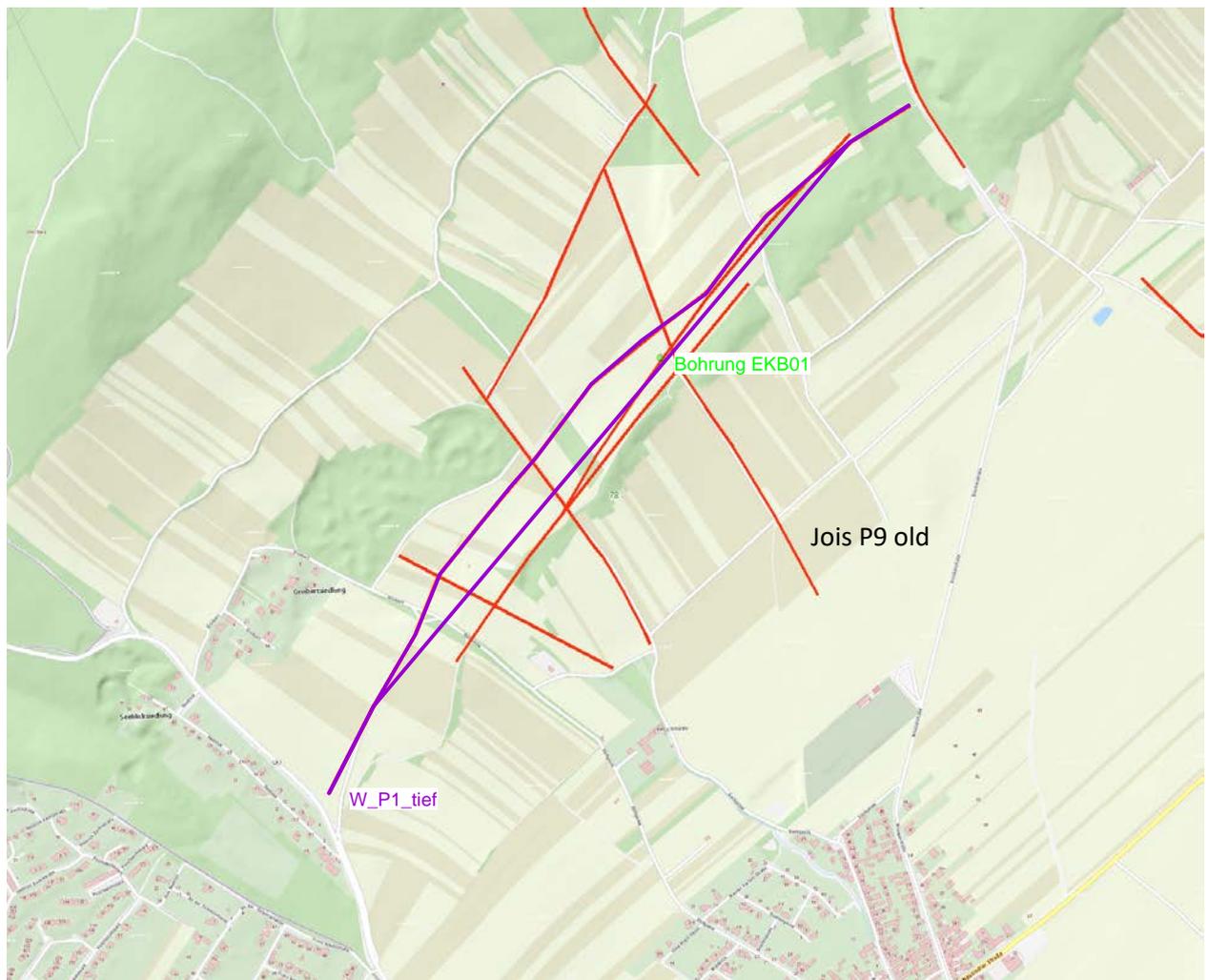


Abb. 20: Lage des geoelektrischen Profils W_P1_tief (mit zusätzlichen benachbarten Geoelektrikprofilen) (Ausschnitt aus Datenbank Geophysis, Kartengrundlage: Geoland)

Abb. 21 zeigt die Qualitätskontrolle für das Geoelektrikprofil Profil W_P1_tief. Deutlich sind die durch die entsprechenden Einstellungen für die automatisierte Datenfilterung entfernten Datenpunkte v.a. am Ende des Profils erkennbar. Betrachtet man in Abb. 22 die dazugehörigen Strommesswerte, ist ersichtlich, dass in diesem Teil des Profils relativ wenig Stromspeisung möglich war (Punkte in dunkelblau). Ansonsten ist die Datenqualität als gut zu bezeichnen.

Eine detaillierte Beschreibung des Bohrprofils liegt GBA-intern zwar vor, jedoch dürfen diese im Rahmen von veröffentlichten Berichten auf Grund der Eigentumsrechte der Dateneigentümer (hier: WLV nördl. Bgld.) nicht im Detail publiziert werden. Deshalb sind auch hier keine konkreten Darstellungen der Ergebnisse der Bohrungen (Bohrdaten, Bohrprofile,...) enthalten. Eine geologische Interpretation wurde aber schematisch eingearbeitet.

In Abb. 23 sind die Ergebnisse der Geoelektrikprofile Profil W_P1_tief und Jois P9 old (mit Lage zur Bohrung Winden EKB01) im Vergleich dargestellt.

Die Übereinstimmung im Bereich der Bohrung ist in diesem Fall nicht sehr überzeugend, dies wird aber auf unterschiedliche Grundwasserverhältnisse (die beiden Messungen wurden im Abstand von 8 Jahren und zu unterschiedlichen Jahreszeiten gemessen) zurückzuführen sein.

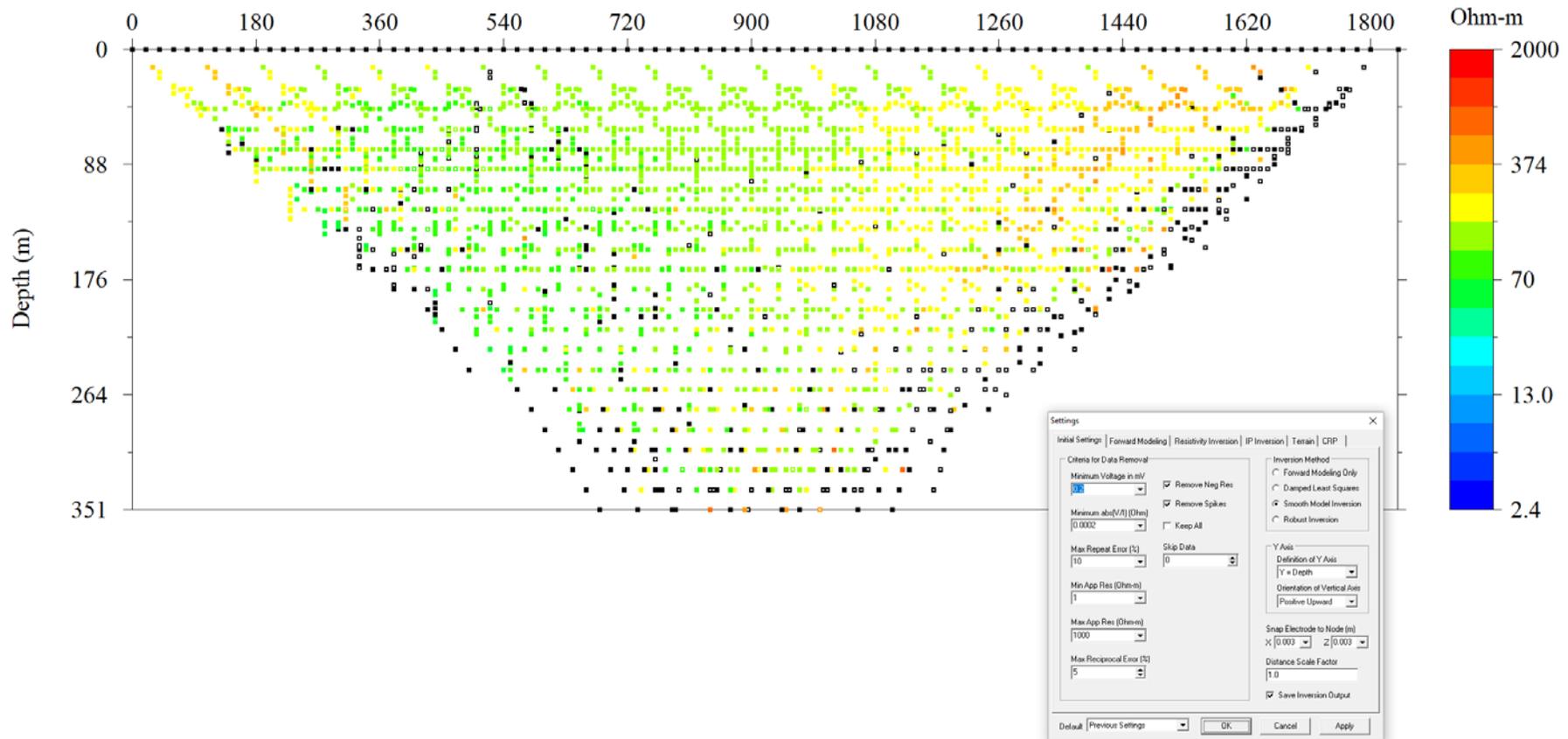


Abb. 21: Ergebnis der automatisierten Datenqualitätsanalyse (Programm EarthImager 2D, vers. 2.4.1., Advanced Geoscience Inc., USA), Spikefilterung und Entfernung negativer Messdaten

Scatter Plot of Injected Current (mA)

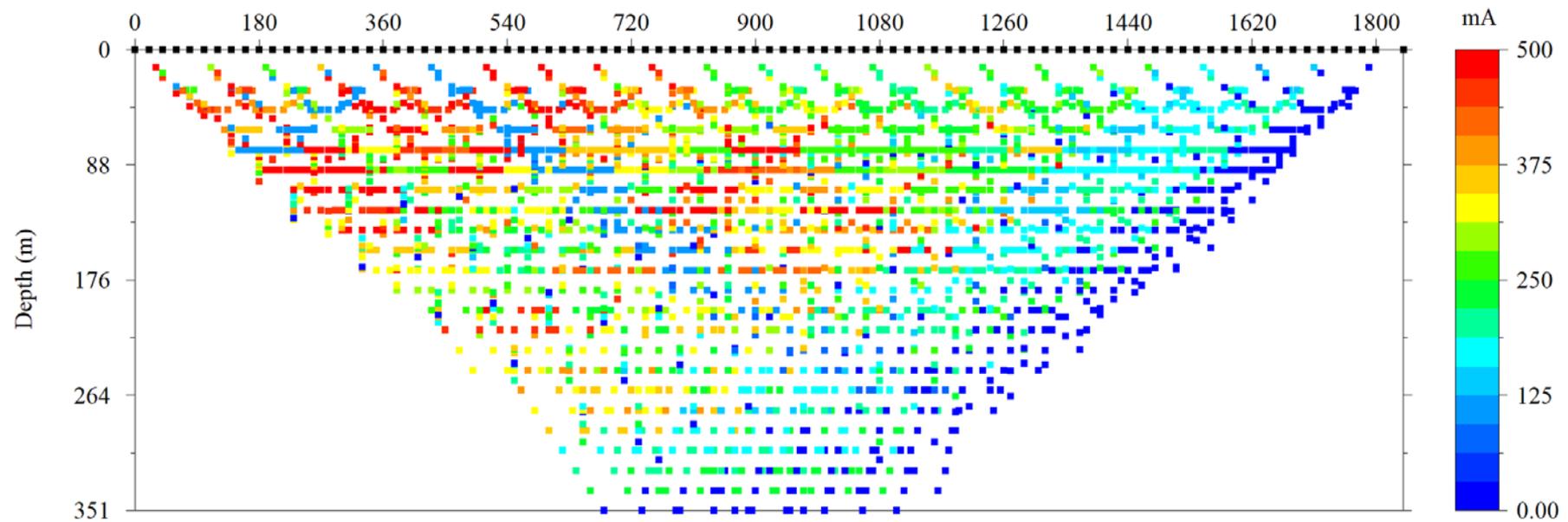


Abb. 22: Darstellung als Scatter plot der eingespeisten Stromstärken [mA]

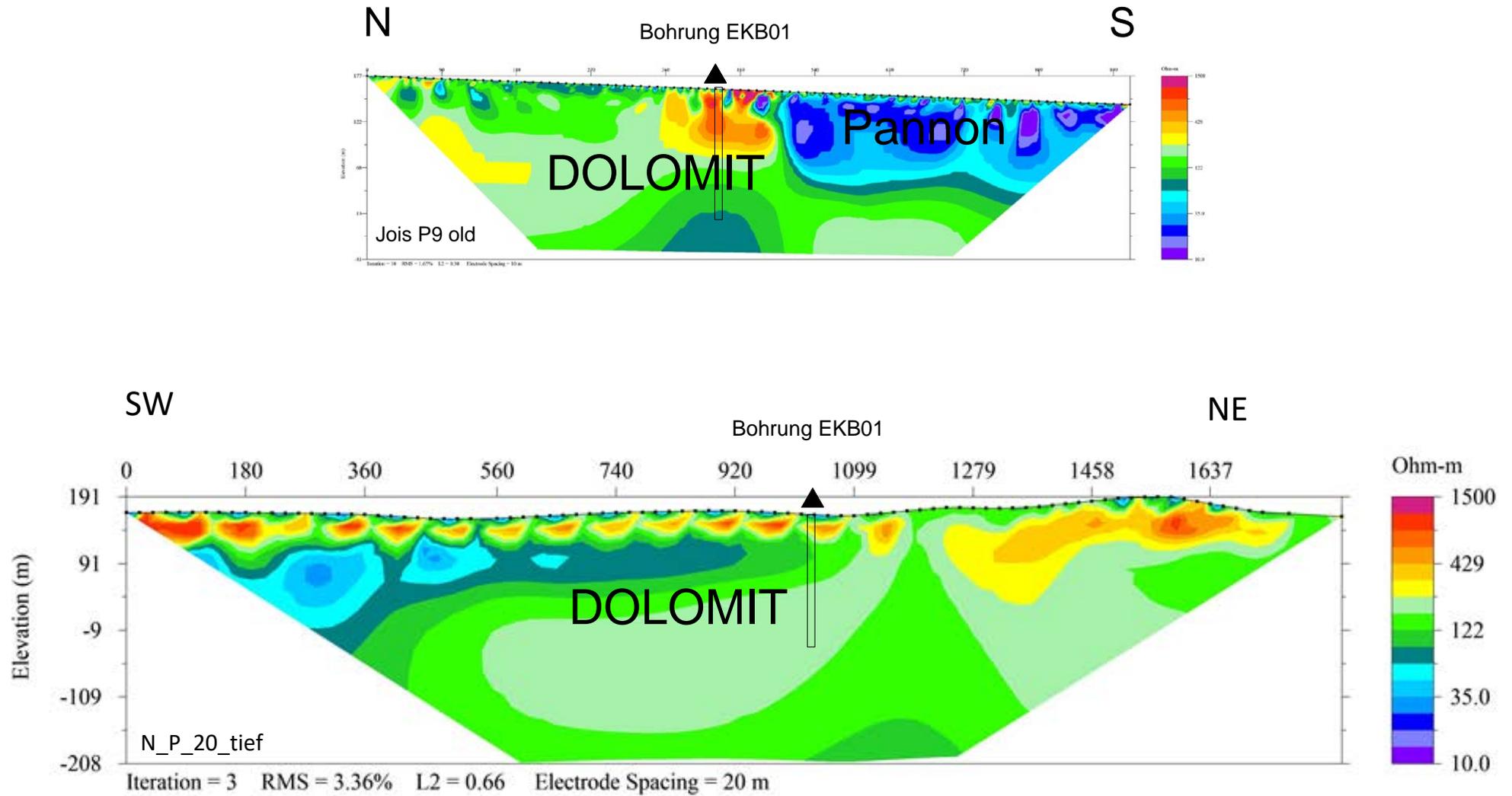


Abb. 23: Ergebnis des Geoelektrikprofils W_P1_tief mit Lage der Bohrung Winden EKB01 (projiziert) und Ergebnis von Profil Jois P9 old im Vergleich (siehe Lageplan Abb. 15)

2.6 Profil Frauenkirchen

Im Zuge eines Projektes mit dem Wasserleitungsverband nördl. Bgld wurden mehr als 10 geoelektrische Profile für die Erkundung des tieferen Untergrundes im Gebiet zwischen Frauenkirchen/Podersdorf/Mönchhof bis in eine Tiefe von 200 m vermessen. In einem Abschnitt zwischen Frauenkirchen und Podersdorf (in der Nähe einer Bohrung/Wasserwerk Frauenkirchen) waren die mit den herkömmlichen Auslagen erzielten Ergebnisse nicht eindeutig und entsprachen nicht den geologischen Vorstellungen. Aus diesem Grund wurde das Profil Frauenkirchen P1_tief gelegt (Spezifikationen siehe Tab. 6 und Lage siehe Abb. 24), um einen größeren Bereich und eine größere Tiefe erfassen zu können.

Geoelektrikprofil	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	Messrichtung	Max. Eindringtiefe [m]
Profil Frauenkirchen P1_tief	20	1840	N-S	387

Tabelle 6: Spezifikation des Geoelektrikprofils Frauenkirchen (Bgld.)



Abb. 24: Lage des geoelektrischen Profils Frauenkirchen_P1_tief (mit zusätzlichen benachbarten Geoelektrikprofilen) (Ausschnitt aus Datenbank Geophysis, Kartengrundlage: Geoland).

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die mittels des Programmes Proc_GM4D_2 (© KIGAM) durchgeführte Qualitätsanalysen (QC). Die Abbildungen 25 und 26 zeigen die Crossplots der Signal/Noiseverhältnisse bzw. der Standardabweichungen zu verschiedenen Parametern, wie Potentialelektrode, scheinbarer Widerstand bzw. resistance (scheinbarer Widerstand ohne Geometriefaktor). Die grau hinterlegten Punkte (entsprechen den Kriterienwerten der einzelnen Messpunkte) zeigen diejenigen Messpunkte an, die nicht innerhalb der gewählten Kriterien liegen, die in der nebenstehenden Tabelle als Minimum/Maximumwerte für die einzelnen Parameter eingestellt sind. In Abb. 26 sind die Crossplots der Daten nach einem automatischen Filterdurchlauf, der auf (semi)automatischen Ausschluss von als fraglich eingestuften Elektroden basiert, dargestellt. Abb. 27 zeigt die dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Messpunkte (zu unterschiedlichen Parametern). Ebenfalls ist das Histogramm der Abweichung zwischen Modell- und Messdaten zur Eliminierung von Daten mit höheren prozentualen Abweichungen dieser Messpunkte bei der Inversionsrechnung zu sehen. Abb. 28 und Abb. 29 zeigen den Vergleich der Modell/Messdatenabweichungen (data misfit scatter plot) vor und nach der Filterung der Daten. Deutlich ist in Abb. 29 die geringere Streubreite der Abweichungen (eine Ausnahme eingekreist), mit einem deutlich geringeren rms-Fehler, zu erkennen, die aber natürlich mit Datenverlusten einhergeht. Der Vergleich der Inversionsergebnisse ist in Abb. 30 dargestellt. Die neue Auswertung mit Filteranalyse (unten) ist nach geologischer Sichtweise deutlich realistischer zu bewerten, eine evidenzbasierte Überprüfung ist auf Grund fehlender Bohrungen aber nicht möglich.

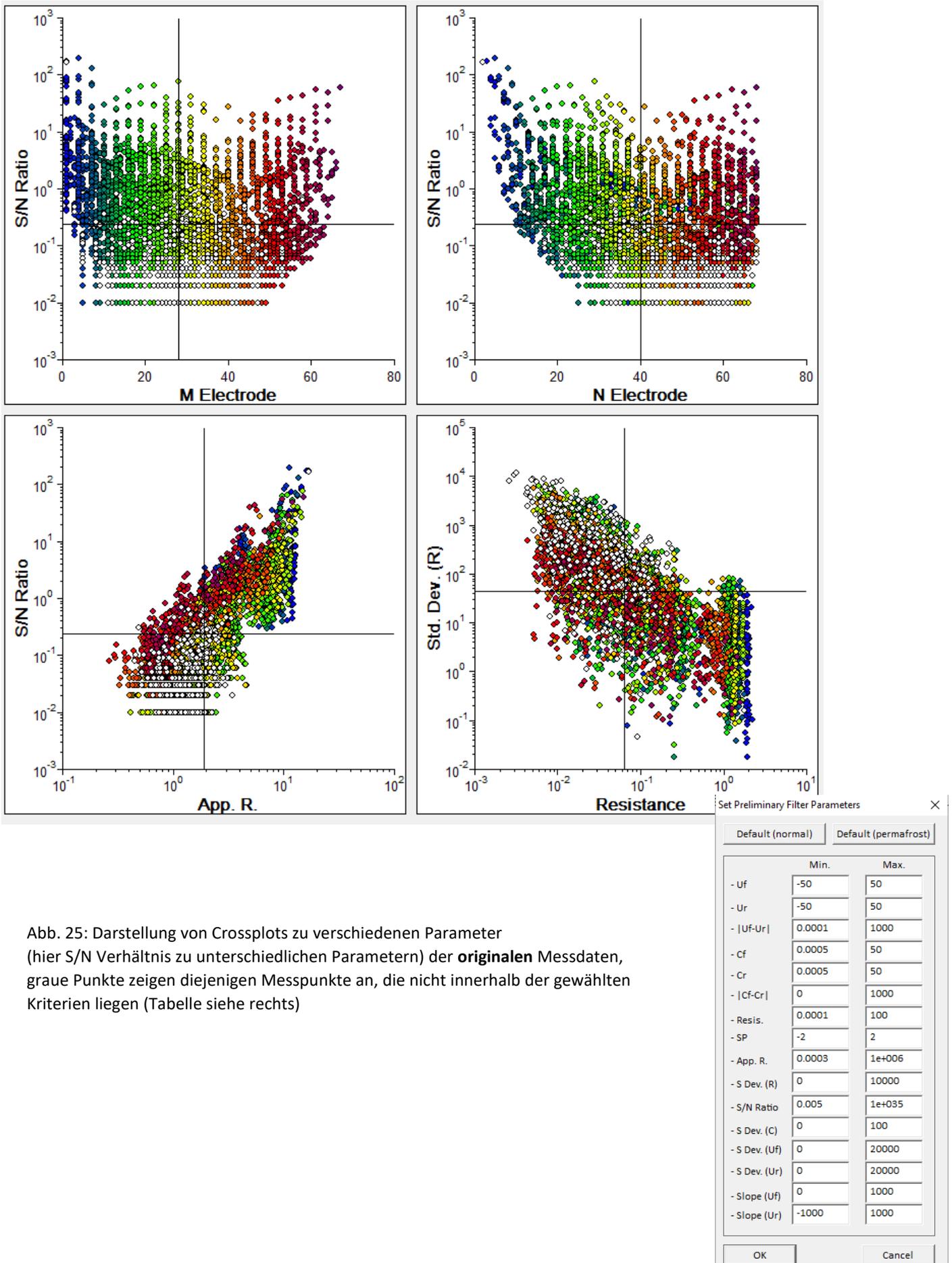


Abb. 25: Darstellung von Crossplots zu verschiedenen Parameter (hier S/N Verhältnis zu unterschiedlichen Parametern) der **originalen** Messdaten, graue Punkte zeigen diejenigen Messpunkte an, die nicht innerhalb der gewählten Kriterien liegen (Tabelle siehe rechts)

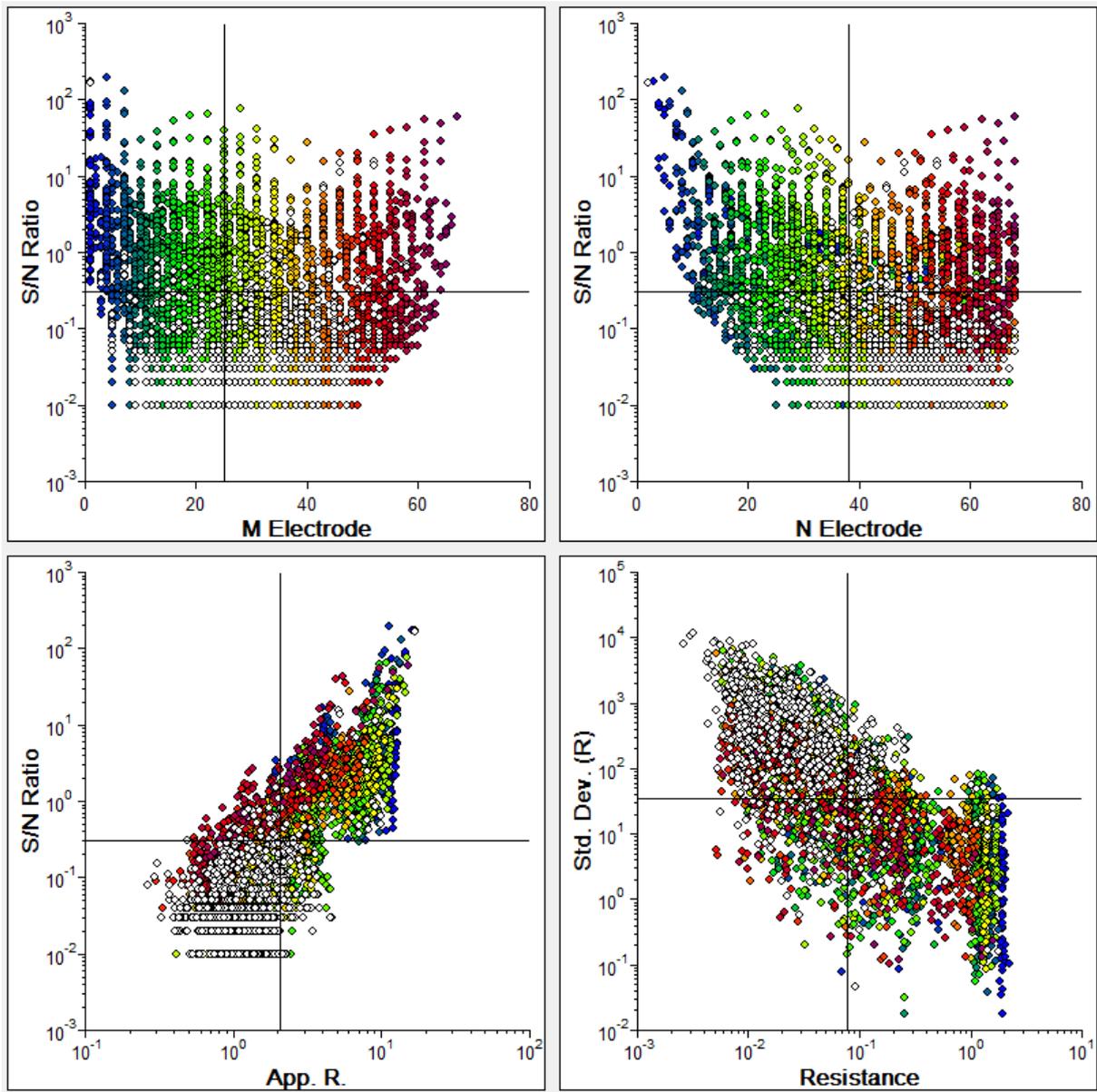
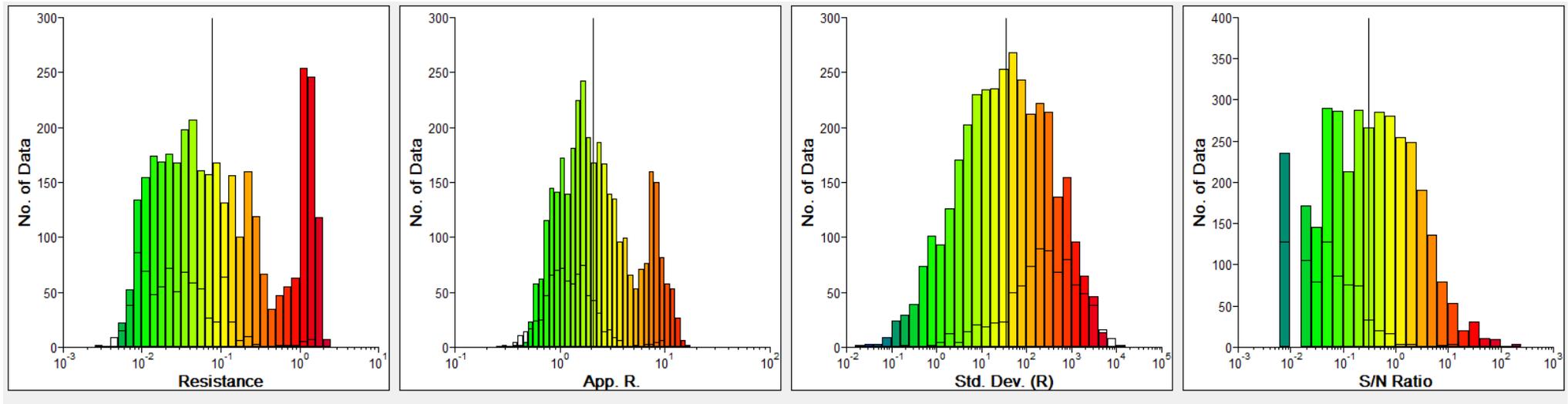


Abb. 26: Darstellung von Crossplots zu verschiedenen Parameter (hier S/N Verhältnis zu unterschiedlichen Parametern bzw. Standardabweichung des Widerstandes zum Widerstand) der **gefilterten** Messdaten, graue Punkte zeigen diejenigen Messpunkte an, die nicht innerhalb der gewählten Kriterien liegen



Data Misfit Histogram - EarthImager 2D

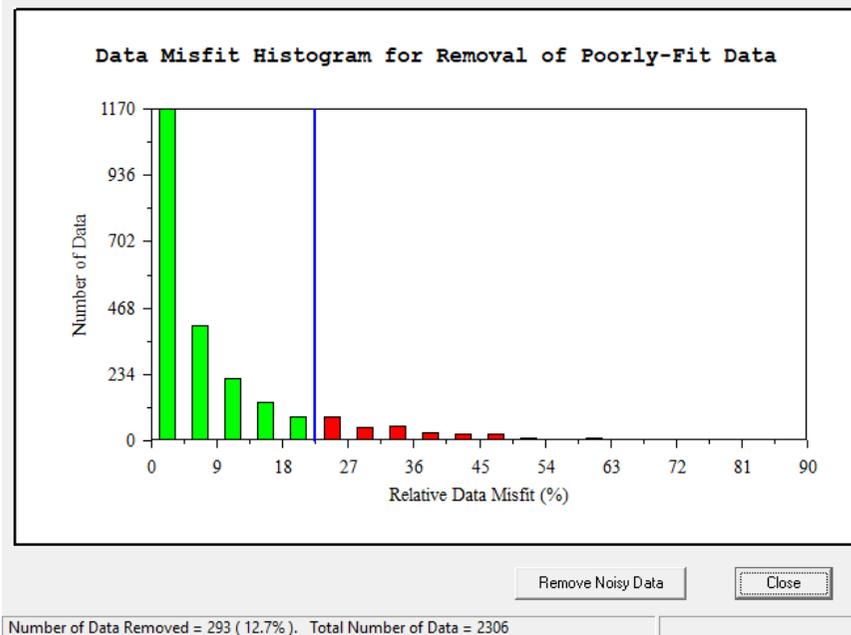


Abb. 27: Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Messpunkte zu unterschiedlichen Parametern (oben), Histogramm der Abweichung zwischen Modell- und Messdaten zur Eliminierung von Daten mit höheren prozentualen Abweichungen dieser Messpunkte (links)

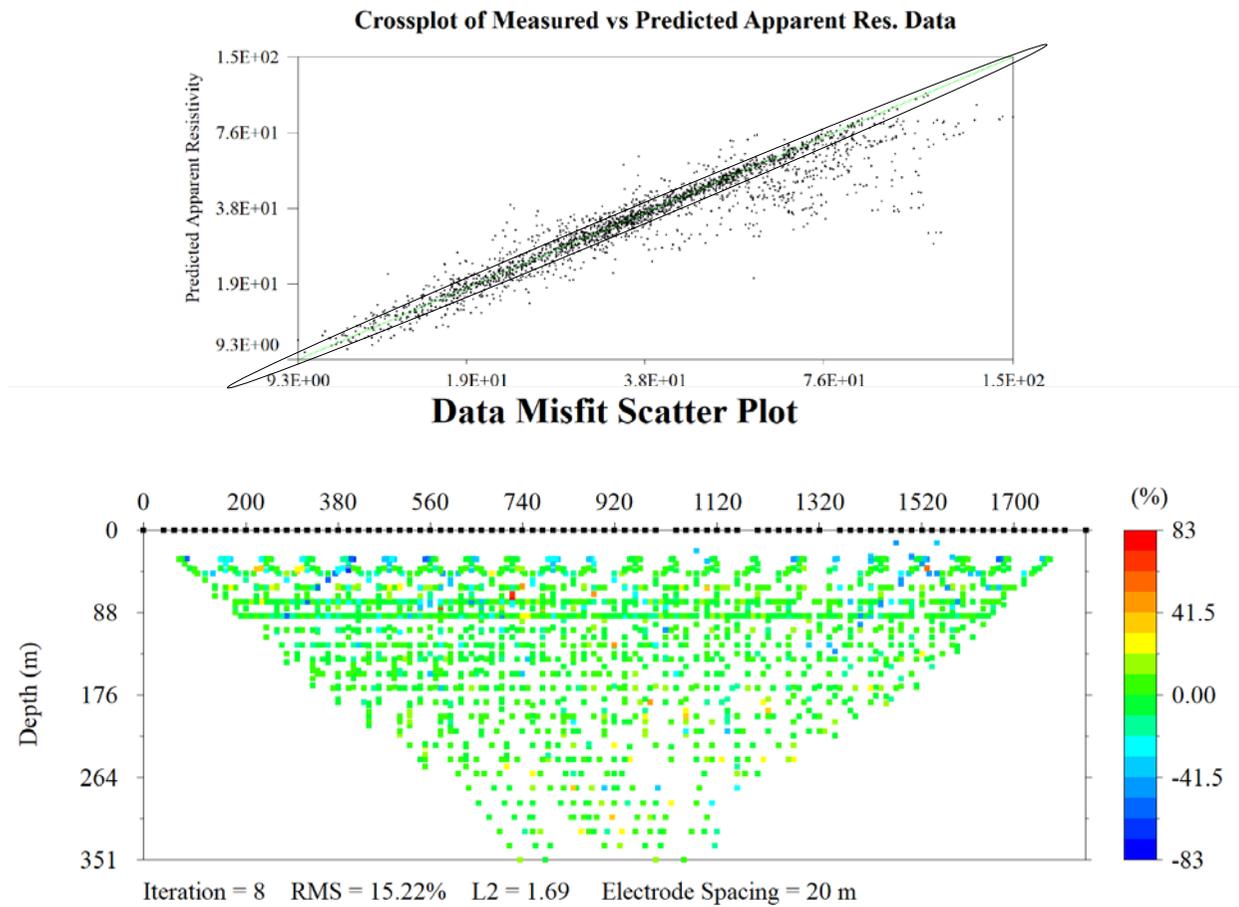


Abb. 28: Cross Plot von gemessenen Daten zu Modelldaten VOR Filterung (oben), Pseudosektion der Messdaten – Farbverteilung nach Abweichfehler [%] zwischen Modell/Messdaten (unten)

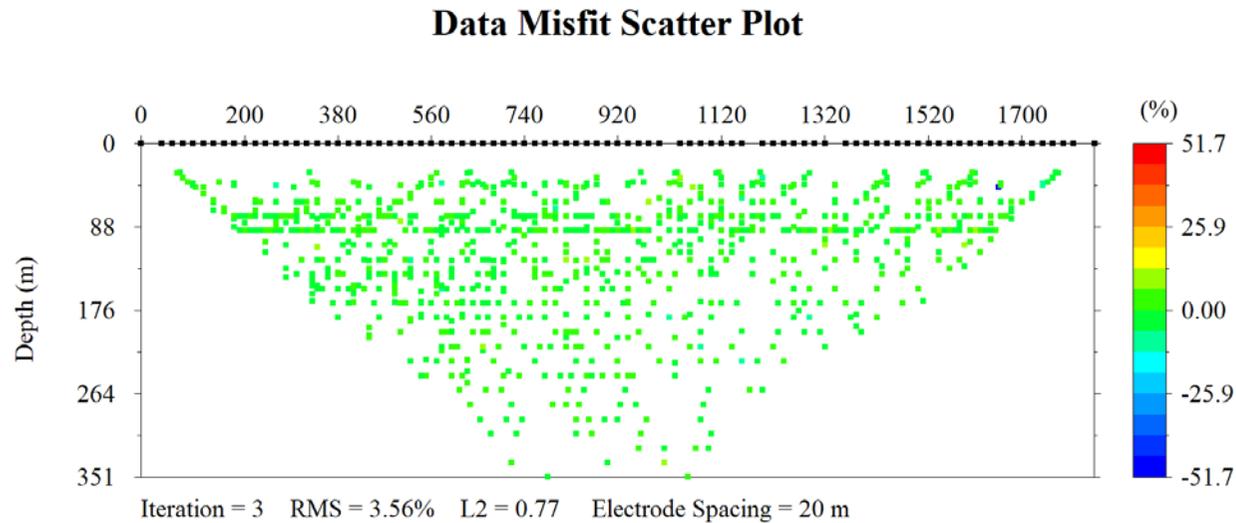
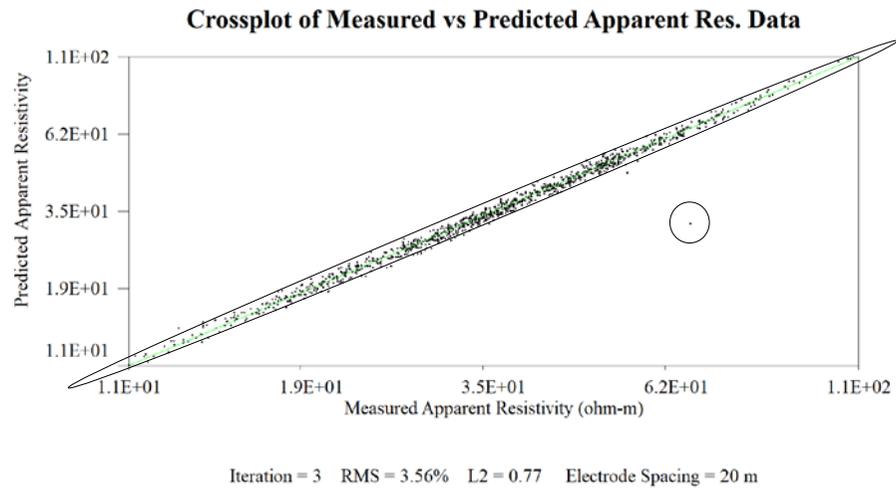


Abb. 29: Cross Plot von gemessenen Daten zu Modelldaten (oben), Pseudosektion der Messdaten – Farbverteilung nach Abweichfehler [%] zwischen Modell/Messdaten (unten) NACH Filterung

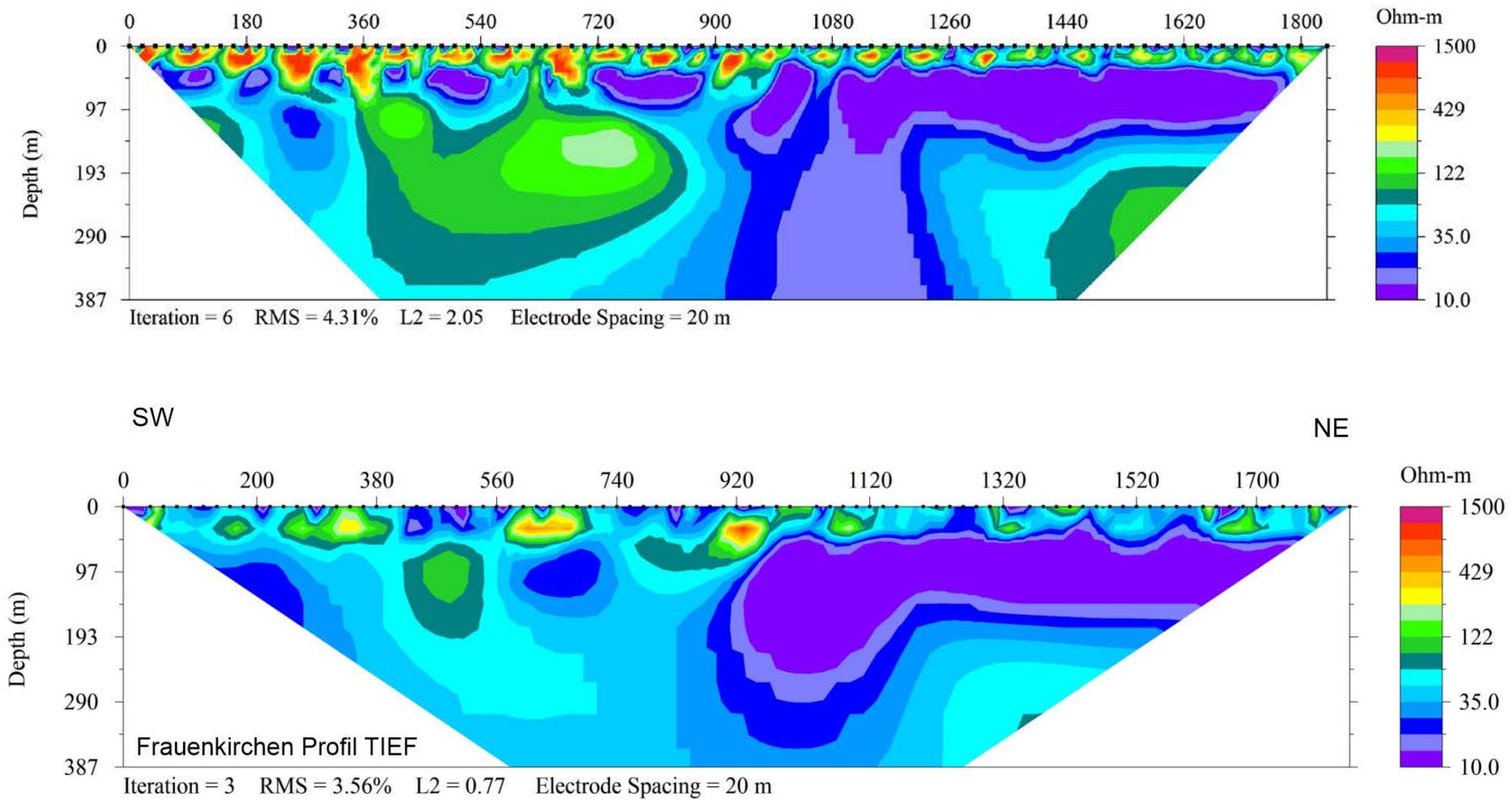


Abb. 30: Ergebnis des Geoelektrikprofils W_P1_tief, Auswertung alt (oben), Auswertung NEU nach Filteranalyse (unten)

2.7 Profil Schmidatal

1997 wurde im Bereich westlich von Goggendorf, in der weiteren Umgebung einer ehemaligen OMV Bohrung, ein geoelektrisches Profil vermessen. Ziel war damals neben der Bestimmung des Verlaufs des kristallinen Untergrundes (bestätigt durch die Bohrung in 230m Tiefe) auch die Erfassung der Situation bei der durch das Untersuchungsgebiet verlaufenden Diendorfer Störung. Im Jahr 2019 wurde im westlichen Anschluss zu dem bestehenden Profil ein tiefes Geoelektrikprofil (Profil Goggendorf P2) gelegt.

Tab. 7 gibt die Spezifikationen des Profils Goggendorf P2 wieder.

Geoelektrikprofil	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	Messrichtung	Max. Eindringtiefe [m]
Profil Goggendorf P2	20	2130	W-E	356

Tab. 7: Spezifikation des Geoelektrikprofils Schmidatal (NÖ)

Abb. 31 zeigt eine Darstellung als Scatter plot der eingespeisten Stromstärken [mA] zur Qualitätskontrolle. Die eingebrachten Stromstärken sind nicht sehr hoch, können aber als ausreichend (alle > 80 mA) angesprochen werden.

In Abb. 32 ist das Ergebnis der Inversionsrechnung für Geoelektrikprofil Goggendorf P2 dargestellt. Abb. 33 zeigt die Lage und die Darstellung der Ergebnisse der beiden Geoelektrikprofile Goggendorf/Schmidatal (1997/2019) mit entsprechender geologischer Interpretation auf einem Ausschnitt der geologischen Karte ÖK22/Hollabrunn Maßstab: 1:50000 (Roetzel, 1998). Sehr deutlich ist der Verlauf der nach Osten einfallenden Kristallinoberkante als hochohmiger Liegendbereich unter der niederohmigen tertiären Beckenfüllung zu erkennen.

Scatter Plot of Injected Current (mA)

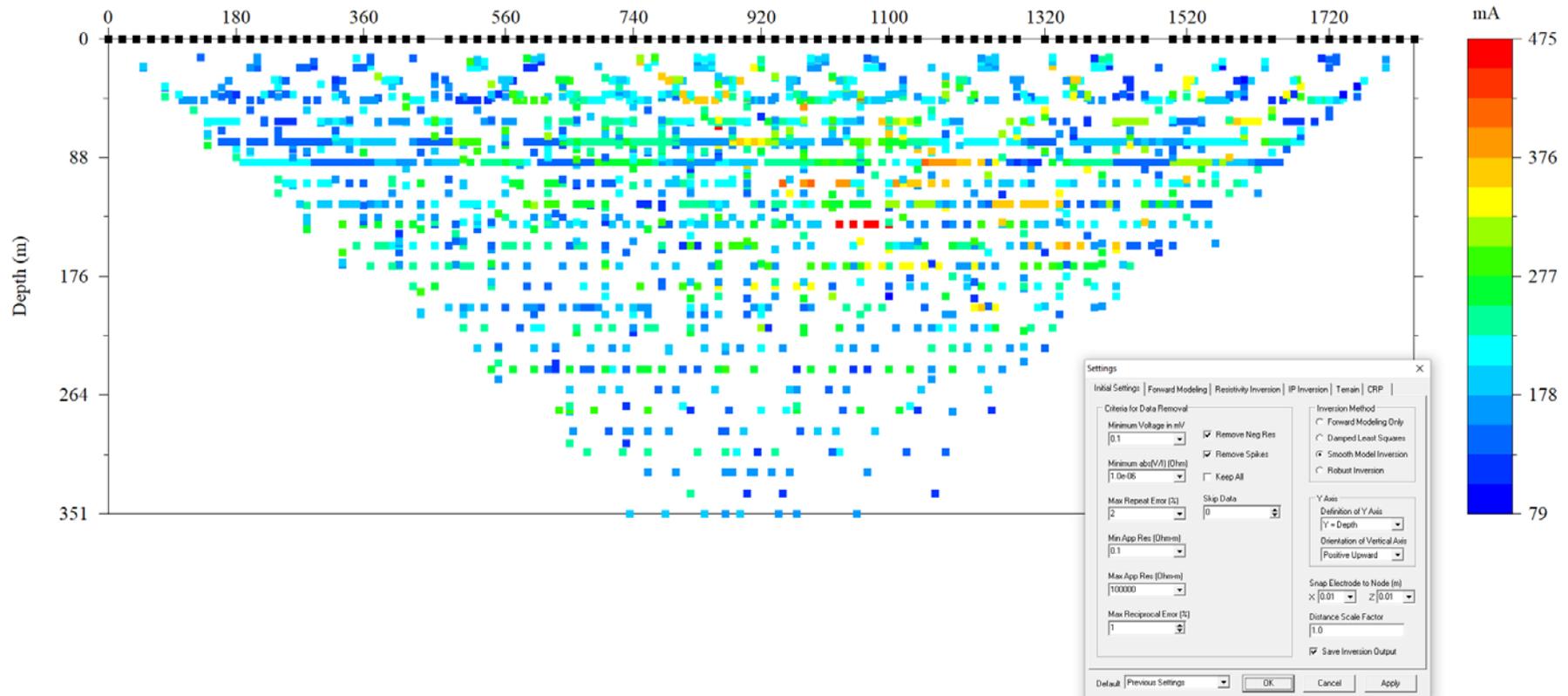


Abb. 31: Darstellung als Scatter plot der eingespeisten Stromstärken [mA]

W

E

C:\GeoMonitor\Data\GoggP2gradRes2DInv4363315-15-40.dat

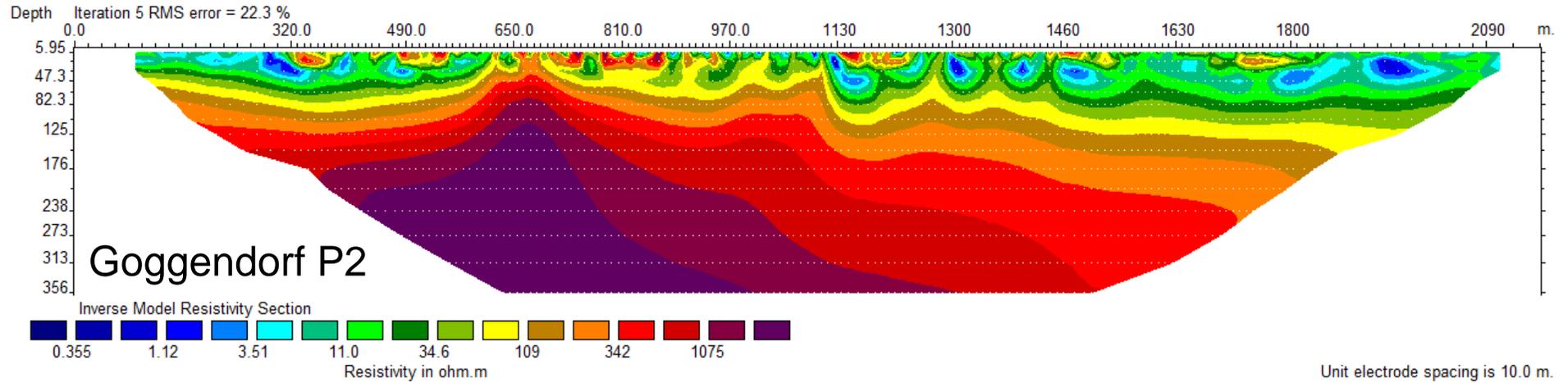


Abb. 32: Inversionsergebnis für Geoelektrikprofil Goggendorf P2

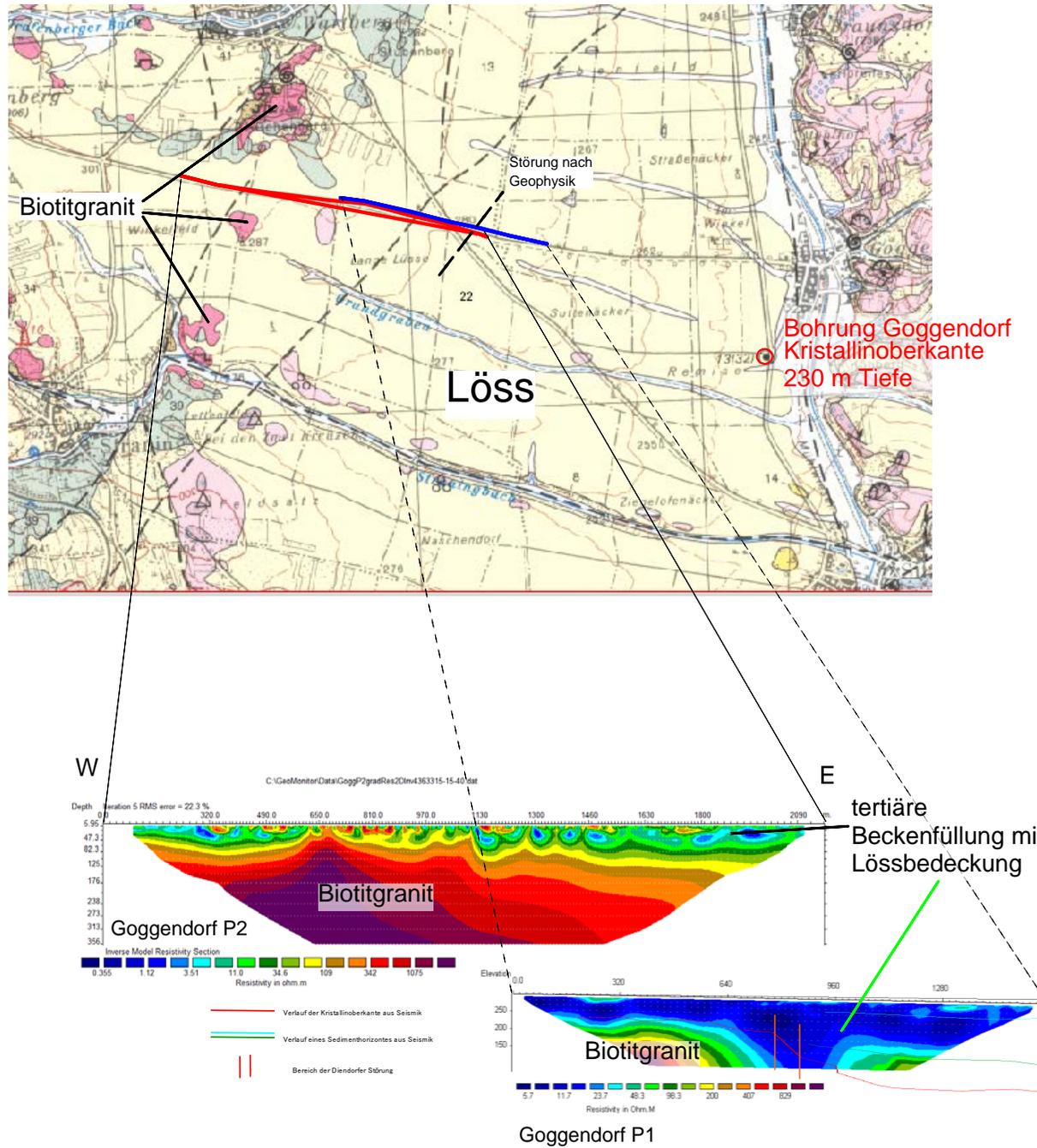


Abb 33: Lage und Darstellung der Ergebnisse der beiden Geoelektrikprofile Schmidatal (1997/2019) mit Interpretation auf Ausschnitt der geologischen Karte 22 Hollabrunn Maßstab: 1:50000 (Roetzel, 1998)

2.8 Profil Sibratsgfäll

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde im Gemeindegebiet von Sibratsgfäll (Vbg.) im Oktober 2019 ein geoelektrisches Profil mit einer Profilauslage von 1840 m vermessen (Profil Sib P30) Die Lage ist in Abbildung 34 ersichtlich. Tab. 8 gibt die Spezifikationen des Profils Sibratsgfäll P30 wieder.

Geoelektrikprofil	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	Messrichtung	Max. Eindringtiefe [m]
Profil Sibratsgfäll P30	20	1840	NW-SE	350

Tab.8: Spezifikation des Geoelektrikprofils Sibratsgfäll P30 (Vbg.)



Abb. 34: Lage des Geoelektrikprofils Sib P30 (AMAP)

Am Beispiel dieses langen Geoelektrikprofils lässt sich zeigen, dass bei sehr guter Datenqualität kaum noch Verbesserungen durch die Datenfilterung zu erzielen sind. Im angegebenen Beispiel konnte bei der Inversion des kompletten Datensatzes (4300 einzelne Messpunkte) ein recht geringer rms-Fehler (**r**oot **m**ean **s**quare, Fehler der Abweichung zwischen Modell und Messdaten bei der Inversion - ein Maß für die Qualität der Daten) von 4,2% erzielt werden. Durch die Filterung wurden etwa 140 Messpunkte eliminiert, wodurch sich allerdings der rms-Fehler nur um 0,3% verringert hat. Gemessen an der Anzahl der eliminierten Messpunkte und aufgrund der Tatsache, dass sich am Inversionsergebnis (Form und Verteilung der Widerstandsstrukturen) kaum etwas geändert hat, erscheint die Filterung in diesem Beispiel als wenig zweckmäßig. In Abb. 35 findet sich die Darstellung der Messdaten als sogenannte Crossplots aller gemessenen Datenpunkte und in Abb. 36 die Messdaten in Form von Häufigkeitsverteilungen für verschiedene Parameter. In Abb. 37 sind die Messdaten im sogenannten „electrode analysis“ plot zu sehen, wobei die schwarzen Balken die Elektroden darstellen, die bei den vorgewählten Analyseparametern eliminiert werden. Die zu filterten Daten sind in Abb. 38 ebenfalls als sogenannte Crossplots abgebildet. Schließlich zeigen die Abb. 39 und Abb. 40 einen Vergleich der beiden Inversionsergebnisse. Da, wie bereits gesagt, die Datenqualität der Messung sehr gut war, ist der Unterschied der Ergebnisse marginal.

Dieses Ergebnis zeigt die große Bedeutung, die der Optimierung der Datenakquisition im Sinne der Erzielung möglichst optimaler Datenqualität beizumessen ist, da man dadurch den Aufwand der Datenfilterung erheblich verringern kann. Leider kann die Datenqualität nicht ausschließlich über eine sorgfältige und optimierte Datenakquisition beeinflusst werden, da in den meisten Fällen auch äußere Einflüsse (Stromleitungen, Gasleitungen, diverse Infrastruktur, ...) einen entscheidenden Einflussfaktor bei der Datenqualität spielen. Da dies bei der Mehrheit der Messungen zutrifft und im Vorhinein schwer zu beurteilen ist, ist die Möglichkeit einer fortgeschrittenen Datenfilterung durchaus von großer Bedeutung.

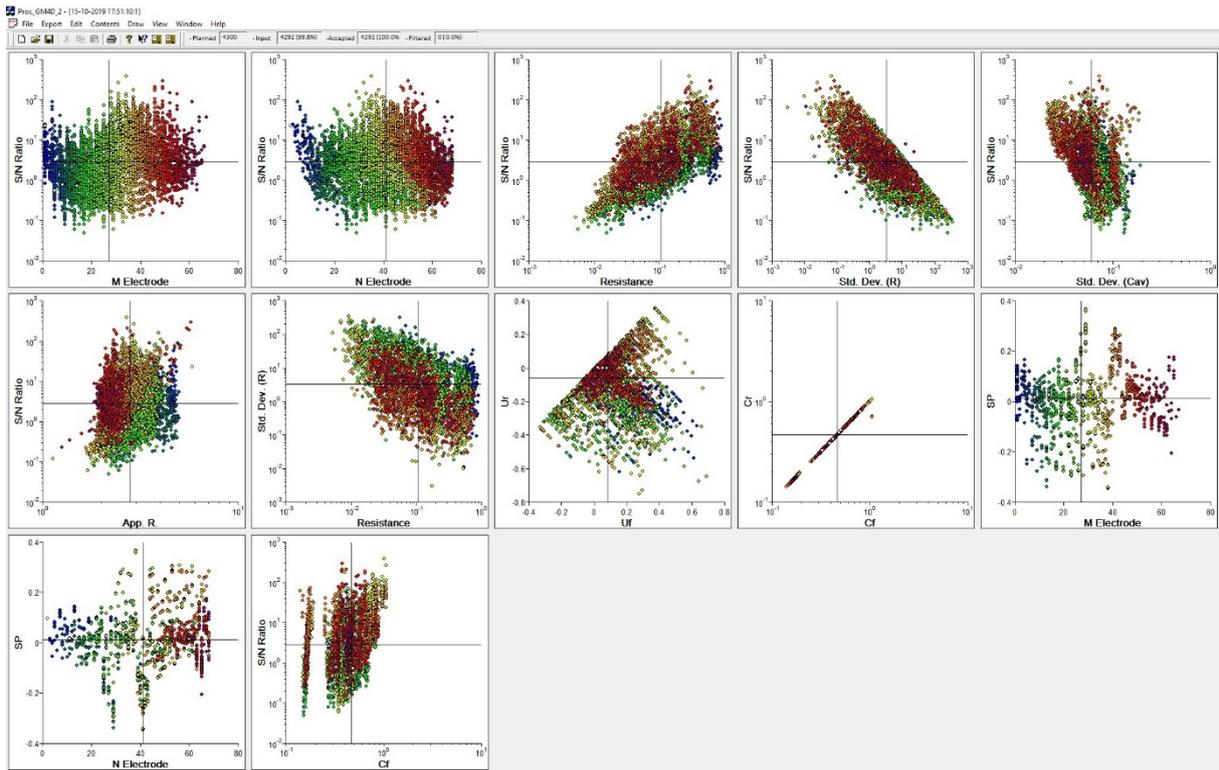


Abb. 35: Darstellung der Messdaten als sogenannte Crossplots – Darstellung aller gemessenen Datenpunkte

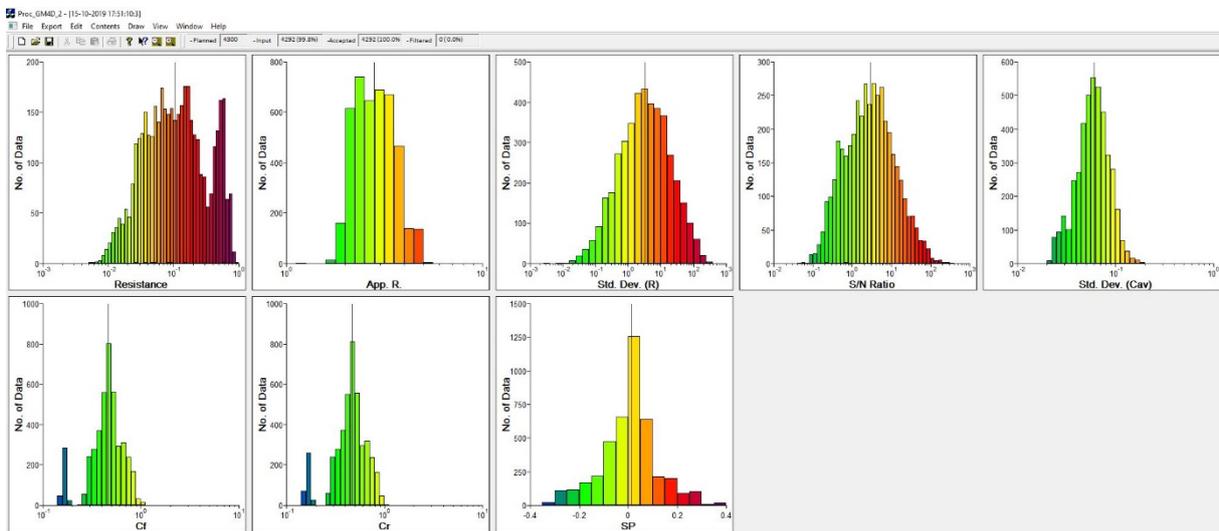


Abb. 36: Darstellung der Messdaten in Form von Häufigkeitsverteilungen für verschiedene Parameter

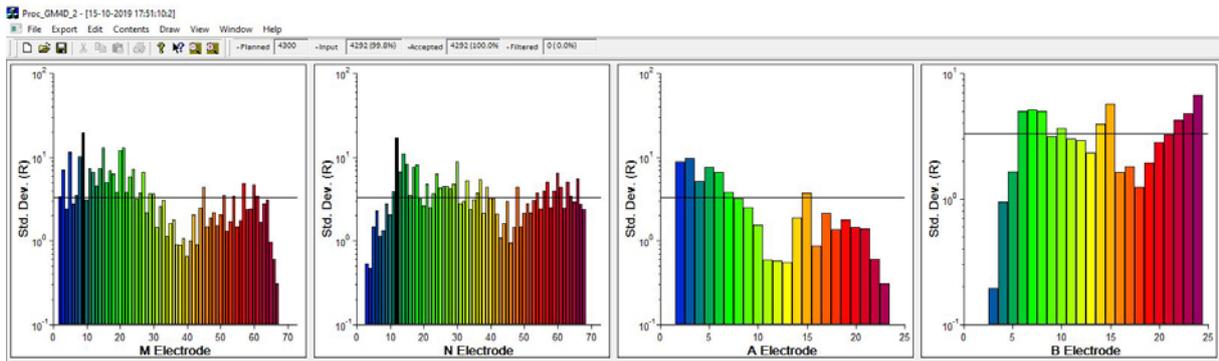


Abb. 37: Darstellung der Messdaten im sogenannten „electrode analysis“ plot; die schwarzen Balken stellen die Elektroden dar, die bei gewählten Analyseparametern zu eliminieren wären

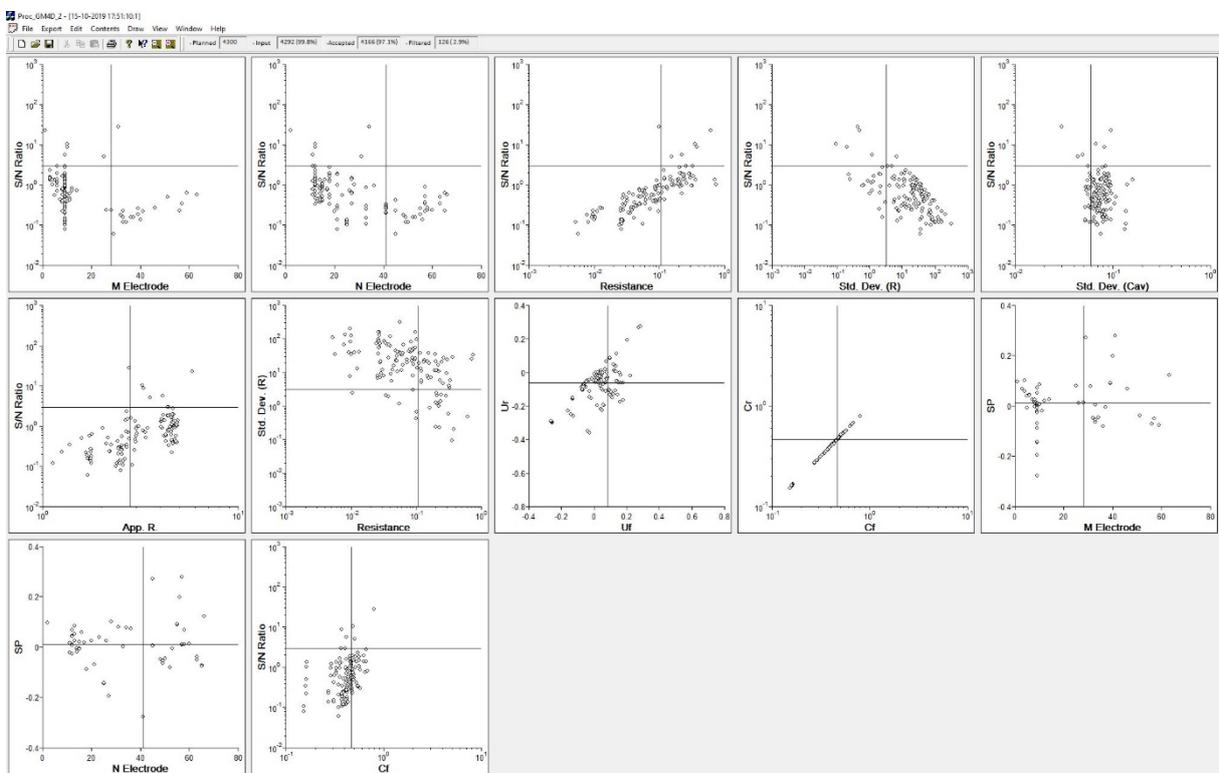


Abb. 38: Darstellung der Messdaten als sogenannte Crossplots – dargestellt sich nur die herausgefilterten Messpunkte

Ohne Filterung

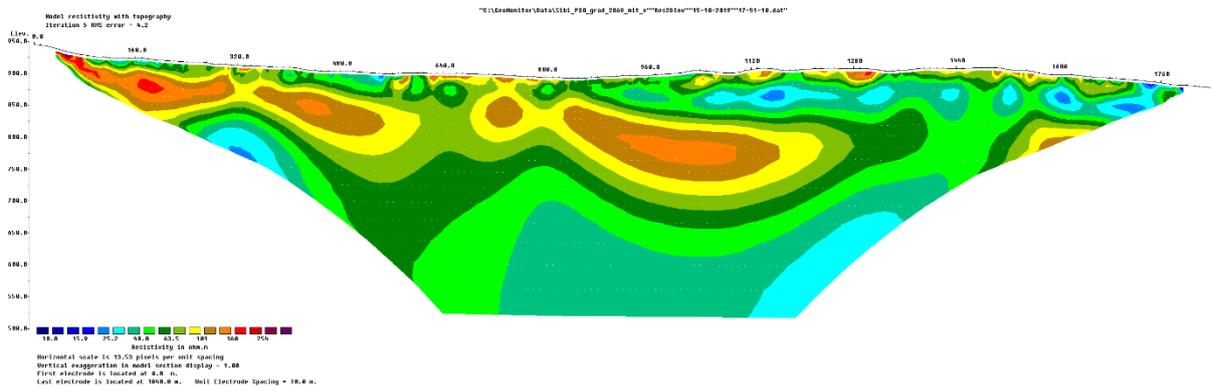


Abb. 39: Inversionsergebnis ohne Filterung – rms-Fehler: 4,2%

Mit Filterung

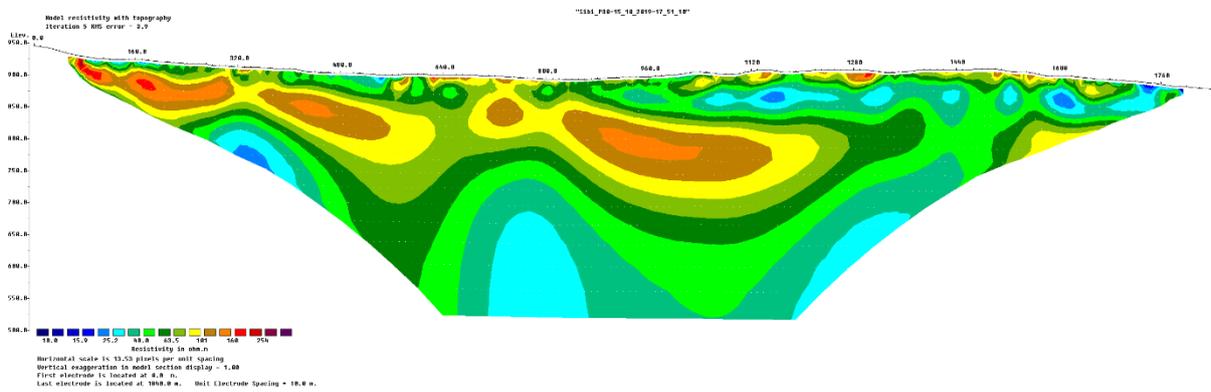


Abb. 40: Inversionsergebnis mit unten dargestellter Filterung („Electrode Analysis“, „Anomalous data filtering“, ...) – rms-Fehler: 3.9,%

2.9 Profile Ortenburg

In Ortenburg (Bayern, D, Lage des Messgebietes, siehe Abb. 1) in der Nähe von Vilshofen an der Donau wurden im Oktober 2018 im Rahmen des HIKE Projektes 3 knapp 2km lange Geoelektrikprofile realisiert. Das von der EU im Rahmen der GeoERA Initiative finanzierte Projekt HIKE vereint 19 Partnerorganisationen aus 14 Ländern und dient der Entwicklung einer europaweiten tektonischen Störungsdatenbank sowie einer Wissenssammlung über Gefährdung und Auswirkungen der Untergrundnutzung. Das Hauptziel der geoelektrischen Untersuchungen im Bereich von Ortenburg war die Bestimmung der Sedimentmächtigkeit über dem Grundgebirge. Eines der drei Profile wurde direkt über einer bekannten tektonischen Störung positioniert, sodass hier auch direkt auf die Bruchzone und den damit einhergehenden Versatz des Grundgebirges fokussiert wurde. In dem Untersuchungsgebiet wurden bislang geoelektrische Untersuchungen mit zu geringer Eindringtiefe für die Verifizierung der Sedimentmächtigkeit durchgeführt. Durch das neue Messequipment an der Geologischen Bundesanstalt (max. Profilauslage von knapp 1,9 km) konnte diese Fragestellung in Angriff genommen werden.

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Spezifikationen der 3 geoelektrischen Profile.

Geoelektrikprofil	Elektrodenabstand [m]	Profillänge [m]	Messrichtung	Max. Eindringtiefe [m]
Profil Ortenburg 1	20	1840	NE-SW	387
Profil Ortenburg	20	1840	SW-NE	387
Profil Ortenburg 3	20	1840	S-N	387

Tabelle 9: Spezifikation der Geoelektrikprofile Ortenburg (D)

In Abb. 41 ist die Lage der 3 Profile dargestellt. Abb. 42 zeigt eine schematische geologische Karte des Untersuchungsgebietes mit den nachgewiesenen (durchgehend) und den vermuteten (gestrichelt) tektonischen Störungen.

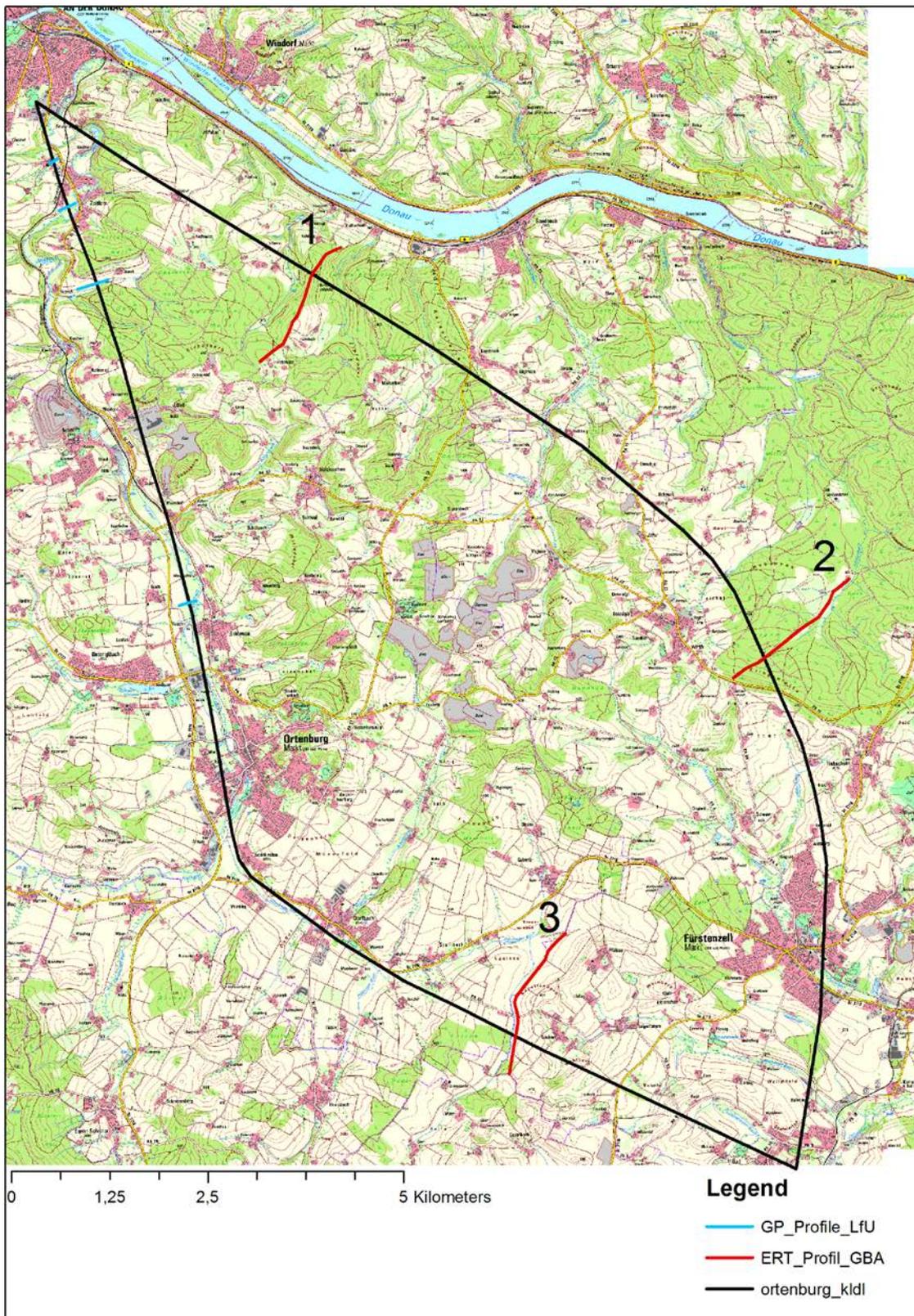


Abb. 41: Genaue Lage des Untersuchungsgebietes mit den gemessenen geoelektrischen Profilen (rot-GBA, blau-Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)) und den bekannten Störungszonen (schwarz)

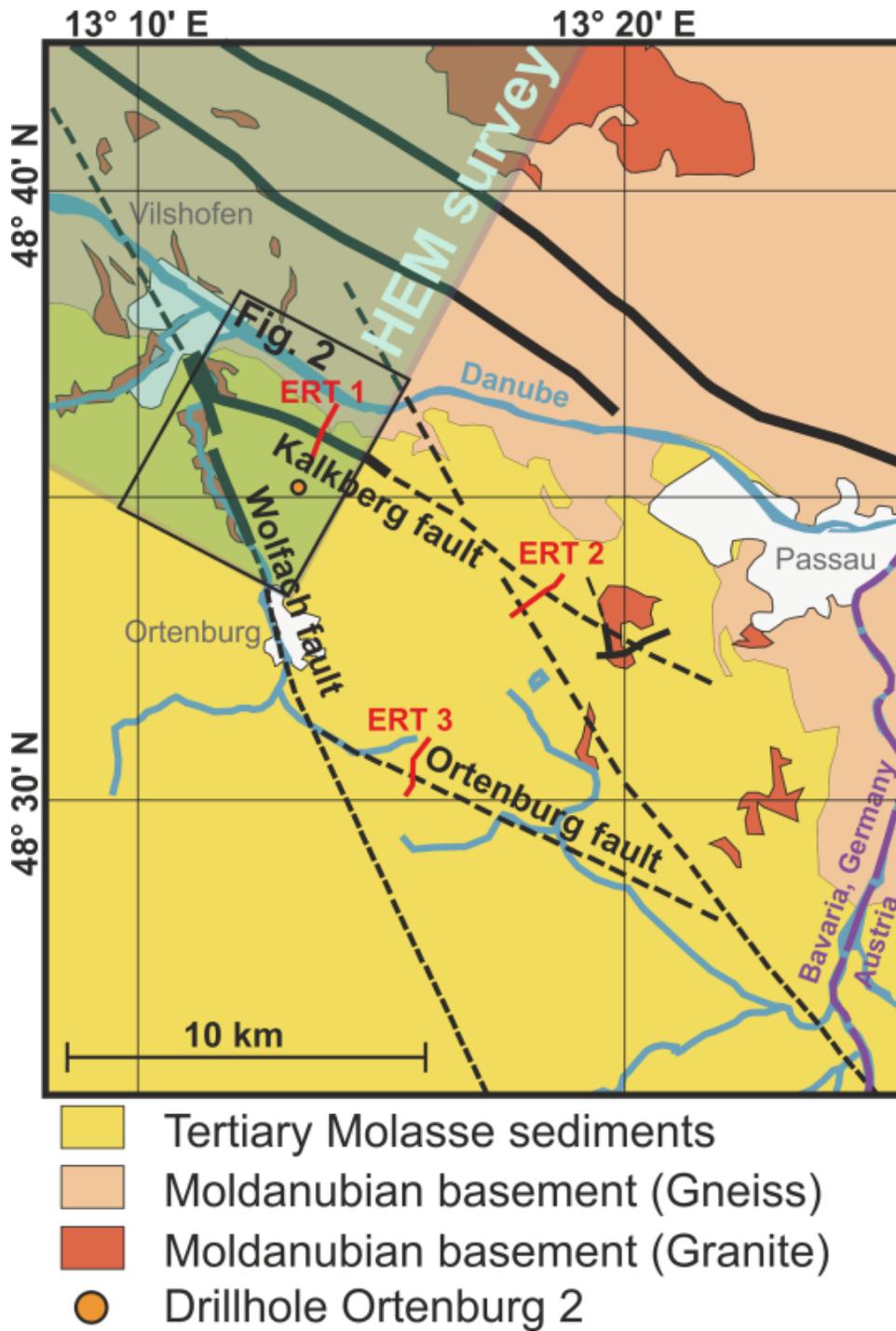


Abb. 42: Schematische geologische Karte des Untersuchungsgebietes mit den nachgewiesenen (durchgehend) und den vermuteten (gestrichelt) tektonischen Störungen

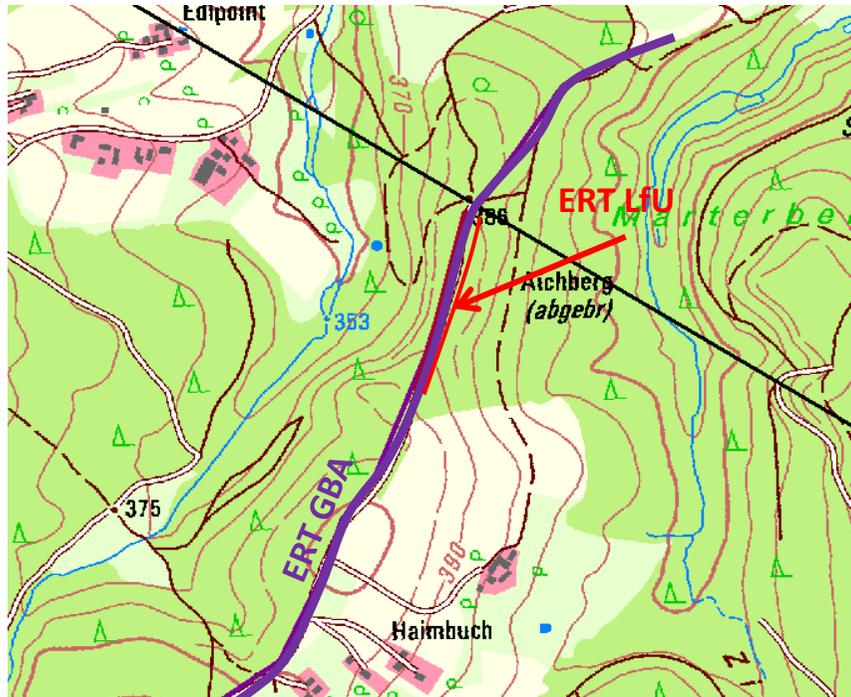
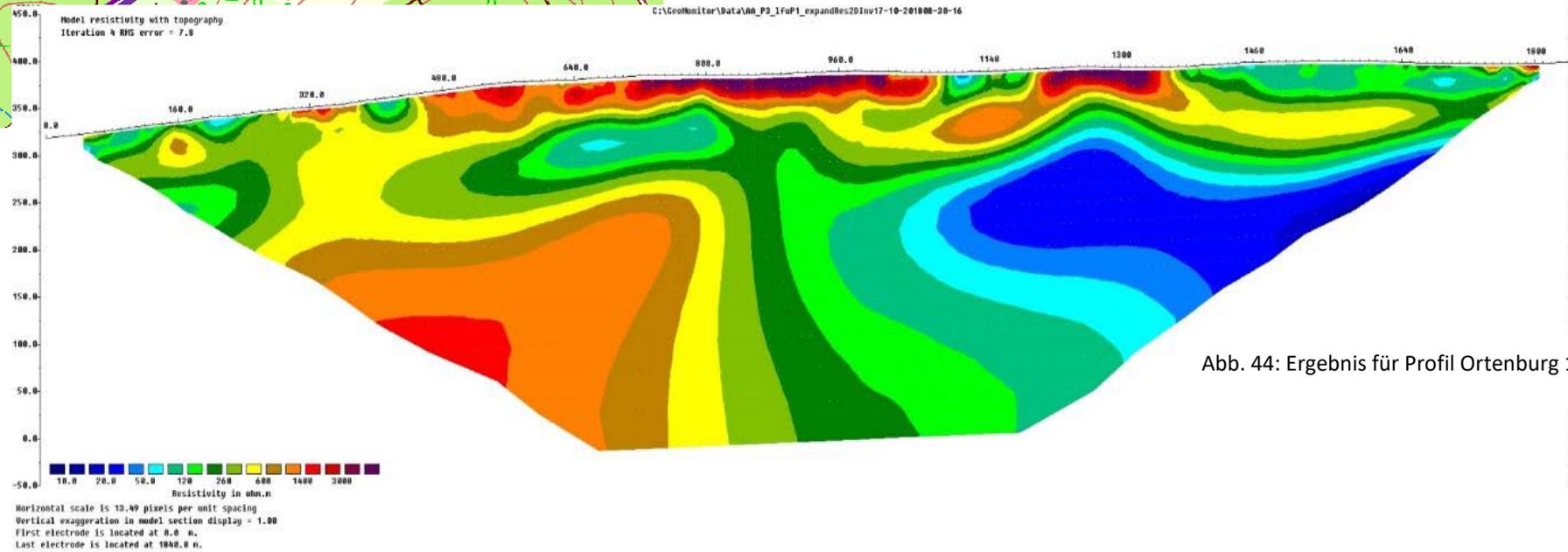


Abb. 43: Genauer Lageplan des Bereiches um Profil 1



SW

Abb. 44: Ergebnis für Profil Ortenburg 1

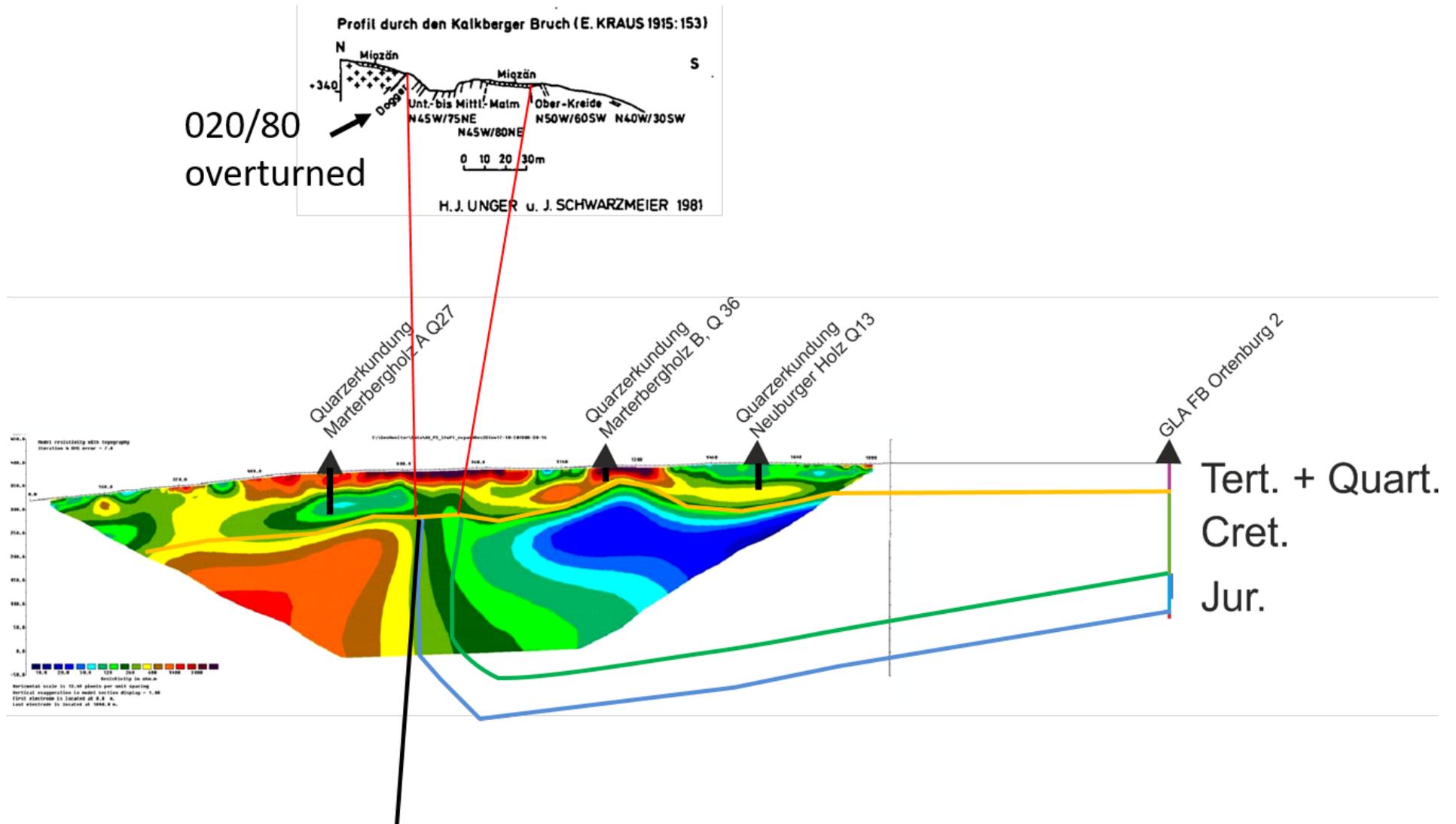


Abb. 45: Erste Strukturinterpretation des geoelektrischen Inversionsergebnisses von Profil 1 durch Johannes Großmann vom LfU

Bei Profil 1 (genaue Lage, siehe Abb. 43) ist zu beachten, dass aufgrund des hohen spez. elektr. Widerstandes im oberflächennahen Bereich (zentraler Bereich des Messprofils) zum Teil eine relativ schlechte Anbindung der Elektroden an den Untergrund vorherrschend war. Dadurch war die Datenqualität bei diesem Profil nicht besonders gut. Durch die Anwendung verschiedener Filteroptionen konnte das in Abb. 44 dargestellte Ergebnis erreicht werden.

Die bekannte tektonische Störung bildet sich, wie in Abb. 45 interpretiert, in der elektr. Widerstandsverteilung sehr deutlich ab. Im südwestlichen Bereich des Messprofils scheint die erzielte maximale Eindringtiefe nicht auszureichen um das Grundgebirge abzubilden. Scheinbar ist hier noch mit einer deutlich mächtigeren Sedimentbedeckung zu rechnen.

Profil 2 (genaue Lage, siehe Abb. 46) zeigte auch aufgrund des relativ geringen spez. elektr. Widerstandes auf der Oberfläche eine sehr gute Datenqualität. Bis auf die standardmäßige rms-error-Filterung mussten kaum zusätzliche Messpunkte herausgefiltert werden. Das Ergebnis zeigt eine deutliche Grenze zwischen dem hochohmigen Kristallin und den im hangenden liegenden Sedimentabfolgen, die sich ihrerseits in drei unterschiedliche Schichten (hinsichtlich des spez. elektr. Widerstandes, siehe Abb. 47) unterteilen lassen. Die leichte Neigung der Kristallin Oberkante in Richtung Nordosten wurde so nicht erwartet und stellt somit eine interessante neue Information für die geologische Gesamtinterpretation dar. Allerdings müssten für eine gesicherte Interpretation noch weitere Messungen mit entsprechender Zieltiefe erfolgen.

Auch Profil 3 (genaue Lage, siehe Abb. 48) zeigte eine relativ gute Datenqualität mit kaum notwendigen Datenfiltermaßnahmen, die über das übliche Maß hinausreichen. Die Interpretation (Abb. 49) der Oberkante des kristallinen Grundgebirges ist ebenfalls ähnlich eindeutig wie bei Profil 2. Der deutliche Kontrast zwischen Kristallin und Sedimentabfolgen dominiert, die Oberkante Kristallin scheint Richtung Norden anzusteigen (bei Betrachtung der Lage von Profil 2 und 3 kann dieser Anstieg durchaus schlüssig interpretiert werden) und in beiden Profilen zeichnet sich keine besondere Widerstandsstruktur in Zusammenhang mit der jeweils vermuteten tektonischen Störung ab.

Zu den drei Geoelektrikprofilen in Ortenburg muss angemerkt werden, dass alle drei aufgrund diverser Einschränkungen (Infrastruktur, Betretungserlaubnis, ...) keinen optimalen geradlinigen Verlauf aufweisen. Zwar ist der Einfluss auf das Inversionsergebnis diesbezüglich relativ gering, dennoch sollte versucht werden zu starke Abweichungen von der Geradlinigkeit zu vermeiden. Diese Problematik zeigt sich vor allem bei langen Messprofilen (> 1- 2 km), da selten Straßen, Forst- oder Feldwege zu finden sind, die über diese Länge einen geraden Verlauf aufweisen. Als Alternative bleibt die Auslage des Messprofils querfeldein, was aber bei diesen Auslagelängen oft mit einem sehr großen Aufwand hinsichtlich der Einholung der jeweiligen Betretungserlaubnis verbunden ist. Zudem stellen bei der Profillänge auch oft größere Straßen oder speziell Bahntrassen ein oft unüberwindliches Hindernis dar, um entsprechende Untergrundbereiche mit der Geoelektrik erfassen zu können.

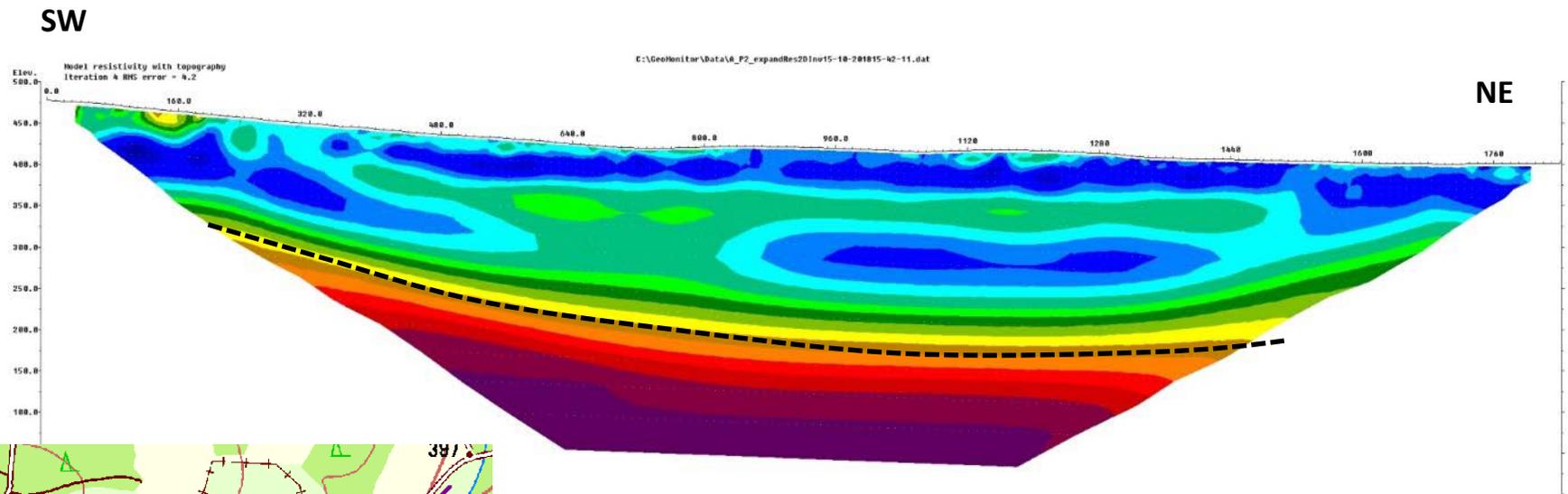


Abb. 46: Inversionsergebnis von Profil 2

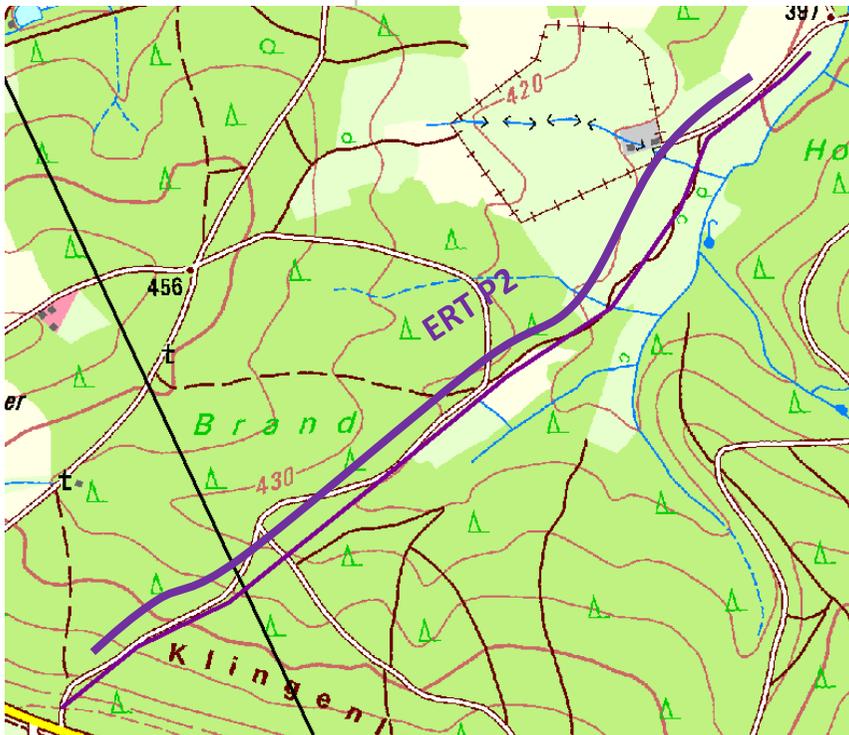


Abb. 47: Genauer Lageplan des Bereiches um Profil 2

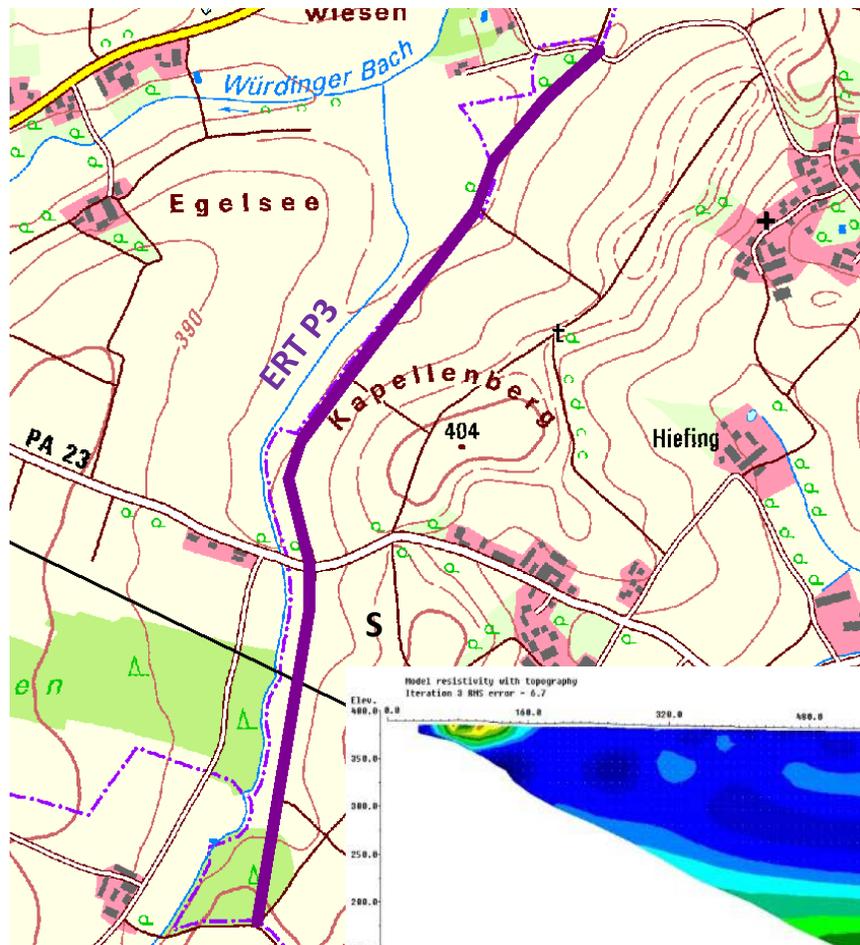


Abb. 48: Genauer Lageplan des Bereiches um Profil 3

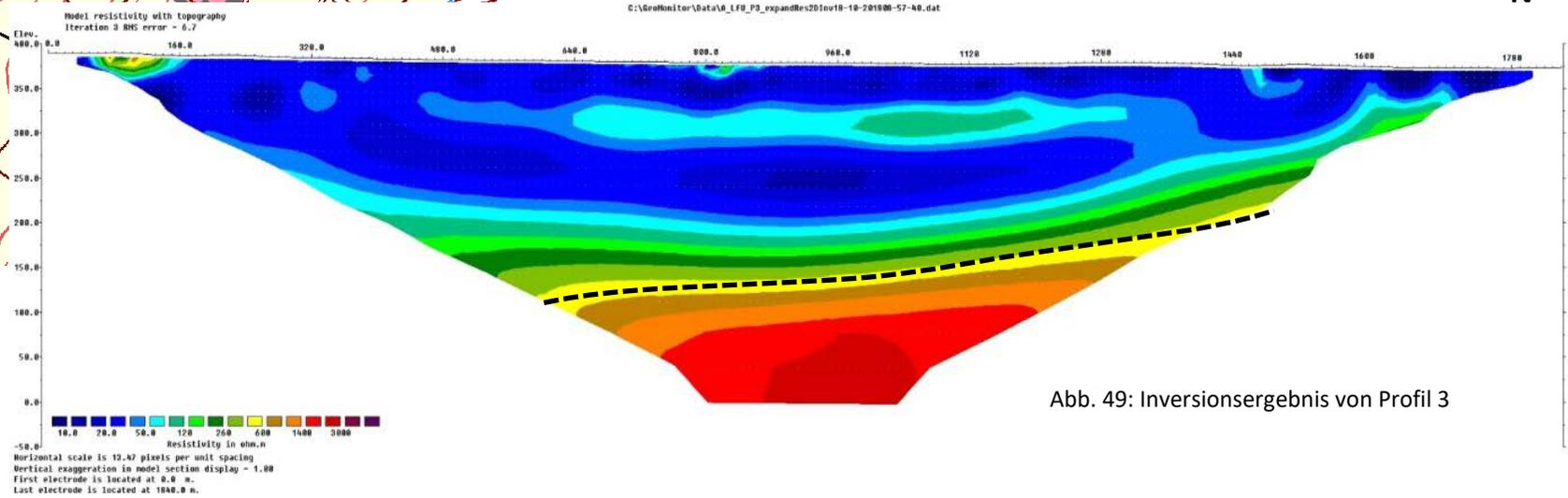


Abb. 49: Inversionsergebnis von Profil 3

2.10 Resümee Tiefe Geoelektrik

Als Resümee des Projektes ÜLG-75 können folgende Punkte für den Aspekt „lange Geoelektrikprofile für den tieferen Untergrundbereich“ summarisch angeführt werden:

1. Bei den vorliegenden Auslagelängen von ca. 2km ist entsprechend auf eine geradlinige Auslage zu achten, was oft entlang von vorhanden Straße/Wegen nicht möglich ist
2. Dadurch kommt es zu einem entsprechenden (Mehr)Aufwand bei der Verlegung der Geoelektrikprofile (Personal, Zeit)
3. Einschränkung bei der Auswahl der Lage des Profils durch Limitierung durch Bahn, Straßen, etc., Profillage muss an Situation angepasst werden
4. Störeinflüsse durch anthropogen Störeinflüsse/technische Einbauten wie Gasleitungen, Stromleitungen, Umspannwerke, Bahn, Straßen, verbaute Gebiete sind bei solchen Auslagelängen oft nicht zu vermeiden
5. die eingebrachte Stromstärke ist ein Qualitätskriterium für qualitativ hochwertige Daten, hängt größtenteils von der lokalen Situation ab

Trotz verkürzte Laufzeit wegen der Projektverlängerung des ÜLG76 Projektes konnte eine Vielzahl von geoelektrischen Profilen in unterschiedlichen geologischen Bedingungen gemessen und entsprechend analysiert und bewertet werden.

Um die Daten entsprechend zu analysieren, wurden zusätzlich Hilfsprogramme entwickelt, die die Rohdateneingabe in andere Softwarepakete erlaubt. So ist es nun möglich, das Rohdatenlogfile in ein für das Auswerteprogramm AGI EarthImager2D kompatibles Format für eine entsprechende Datenqualitätsanalyse einzulesen. Die Qualitätsanalyse mittels Proc_GM4D_2 wurde entsprechend weiterentwickelt, damit stehen verschiedene Datenanalysetools zur Verfügung.

Im Folgenden wird einerseits für die in den Punkten 1-5 angeführten Kriterien eine Bewertung der multigeoelektrischen Methode für Profillängen bis 2km (Gegenstand der praktischen Evaluierung in diesem Bericht) bzw. eine Abschätzung für Profillängen > 2km als Matrix angeführt. Zusätzlich wurde eine Bewertungsmatrix als Methodenvergleich geophysikalischer Verfahren zur Erkundung von tieferen Untergrundbereichen (> 500m) hinsichtlich mehrerer v.a. ökonomischer Kriterien entworfen.

		Geoelektrische Profile	
Auslagen		< 2km	> 2km
1+2	Aufwand	3-4	4
3	Positionierung	3	4
4	Störeinflüsse	2-3	3-4
5	Signal (Strom)	2	3

Tab. 10.: statistische

Bewertung Verfahren Geophysik für Tiefenexploration
Erkundung für tiefe Bereiche > 500m

	Geoelektrik	Seismik	Magnetotellurik	TDEM
Aufwand Personal	3-4	4-5	3	3
Aufwand Zeit	4	4-5	3	3
Aufwand Auswertung	2	5	3	3
Auflösung	3-4	2	5	3-4
Summe Kosten	3	4-5	3	3
Entwicklungskosten für GBA	3-4	5	3	3
Risiko für GBA	3-4	2-3	3	2-3

Tab. 11.: statistische

Bewertung 1-5			
		Auflösung, etc	Aufwand, Kosten
	1	sehr gut	wenig
	2	gut	mehr
	2-3		
	3	mittelmäßig	durchschnittlich
	3-4		
	4	weniger gut	viel
	4-5		
	6	sehr grob	sehr viel

3 Geoelektrische Messungen/Stollenmessungen

3.1 Einleitung/Ausgangslage

Der Ausgangspunkt für diese geoelektrischen Untersuchungen ist die in Abb. 50 dargestellte Situation, die in einem bestimmten Bereich des Hallstätter Hochtals anzutreffen und durch archäologische Ausgrabungen belegt ist. Zudem wurde im Zuge eines früheren geophysikalischen Projektes der sogenannte „Einsturztrichter“ (rot umrandeter Bereich in Abb. 50) an der Oberfläche mit einer standardmäßigen geoelektrischen Auslage von der Oberfläche aus als markante Widerstandsanomalie in diesem Bereich nachgewiesen. Um entsprechend verfüllte prähistorische Bergbaubereiche in größerer Tiefe nachweisen zu

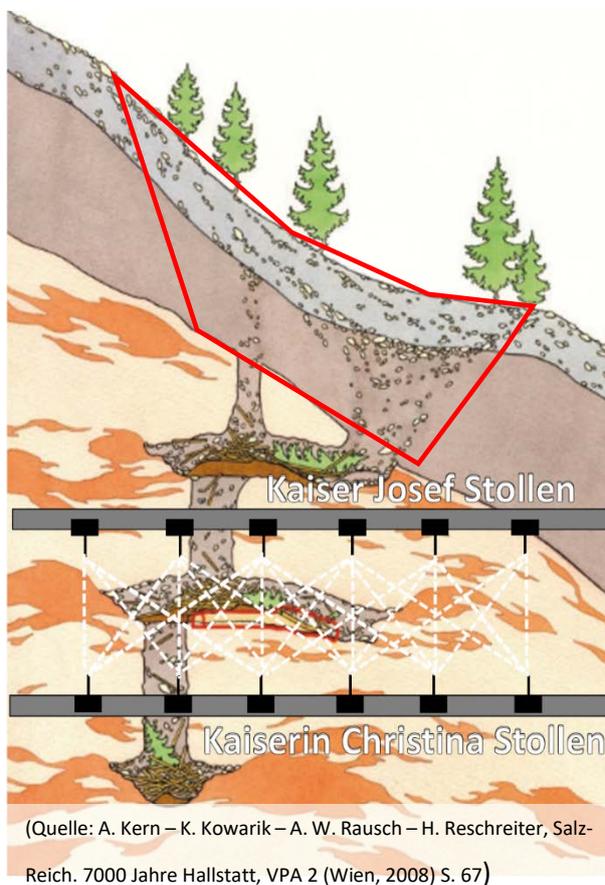


Abb. 50: Schematische Darstellung der Untergrundverhältnisse im Bereich des Untersuchungsgebietes im Hallstätter Hochtals, mittels Oberflächengeoelektrik nachgewiesener Bereich des Einsturztrichters (rot umrandet), mittels Stollenmessungen nachzuweisender Einsturzbereich (zwischen den Stollen)

können, muss die geoelektrische Messung direkt in den vorhandenen Bergwerksstollen durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde ein Stollenbereich zwischen Kaiser Josef- und Kaiserin Christina Stollen ausgewählt der von der messtechnischen Durchführung eine derartige Messung ohne zu großen logistischen Aufwand erlaubt. Hauptkriterium war hier, dass eine möglichst direkte Verbindung zwischen den beiden Stollen im relevanten Untersuchungsbereich besteht und somit eine relativ kurze Verbindung zwischen den beiden Profilabschnitten in den jeweiligen Ebenen zu bewerkstelligen war.

3.2 Vorarbeiten

In den Jahren 2014/2015 wurden erste Testmessungen in bestimmten Stollenabschnitten im Schaustollen des Salzbergwerks Hallstatt im Rahmen des Projektes ÜLG35 durchgeführt (siehe ÜLG35 Bericht Römer et. al, 2016 und ÜLG35 Bericht Römer et. al, 2018). Ziel war es, bei bekannten Lokationen Referenzwiderstände definierter Gesteinsbereiche zu erhalten. Gemessen wurde jeweils eine aus 13 Elektroden bestehende geoelektrische Sektion. Im Folgenden soll eine kurze Zusammenfassung der damaligen Ergebnisse gegeben werden.

In Abb. 51 ist die ungefähre Lage der Messstellen im Kaiserin Christina Stollen in einer schematischen Skizze der Stollen des Salzbergbaus Hallstatt eingetragen.

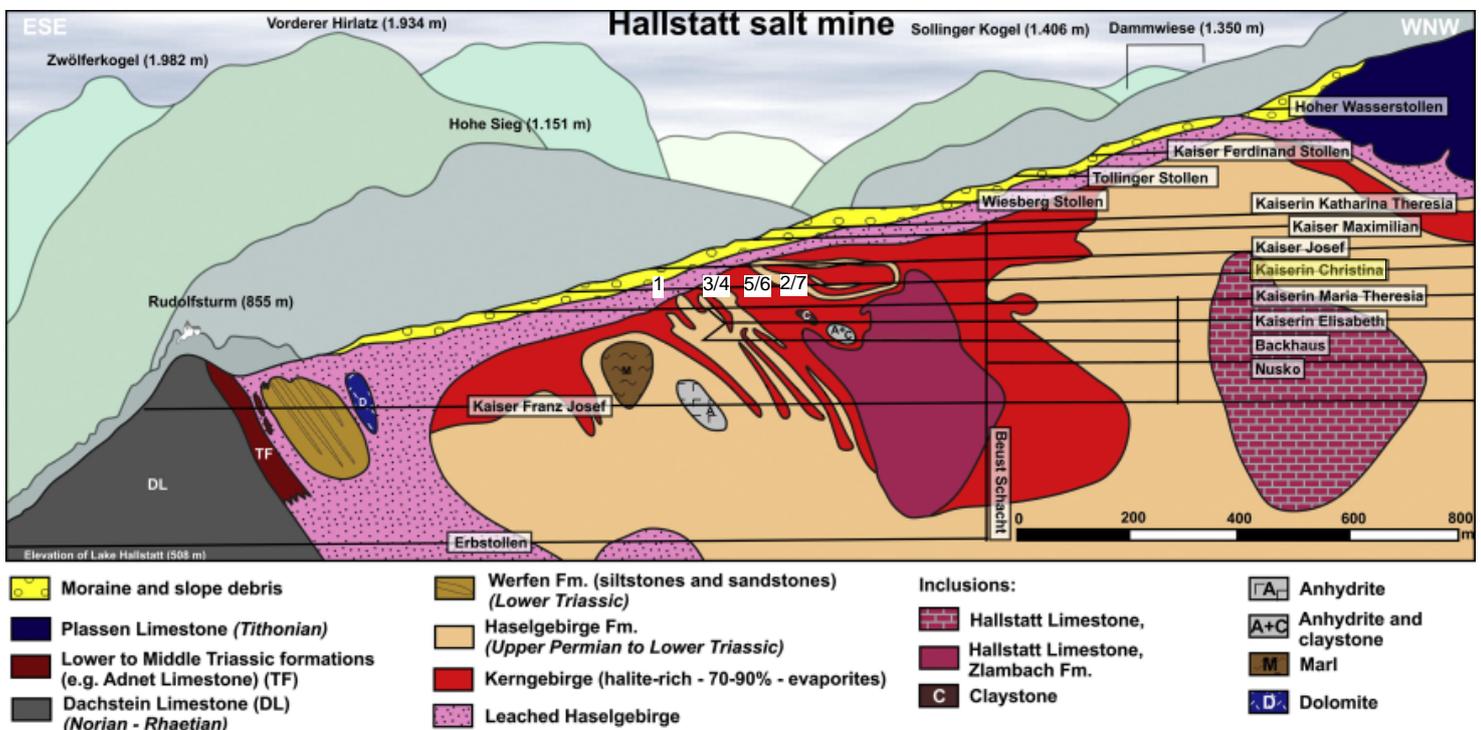


Abb. 51: ungefähre Lage der geoelektr. Profile im Kaiserin Christina Stollen (1 bis 7), Nummerierung siehe Tab. 5.2. (Abb. aus Schorn, Neubauer, Bernroider, 2013)

Abb. 52 zeigt die Lage der Stollenbereiche projiziert auf ein Orthofoto. In Abb. 53 ist ein Situationsfoto der Messungen im Stollen zu sehen.

Die Tab. 12 gibt einen statistischen Überblick der elektr. Widerstände der jeweiligen 7 Messstellen.



Abb. 52: Lage der Stollen auf Orthofoto



Abb. 53: Messung im Kaiserin Christina Stollen

	1	2	3	4	5	6	7
	ausgelaugtes Haselgebirge	archäologische Stelle 1	Haselgebirge 1	Haselgebirge 2	Salz1	Salz4	archäologische Stelle 2 Spanstelle
Average	1.86	1.08	98.24	103.42	191.69	351.78	3.16
Max	3.03	1.41	689.74	1015.90	665.25	856.87	5.03
Min	0.43	0.65	2.52	1.69	21.86	89.09	1.84
Max-Min	2.59	0.76	687.22	1014.21	643.39	767.78	3.20
StandAbw	0.75	0.22	20.99	209.86	163.45	259.34	0.80

Tab. 12.: statistische Parameter der geoelektr. Messungen, elektr. Widerstand [Ohm-m]

3.3 Methodik und Ergebnisse der verschiedenen Messkampagnen

Eine weitere geoelektrische Messkampagne wurde im September 2016 durchgeführt. Hauptziel dieser Messung war es zu verifizieren, ob die gewählte Methode für die geoelektrischen Messungen in Stollen unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen (geologische Situation, anthropogenen Störeinflüsse (Einbauten,...) überhaupt funktioniert bzw. einigermaßen zuverlässige Ergebnisse liefert. Eine grobe Übersicht der verschiedenen geoelektrischen Auslagen ist in Abb. 54 dargestellt. Pro Auslage wurden jeweils 45 Elektroden je Stollenabschnitt verwendet. Der Elektrodenabstand wurde mit 4 m festgelegt und von Auslage zu Auslage wurde der ganze Messaufbau um jeweils 16 Elektroden Richtung Stolleneingang (Richtung SO) verschoben.

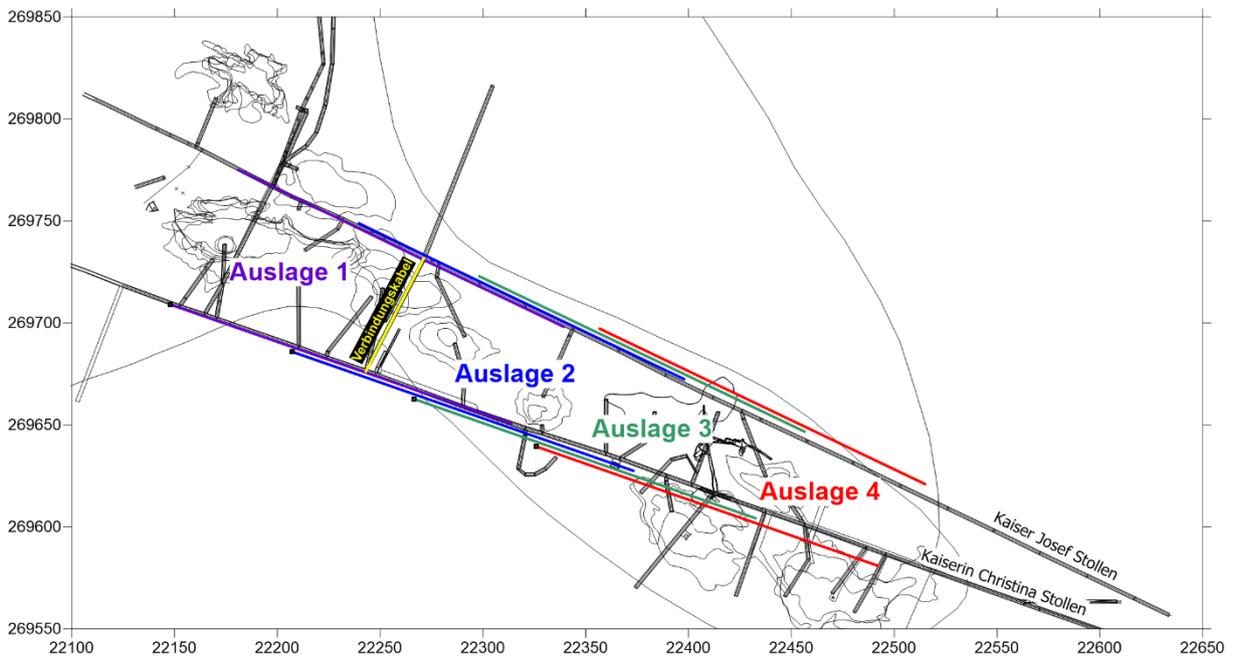


Abb. 54: Schematische Darstellung der geoelektrischen Auslagen

Nahezu alle Elektrodenpositionen mussten vorab gebohrt werden, um das Befestigen der Elektroden zu ermöglichen. Einerseits musste die Holzschalung des Stollens durchbohrt werden, andererseits lag größtenteils Festgestein vor. Nur in wenigen Bereichen konnte die Befestigung der Elektroden durch Einschlagen mittels Hammer bewerkstelligt werden. Im Kaiser Josef Stollen war die Installation der Elektroden am schwierigsten, da hier eine bis zu 70 cm dicke Steinmauerung zu durchbohren war. Die Bohrlöcher wurden mit einem Plastikrohr versehen, um einen direkten elektrischen Kontakt zwischen Elektrode und Steinmauer zu vermeiden, damit die Elektroden ausschließlich zum dahinterliegenden Gestein einen entsprechenden elektrischen Kontakt haben. Dies sollte mögliche Störeinflüsse minimieren. Da für diese Situation keine ausreichend langen Elektroden vorhanden waren, musste die Verbindung zum Messkabel über ein an die jeweilige Elektrode befestigtes Stahlseil bewerkstelligt werden (für Details zu dieser Installation siehe entsprechendes Foto in Abb. 55). Im Großen und Ganzen konnte so in den verschiedenen Bereichen der beiden Stollen ein zufriedenstellender elektrischer Kontakt zum umgebenden Gestein hergestellt werden. Alle Bohrlöcher wurden vorab von Mitarbeiterinnen bzw. Mitarbeitern des Naturhistorischen Museums Wien vorbereitet, sodass zum Zeitpunkt der Messkampagne nur an einigen Positionen mit der Bohrmaschine nachgearbeitet werden musste, um die Befestigung der Elektroden zu gewährleisten.

Eine weitere Herausforderung bei der Messung war die Wahl der Elektrodenkonfiguration. Neben der standardmäßigen Gradienten Anordnung, die im jeweiligen Stollen an den 45 Elektroden angewendet wurde, wurden auch sogenannte „crosshole“ Kombinationen verwendet. Hierfür wurden in Zusammenarbeit mit dem Kollegen K. Tsakirmpaloglou (Univ. Thessaloniki, Griechenland) verschiedene Konfigurationsvarianten auf Basis vorangegangener Modellrechnungen ausgewählt (Pole-Tripole, Bipole-Bipole,...).

Aufgrund der Messung mit verschiedenen Elektrodenkonfigurationen und der relativ starken Überlappung der 4 gewählten Auslagen, konnte eine sehr große Menge an Datenpunkten akquiriert werden. Vor allem im Überlappungsbereich der Auslagen (aber auch zwischen den unterschiedlichen Messkonfigurationen) liegen Doppel-, Dreifach- oder sogar Vierfachmessungen einzelner Messpunkte vor. Diese Mehrfachmessungen wurden für eine erste Datenqualitätsanalyse herangezogen, da davon ausgegangen werden kann, dass der entsprechende Messwert nur dann eine hohe Qualität aufweist, wenn er zeitlich einigermaßen konstant ist. Auf dieser Grundlage basierte die Zusammenführung der Daten aller Auslagen bzw. Konfigurationen, was bedeutet, dass nicht der Mittelwert der einzelnen Messpunkte verwendet wurde, sondern in Abstufungen die Daten der Auslage bzw.



Abb. 55: Situationsfotos zur Elektrodeninstallation; a) Elektrode im frei zugänglichen Festgestein (Christina Stollen), b) Elektrode im Festgestein mit durchbohrter Holzschalung (Christina Stollen), c) Situationsfoto im Josef Stollen, d) Detail der Elektrodenanbindung mit Stahlseil

Konfiguration mit der höchsten Datenqualität verwendet wurden. Nach der Zusammenführung wurde somit ein Datensatz mit etwa 16 000 Datenpunkten erstellt. Dieser Datensatz stellte die Grundlage für die weitere Dateninversion dar. Nach der ersten Dateninversion war schnell klar, dass weitere Filterschritte notwendig sind, um ein zufriedenstellendes Ergebnis bezüglich des rms-Fehler zu bekommen. Als erstes Filterkriterium wurde der Geometriefaktor der Elektrodenkonfigurationen gewählt. Hier hat sich gezeigt, dass relativ viele Datenpunkte mit sehr hohem Geometriefaktor vorhanden sind. Diese Punkte reagieren extrem sensibel auf kleinste Ungenauigkeiten in der gemessenen elektrischen Spannung und weisen somit eine hohe Unsicherheit auf. Hier wurde der Datensatz schlussendlich auf Datenpunkte mit einem Geometriefaktor kleiner als 4000 beschränkt. Im Weiteren wurde der Datensatz auch um die Messpunkte reduziert, bei denen zwischen der Vorwärts- und Rückwärtsmessung der Spannung ein Messeffekt von weniger als 5 mV vorhanden war. Die schlussendliche Wahl der beiden Schwellenwerte für die Filterung basierte auf einer Vielzahl von bewerteten Inversionsergebnissen, wodurch natürlich eine subjektive Beurteilung des Ergebnisses zweifellos vorhanden ist. Der finale Datensatz, der für die Inversion verwendet wurde umfasste schlussendlich etwa 9500 Datenpunkte. Die

Inversion erfolgte mit dem Programm DC2DPRO, wobei mit der automatischen rms-Datenfilterung eine weitere Reduktion um 1000 Datenpunkte durchgeführt wurde. Somit beruht das finale Inversionsergebnis, das für die Interpretation verwendet wurde auf etwa 8500 Messpunkten.

Das Inversionsergebnis aus zwei verschiedenen räumlichen Perspektiven ist in Abb. 56 dargestellt.

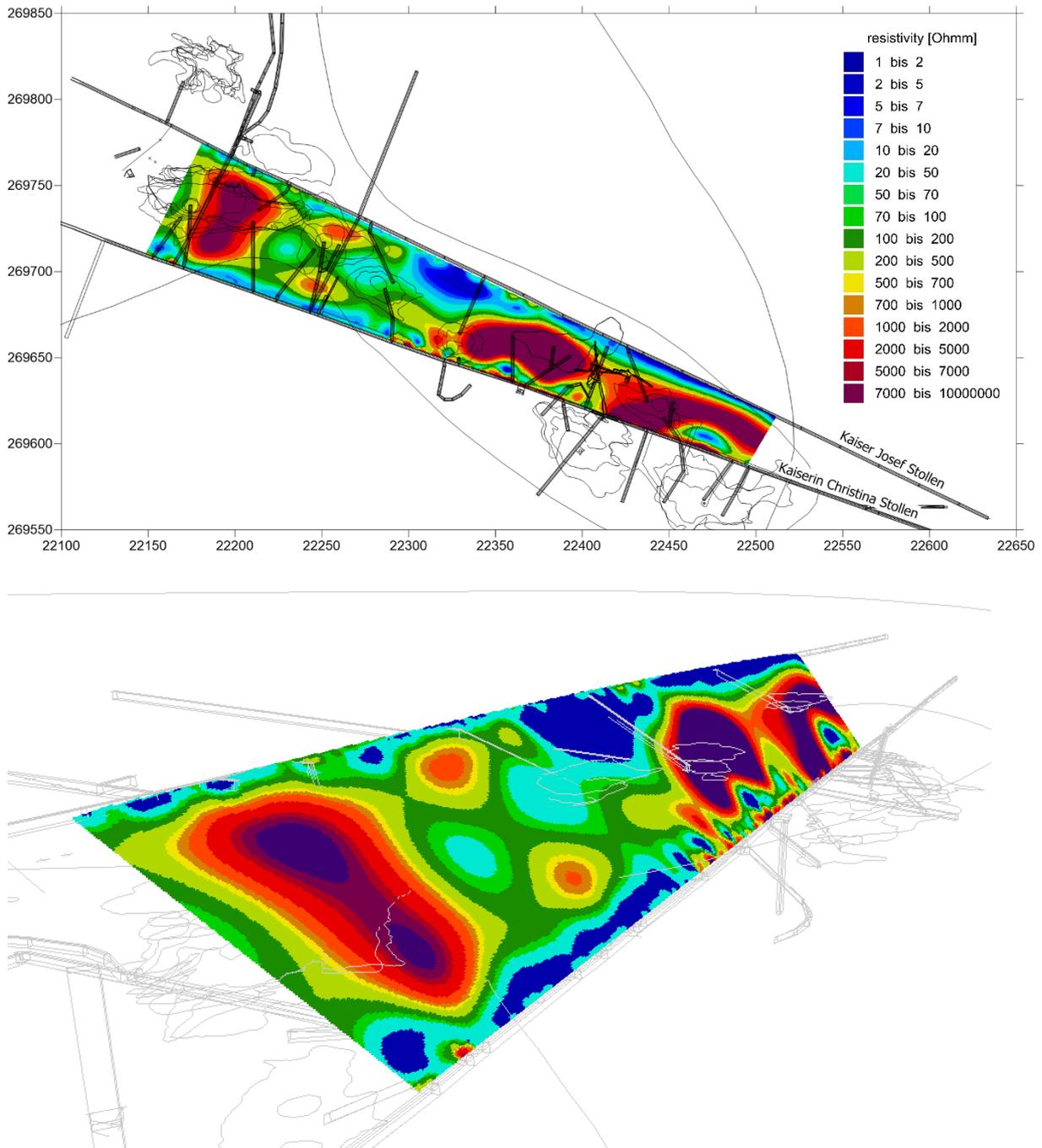


Abb. 56: Model des spezifischen elektrischen Widerstandes für den Bereich zwischen den beiden Stollen als Inversionsergebnis der geoelektrischen Messdaten als Aufsicht (oben) und als 3D- Schrägsicht (unten)

Als erster Punkt muss herausgestrichen werden, dass die erfolgte geoelektrische Messung in dieser Form und unter diesen speziellen Bedingungen (extrem hohe Widerstandskontraste in Verbindung mit der speziellen Elektrodengeometrie) zum ersten Mal durchgeführt wurde und in diesem Sinn als Testmessung zu werten war. Dennoch konnten Daten in ausreichender Qualität akquiriert werden. Eine Schlussfolgerung war, dass eine weitere Optimierung/Verbesserung der gewählten Messkonfigurationen für weitere Messungen im Stollen notwendig ist.

Im Zuge der Vorbereitungen bzw. der Vorbegehung für diese Messkampagne war unklar, inwiefern sich die diversen Einbauten in den Stollen (Metalleitungen, Metallverstreben, usw.) auf die geoelektrische Messung auswirken werden – in diesem Punkt machen die Messergebnisse deutlich, dass dieser Einfluss mit relativ großer Sicherheit eher gering ist, da ansonsten keinerlei Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstandsmodell und bekannten geologischen bzw. anderen bekannten Strukturen zu erwarten wäre.

Generell zeigt das erhaltene Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes eine sehr starke Dynamik. Es zeichnen sich einige großräumige Anomalien (hoher und niedriger spez. elektr. Widerstand) ab, die größtenteils mit der bekannten geologischen Situation erklärbar sind. Vor allem im Nahbereich der beiden Stollen können einige kleinräumige Anomalien diversen abzweigenden Stollensystemen oder auch anderen Bergwerkseinrichtungen zugeordnet werden. Es ist zu beachten, dass die Auflösung des Untergrundes mit der Entfernung zum jeweiligen Stollen abnimmt, wodurch das ausschließliche Auftreten dieser kleinräumigen Anomalien im Nahbereich der Stollen erklärbar ist. Vor allem im Nahbereich des Christina-Stollens können größere Bereiche mit eher höheren bzw. niedrigeren spez. elektr. Widerstandswerten aufgrund der offenen Bauweise (Beurteilung der teilweise offenen Stollenwände), gut den dokumentierten jeweiligen geologischen Bedingungen zugeordnet werden (Kalkstein, Steinsalz, hoher Tonanteil, usw.). Die Bauweise des Josef-Stollens verhindert eine derartige Interpretation des spez. elektr. Widerstandes im Stollennahbereich, allerdings kann hier vor allem der Bereich mit sehr niedrigen spez. elektr. Widerstand in Richtung Stollenausgang auf die bereits unmittelbare Nähe zum ausgelaugten Haselgebirge erklärt werden.

Die Detailinterpretation der einzelnen Anomalien des spez. elektr. Widerstandes mit Archäologen des Naturhistorischen Museums zeigte, dass eine recht hohe Übereinstimmung mit bekannten Untergrundstrukturen zu erzielen ist. Dennoch blieben einige Fragen bei der Interpretation offen. Nach mehreren Gesprächen mit Kollegen Dr. Jung-Ho Kim (KIGAM) war klar, dass bei den verwendeten Elektrodenkonfigurationen noch Verbesserungspotenzial vorhanden ist. Die gewählten Konfigurationen führen nämlich zu einem relativ starken sogenannten „current channeling“, ein Effekt an den Tunnelwänden, der zu einer starken Beeinflussung der Messwerte führt – im Prinzip liefern die Messpunkte mit einem starken „current channeling“ Effekt kaum Informationen über Bereiche des Untergrundes, die etwas weiter von der Tunnelwand entfernt sind (unabhängig von der Elektrodengeometrie). Aufgrund dieser Informationen und der Tatsache, dass dieses Projekt im Juni 2017 begonnen

hatte, wurde eine Folgekampagne für das 2. Halbjahr 2017 geplant. Schlussendlich musste diese Messkampagne auf 2018 verschoben werden.

Die zweite Messkampagne der Stollenmessungen Hallstatt wurde vom 20. bis 24. August 2018 durchgeführt. Ziel dieser Messung war es vorrangig die Methode der Geoelektrik in diesem speziellen Zusammenhang (Stollen-Stollen-Messung) weiterzuentwickeln und entsprechend belastbarere Ergebnisse für eine Interpretation zu bekommen. Neben dem relativ hohen logistischen Aufwand (Distanz der interessanten Bereiche zum Stolleneingang, Installation der Elektroden,...) war es für diese Messsituation auch notwendig, eine eigens angepasste Messkonfiguration zu entwickeln – basierend auf den Erfahrungswerten der ersten Messkampagne 2016. Abb. 57 skizziert (vereinfacht) den gewählten Messablauf für die erste von drei Auslagen mit entsprechend definierten Referenzelektroden. Diese Art der Messkonfiguration (pole-pole-Konfiguration) wird vor allem für Bohrlochmessungen empfohlen, da im Vergleich zur 4-Punktanordnungen, die einer Wenner oder Schlumberger Konfiguration entsprechen, der „current channeling“ Effekt verhindert bzw. minimiert wird.

Der Messaufbau und Messablauf war unter den gegebenen Umständen relativ kompliziert und wird hier anhand von Abb. 57 im Detail beschrieben. Vorab ist zu erwähnen, dass für die Installation der Elektroden die noch von der Messkampagne 2016 vorhandenen Bohrlöcher verwendet werden konnten. Lediglich im Verbindungsstollen sowie im Bereich der Potenzial-Referenzelektroden mussten weitere Bohrlöcher gebohrt werden. Der Elektrodenabstand im Verbindungsstollen wurde auf 3 m festgelegt (16 Elektroden), wodurch der etwa 70 m lange Verbindungsstollen nur im zentralen Bereich mit Elektroden bestückt war. Wie in Abb. 57 dargestellt, wurden die Elektroden 48 und 96 als Potenzial Referenzelektroden verwendet. Diese beiden Elektroden wurden auch für alle weiteren Auslagen positionsmäßig nicht verändert. Entsprechende Verbindungskabel gewährleisteten hier den elektrischen Kontakt zum Messgerät. Als Referenzelektrode für die Stromspeisung diente die Elektrode mit der Nummer 49, welche in unmittelbarer Umgebung des Stolleneinganges positioniert wurde und auch während der gesamten Messkampagne ortsfest war. Der Messablauf gestaltete sich nun so, dass jeweils eine Pole-Pole Messung mit den zwei unterschiedlichen Potenzial-Referenzelektroden durchgeführt wurde. Diese beiden Messungen wurden im Folgenden unter Verwendung der Elektroden im Verbindungsstollen wiederholt. Hier wurden natürlich die Elektroden von Kabel 5 im Josef Stollen so positioniert, dass kein elektrischer Kontakt zum Untergrund vorhanden war und das Kabel in gewisser Weise nur als Verbindungskabel diente. Auf diese Weise wurden pro Auslage jeweils 4 Pole-Pole Datensätze produziert, wobei natürlich eine gewisse Redundanz in Kauf genommen wurde – diese konnte im Nachhinein auch als Hinweis für die Zuverlässigkeit der jeweiligen Datenpunkte herangezogen werden.

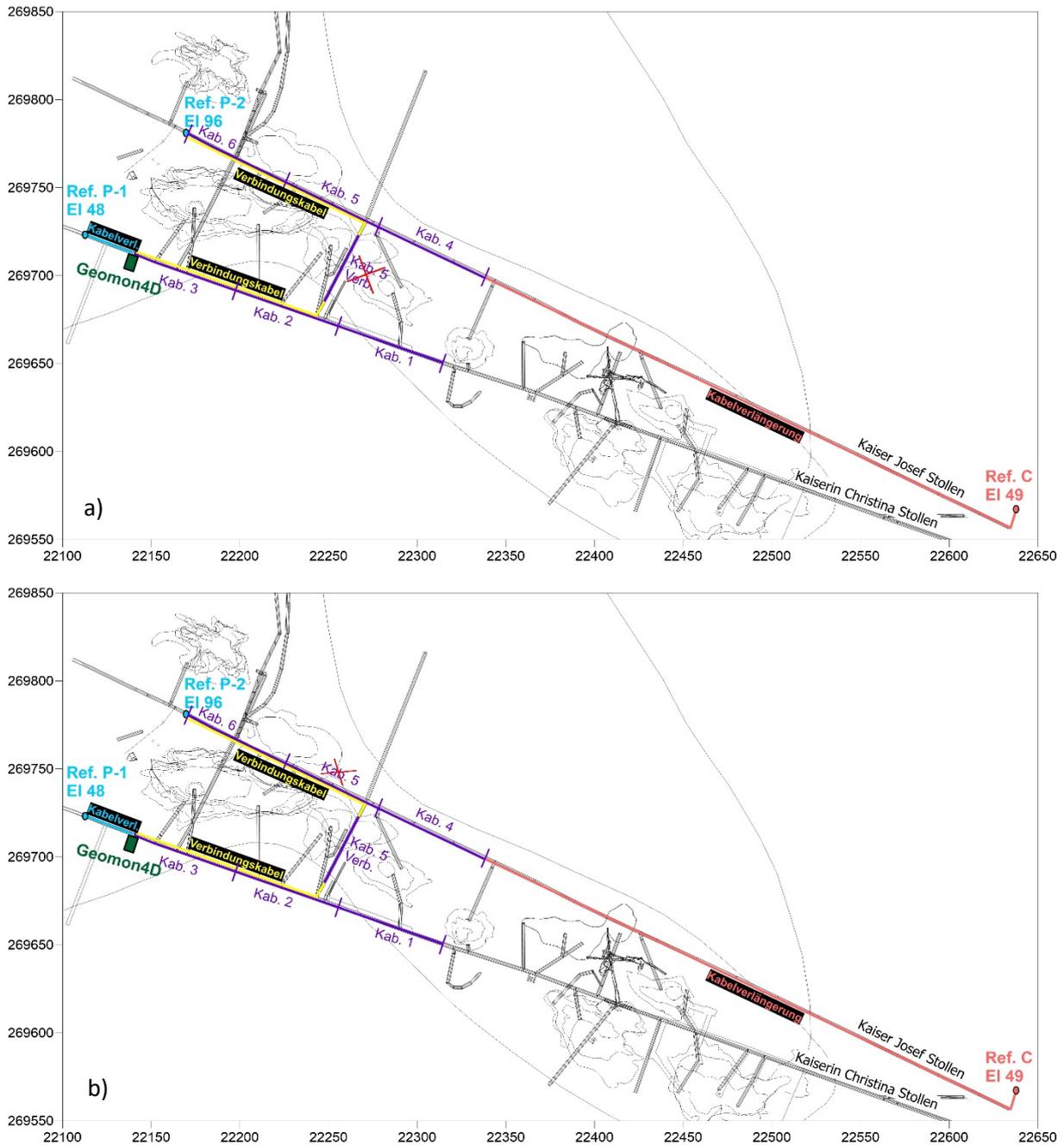


Abb. 57: Skizzenhafte Darstellung des Messaufbaus bzw. Messablaufs für die erste Auslage; a) ohne Elektroden im Verbindungsstollen, b) mit Elektroden im Verbindungsstollen aber ohne Kabel 5 im Josef Stollen

Bedenkt man den großen logistischen Aufwand der hinter jeder dieser Auslagen bzw. des unterschiedlichen Messaufbaus der einzelnen Auslagen steckt, ist der zeitliche Mehraufwand bei der Messung, der durch die Wiederholung der einzelnen Messpunkte zustande kommt, vernachlässigbar. Zu bedenken ist auch, dass vor allem bei der ersten Auslage (Abb. 57) die Bedingungen für eine Pole-Pole Konfiguration nicht sehr gut erfüllt sind, da die Potenzial Referenzelektroden viel zu nahe (Christina Stollen 30 m, Josef Stollen 4 m (normaler Elektrodenabstand)) an dem eigentlichen Messprofil liegen. Per Definition müssten diese Referenzelektroden im Unendlichen liegen. Ein größerer Abstand konnte aufgrund der Gegebenheiten im Stollen nicht realisiert werden. Bei allen weiteren Auslagen, wo das

Messprofil Richtung Stolleneingang verschoben wurde, konnte die theoretische Vorgabe für die Pole-Pole Messung deutlich besser erfüllt werden. Als Konsequenz dieser nicht optimal eingehaltenen Voraussetzungen für eine Pole-Pole Messung, kann vor allem für die erste Auslage ein etwas stärkerer Effekt des „current channeling“ angenommen werden.

Abb. 58 und Abb. 59 zeigen die 2 weiteren Auslagen, die bei der Messkampagne 2018 nach dem gleichen Schema wie die erste Auslage abgearbeitet wurden. Aufgrund der zeitlichen Einschränkung (fast ein ganzer Messtag konnte wegen eines Waldbrandes in der Echernwand nicht genutzt werden) wurde die Auslage 3 nicht gemessen, was aufgrund der starken Überlappung der einzelnen Auslagen nur eine geringe Auswirkung auf die Auflösung des Untergrundes hat. Deutlich wichtiger war es die volle Ausdehnung des vorbereiteten Messbereiches abzudecken.

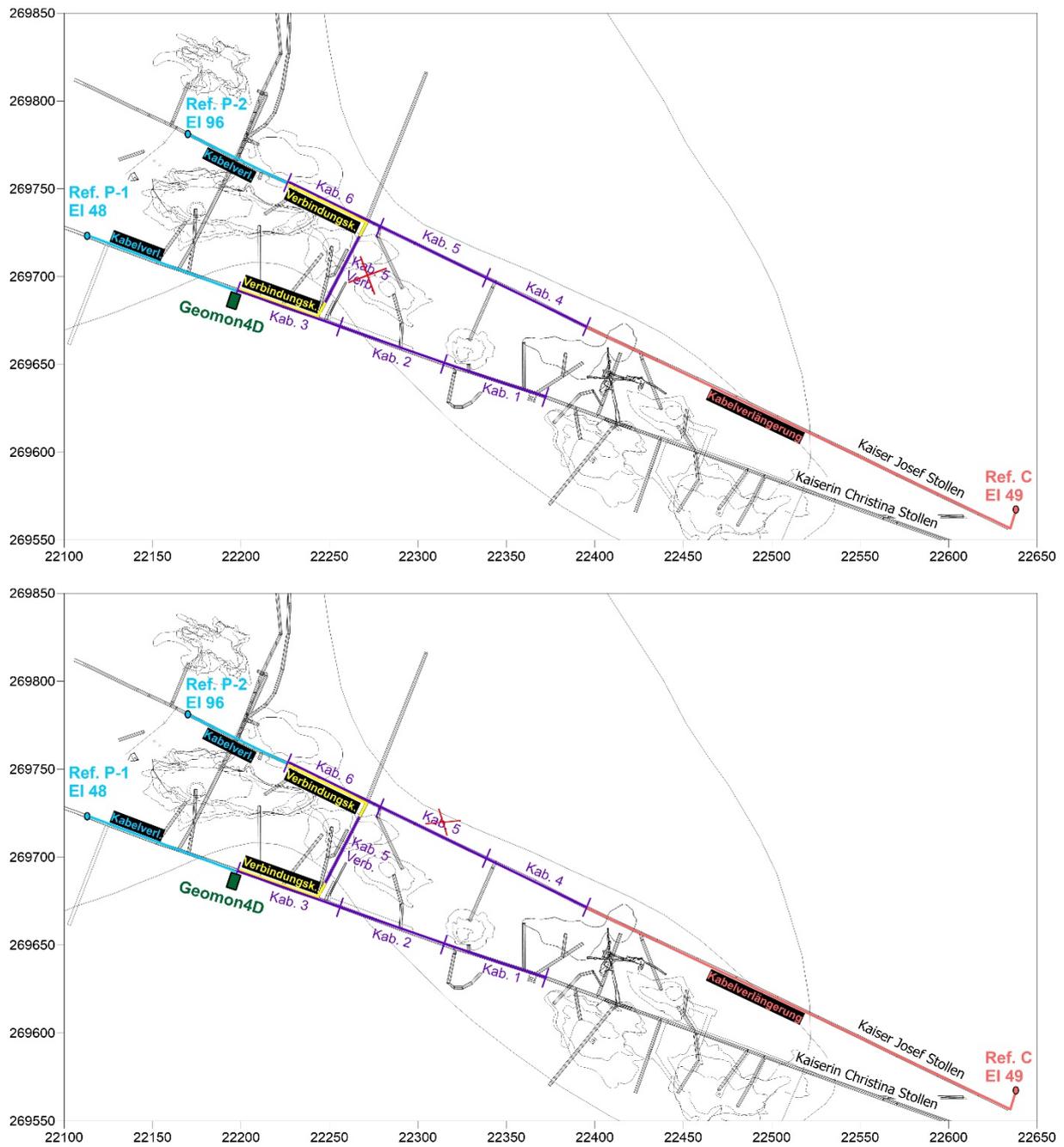


Abb. 58: Skizzenhafte Darstellung des Messaufbaus bzw. Messablaufs für die Auslage 2; a) ohne Elektroden im Verbindungsstollen, b) mit Elektroden im Verbindungsstollen aber ohne Kabel 5 im Josef Stollen

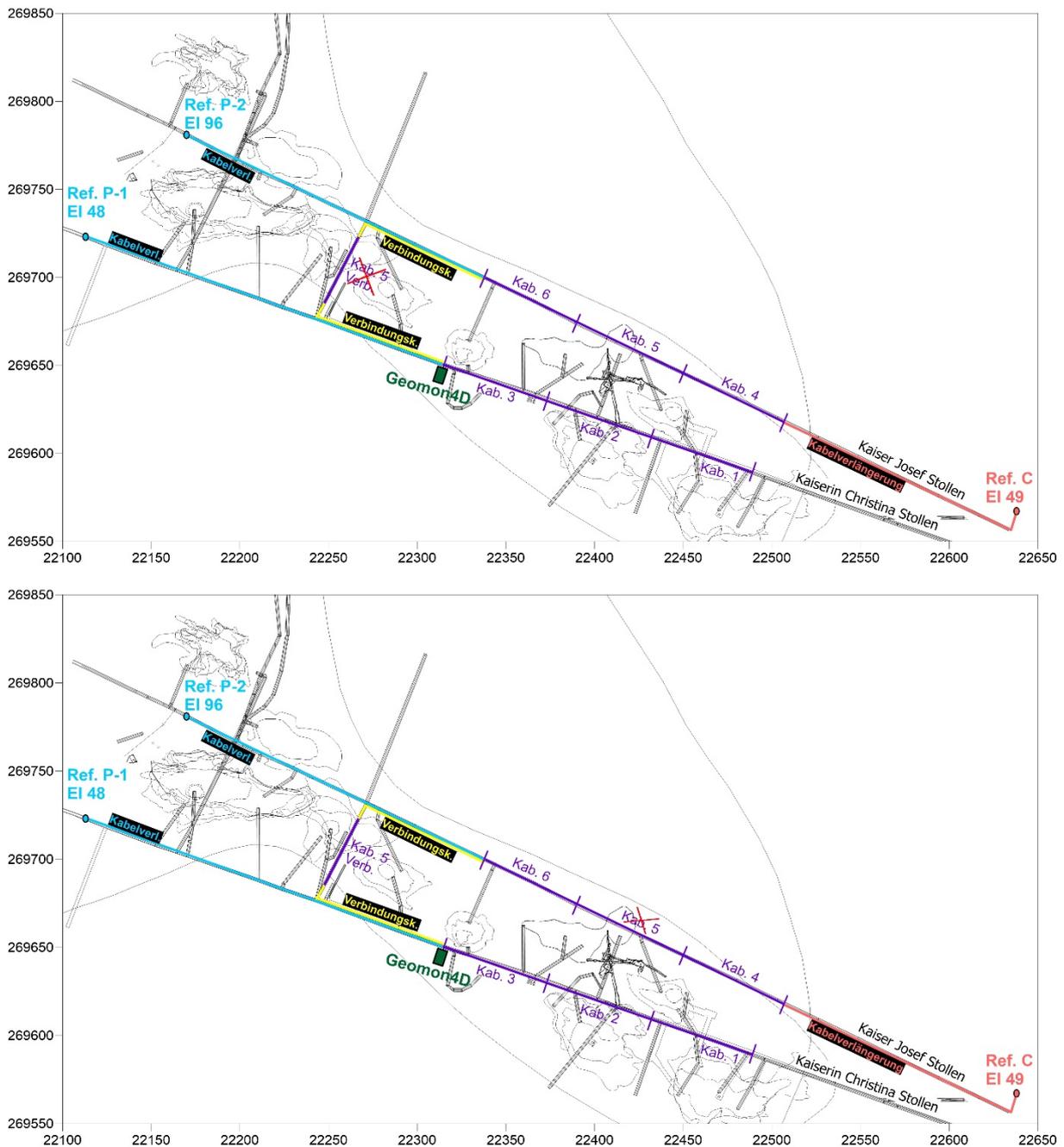
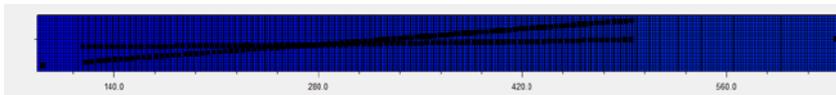


Abb. 59: Skizzenhafte Darstellung des Messaufbaus bzw. Messablaufs für die Auslage 4; a) ohne Elektroden im Verbindungsstollen, b) mit Elektroden im Verbindungsstollen aber ohne Kabel 5 im Josef Stollen

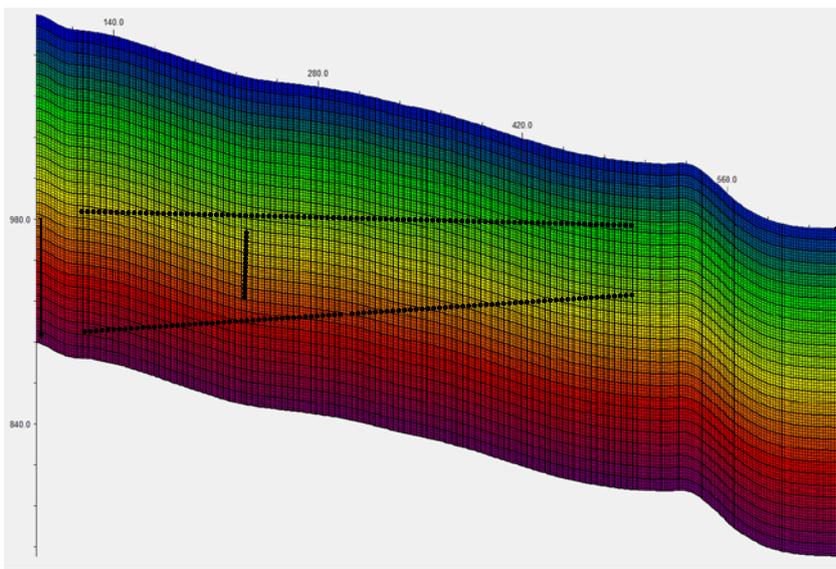
Die Daten dieser Messkampagne wurden mit der vom KIGAM entwickelten Software DC3DPro verarbeitet. Da die Elektrodenpositionen dreidimensional sind, wäre die einfachste Methode die Daten mit einer 3D-Inversion auszuwerten. Allerdings lässt sich leicht belegen, dass die dreidimensionale Bildgebung in dieser Art von Stollen-Stollen Messung unter Berücksichtigung der Messgeometrie und der Abdeckung des Untergrundes nicht geeignet ist. Daher ist die zweidimensionale Bildgebung zu bevorzugen. Die zweidimensionale Betrachtung hat jedoch ein generelles Problem bei der Elektrodenpositionierung, sodass im Allgemeinen Elektroden nur auf die geoelektrische-Abbildungsebene projiziert werden können, um eine zweidimensionale Abbildung zu implementieren. Dieser Ansatz kann das Problem der

Elektrodenpositionierung jedoch nicht vollständig vermeiden, daher muss die Implementierung der realen Elektrodenkoordinaten bei der zweidimensionalen Abbildung genauer betrachtet werden. Hier wird eine dreidimensionale ERT-Inversionssoftware mit zweidimensionaler Untergrund-Parametrisierung verwendet. Als Ergebnis wird so eine zweidimensionale Abbildung des Widerstandsmodells mit dreidimensionalen Elektrodenpositionen erreicht.

Abb. 60 zeigt die Elektrodenpositionen und die inverse Modellparametrisierung, die bei der Datenverarbeitung verwendet werden. Wie im oberen Bild gezeigt, wurden die Koordinaten der zwei Stollen so transformiert, dass sie einen nahezu vertikalen 2D-Schnitt bilden. Die ursprünglichen Koordinaten wurden zunächst um 25 Grad gegen den Uhrzeigersinn gedreht (Drehung um die z-Achse), so dass der obere Stollen parallel zur x-Achse ausgerichtet ist. Nach dieser Koordinatentransformation wurde eine weitere Drehung von 55,5 Grad um die x-Achse angewendet, um den unteren Stollen mit dem oberen auszurichten. Wie in der Abb. 60 zu sehen ist, verläuft der obere Stollen nahezu parallel zur x-Achse, während der untere Stollen eine leichte Abweichung von der x-Achse zeigt. Im x-z-Vertikalschnitt sind alle Elektroden mit Finite-Element-Grid und inverser Blockstruktur dargestellt. Bei dieser inversen Modellparametrisierung wird die Unterfläche in viele Blöcke in der xz-Ebene unterteilt, während der inverse Block entlang der y-Richtung keiner Diskretisierung unterzogen wird, wie in der yz-Ebene gezeigt. Dies ist die Annahme einer zweidimensionalen inversen Modellstruktur im 3D-ERT-Inversionsprogramm.



(a) x-y section



(b) x-z section

(c) y-z section

Abb. 60: Modellparametrisierung für das zweidimensionale Inversionsverfahren der Stollen-Stollen Messung (a-c Darstellung unterschiedlicher Ansichten)

Mit der in Abb. 60 dargestellten Modellparametrisierung wurden die ERT-Daten unter Verwendung des DC3DPro-Programms invertiert, um ein zweidimensionales Widerstandsmodell zu erhalten. Abb. 61 zeigt ein Widerstandsmodell, das auf der Inversion eines Datensatzes mit Pole-Pole-Konfiguration beruht. Das obere Bild (a) entspricht dem Inversionsergebnis für den Pole-Pole-Datensatz mit Potenzial Referenzelektrode an der Elektrodennummer 48. Beim unteren Inversionsergebnis (b) wurden zusätzlich Messdaten mit der Potenzial Referenzelektrode an der Elektrodennummer 96 berücksichtigt. Die beiden Ergebnisse zeigen eine relativ gute Übereinstimmung, wodurch von einer grundsätzlichen Plausibilität der gemessenen Daten ausgegangen werden kann.

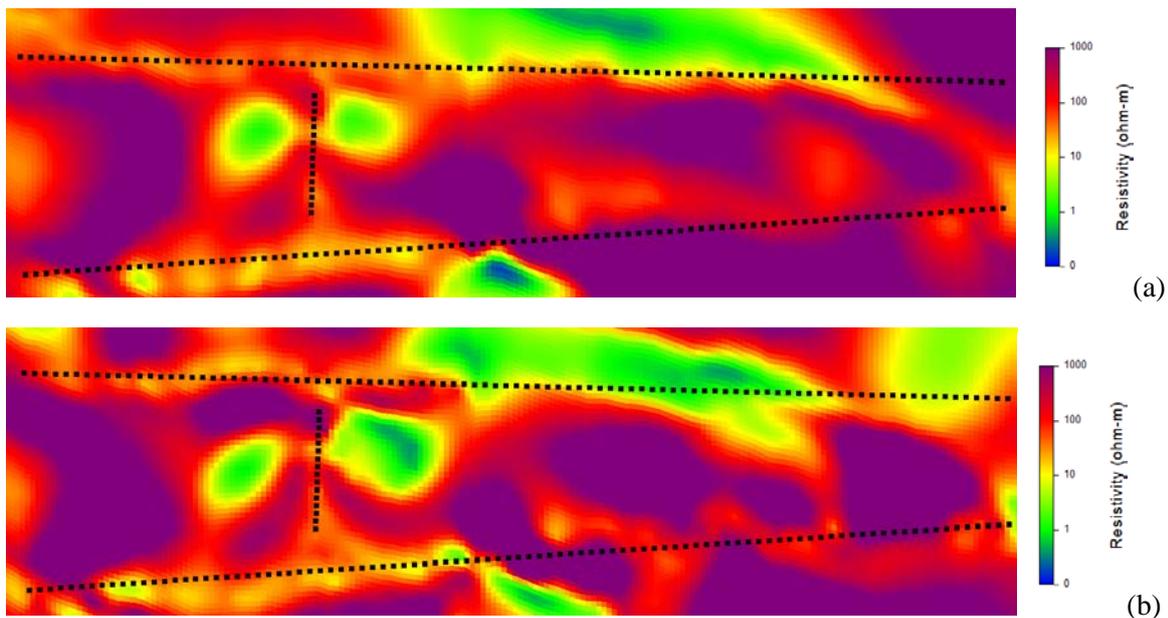


Abb. 61: Inversionsergebnis der Stollen-Stollen Daten (Josef Stollen – Christina Stollen) auf Basis der Pole-Pole Elektrodenkonfiguration, a) Potenzial Referenzelektrode im Christina Stollen, b) Potenzial Referenzelektrode im Josef-Stollen

Abb. 62 zeigt eine mögliche Interpretation des Inversionsergebnisses anhand vorliegender Information in diesem Bereich des Untergrundes. Die weißen Rechtecke entsprechen bekannten Laugwerken. Zwei dieser Laugwerke zeigen vor allem in unmittelbarer Umgebung zum Verbindungsstollen sehr ausgeprägte Anomalien des spez. elektr. Widerstandes (kleiner als 10 Ohm). Im unteren Stollen wird der eher niedrigere spez. elektr. Widerstand entlang des ersten Stollenabschnittes als Material mit höherem Tongehalt interpretiert. Der Bereich mit niedrigen spez. elektr. Widerstand im oberen Tunnel wird dem Einfluss des darüber liegenden ausgelaugten Haselgebirges zugeschrieben.

Eine gewisse Überprüfung der Ergebnisse erfolgte dahingehend, dass die Daten der Messung von 2016 und der Messung 2018 kombiniert ausgewertet wurden. Hier zeigt sich (Abb. 63), dass nur geringfügige Änderungen des Modells durch die Kombination mit dem alten Datensatz zustande kommen. Diese gute Reproduzierbarkeit deutet auf eine zufriedenstellende Datenqualität hin. Es bedeutet auch, dass bereits die Messung 2016 die

groben Strukturen im Untergrund abbilden konnte. Zweifellos zeigt die im Jahr 2018 gewählte Messkonfiguration deren Vorteil für die vorliegende Fragestellung und dass die zusätzlichen Elektroden im Verbindungsstollen zu einer verbesserten Auflösung des Untergrundes in diesem Bereich geführt haben.

Schließlich zeigt Abb. 64 eine 3D-Visualisierung der ERT-Bilder mit realen Elektrodenpositionen. Dieses Bild dient zur Überprüfung der positionsmäßigen Ausrichtung der Ergebnisse und gibt ein besseres Verständnis für deren Lage im 3D Raum. Zwischen den beiden Ergebnissen gibt es vor allem im oberflächennahen Bereich signifikante Unterschiede. Diese sind im Prinzip zu ignorieren, da aufgrund des Messaufbaues kaum Informationen über diesen Bereich in den Messdaten vorhanden sind – für die 3D-Darstellung und das allgemeine Verständnis der Lage macht die Darstellung aber Sinn. Für ein umfassendes Ergebnis (Bereich bis zur Geländeoberfläche) wäre eine entsprechende Messung zwischen oberem Tunnel und Oberfläche notwendig.

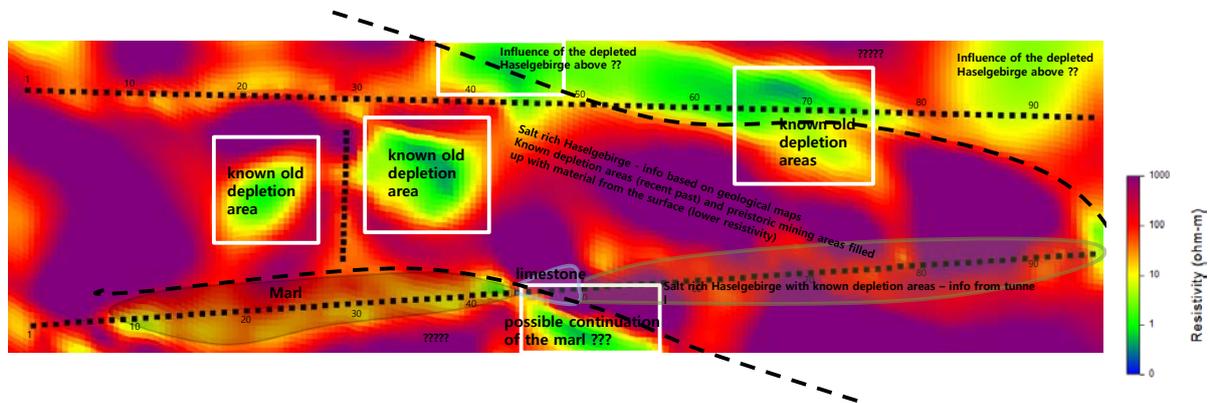


Abb. 62: Interpretation des Stollen-Stollen Inversionsergebnisses anhand bekannter Untergrundstrukturen

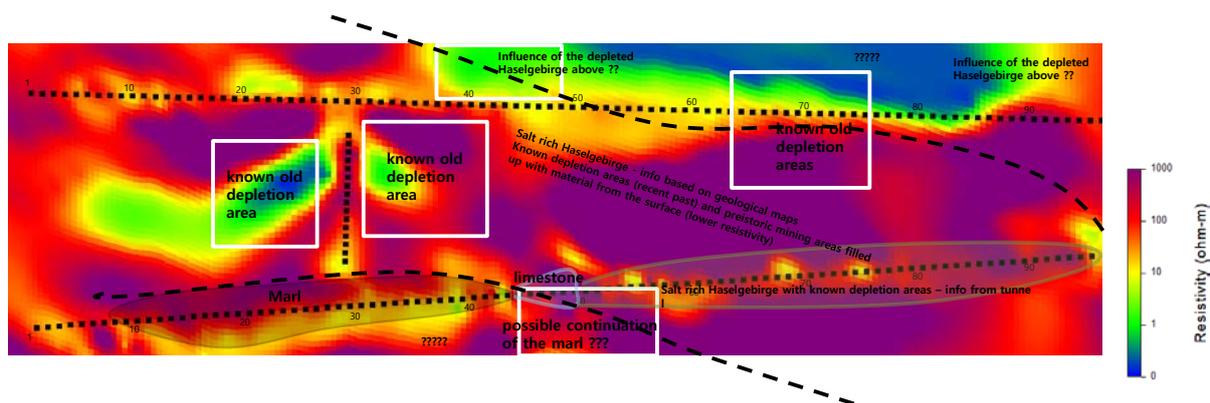


Abb. 63: Inversionsergebnis auf Basis aller verfügbaren geoelektrischen Daten (2016 und 2018) inklusive Interpretation der Ergebnisse laut Abb.61

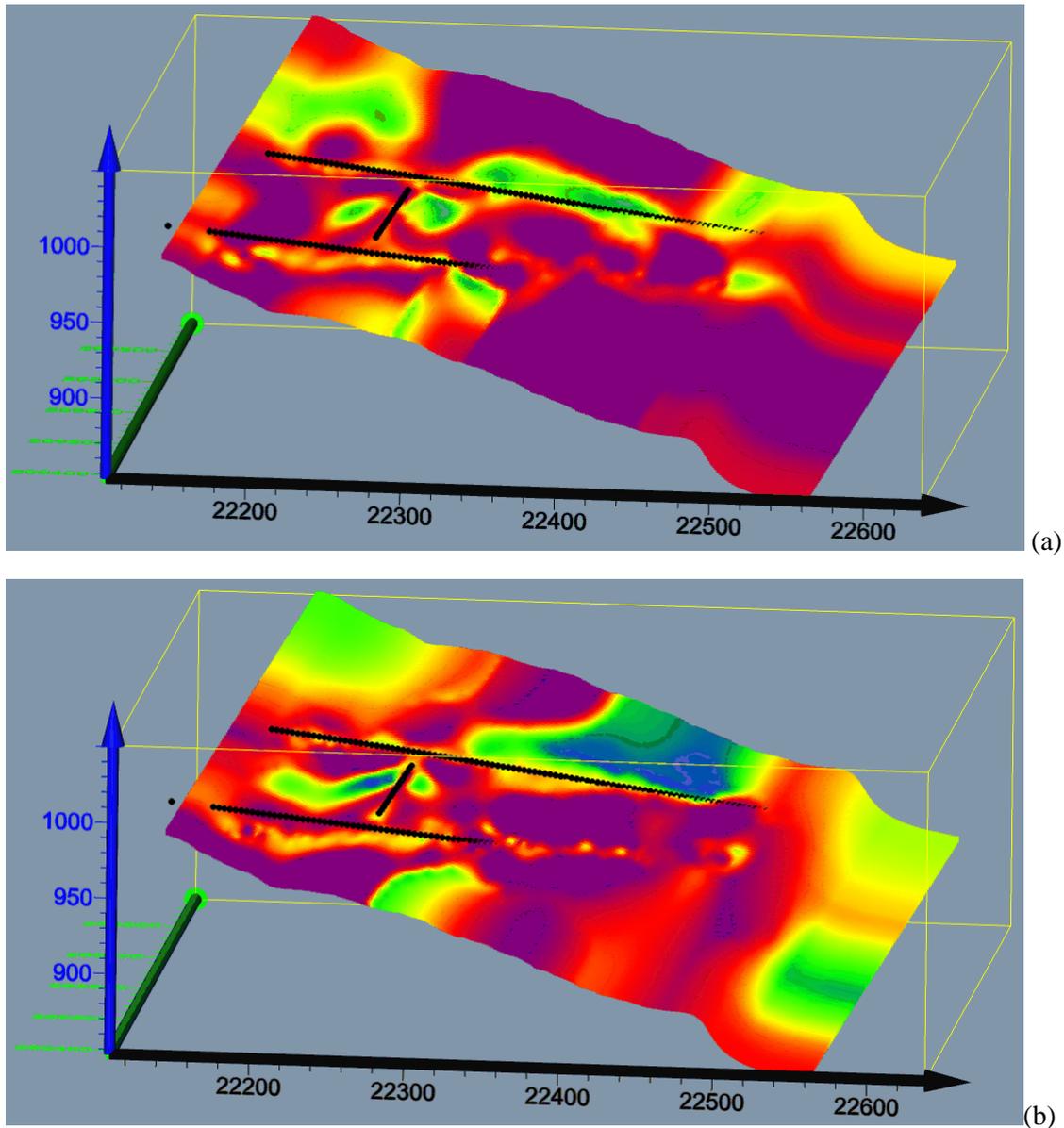


Abb. 64: 3D-Visualisierung der Inversionsergebnisse basierend auf den Daten der Messkampagne(n) (a) 2018 und (b) 2016+2018

Obwohl die Inversionsergebnisse bekannte archäologische Bereiche als Widerstandsanomalien ausweisen, ist eine intensivere Diskussion für eine Detailinterpretation erforderlich, da im ERT-Bild Artefakte auftreten können. Mögliche Ursachen für Artefakte können die zum Teil vorhandenen Schienen und andere Einbauten (Rohrleitungen, Pfähle, ...) sein, die Stützstrukturen oder allgemeine Funktionen für den Betrieb des Stollens bilden. Anhand der vorhandenen Zusatzinformationen in dem untersuchten Untergrundbereich, lässt sich der Einfluss diverser Störungen abschätzen. Diese sollte im Zuge der genauen Interpretation der einzelnen Anomalien erfolgen. Die erste grobe Interpretation der Ergebnisse zeigt diesbezüglich, dass der Großteil der Anomalien geologisch interpretiert werden kann, was für einen eher geringen Einfluss der vorhandenen Einbauten spricht. Nichts desto trotz stellen vor allem die in vielen Bereichen relativ leitfähigen Tunnelwände ein Problem für die Messung dar, da dadurch ein sehr geringer Messeffekt mit

einem ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis zustande kommt. Zwar wurde mit der gewählten Messkonfiguration (Pole-Pole) dieser Effekt minimiert, dennoch stellt er für die Datenqualität das größte Problem dar.

Die Stollen-Stollen-Messung hat mit einem weiteren Problem zu kämpfen und zwar dahingehend, dass der Stollenhohlraum selbst zu gewissen Fehlern in den Daten führt – der Hohlraum selber wird bei der Inversion nicht berücksichtigt (normalerweise erfolgen solche Messungen zwischen zwei Bohrlöchern wo der Bohrlochdurchmesser zu vernachlässigen ist). Um dieses Problem zu verifizieren, wurde eine entsprechende 3D-Modellierung durchgeführt, die gezeigt hat, dass auch mit dem vorhandenen Stollendurchmesser kaum nennenswerte Effekte für die Messdaten zu erwarten sind, vor allem wenn der Stollen von einer leitfähigen Schicht umgeben ist. Dies trifft allerdings nur auf einen Teil der vorliegenden Auslage zu, da vor allem im oberen Kaiser Josef Stollen eine leitfähige Schicht aufgrund der gemauerten Stollenwände nicht zu erwarten ist. Dadurch muss hier ein gewisser (schwer quantifizierbarer) Fehler in der Auswertung und damit in den schlussendlichen Ergebnissen angenommen werden.

Die in den Jahren 2016 und 2018 durchgeführten Stollen Messungen haben auf den Untergrundbereich zwischen Christina- und Josef-Stollen fokussiert. Dementsprechend wurden die zwei Messprofilteile jeweils im Christina- und Josef-Stollen installiert. Nach der durchgeführten Datenauswertung der Messkampagne 2018 wurde klar, dass es für die Datenauswertung und -interpretation von großem Vorteil wäre, wenn der Untergrundbereich zwischen Josef-Stollen und Geländeoberkante möglichst genau bekannt wäre. Zwar sind in diesem Bereich auch einige Messprofile der Oberflächengeoelektrik vorhanden, allerdings reicht hier weder die Auflösung noch die erzielte Eindringtiefe, um eine optimale Interpretation der Messdaten der Stollen Messungen von 2016 und 2018 zu ermöglichen. Zudem soll durch die detaillierte Aufnahme des Untergrundbereiches zwischen Josef-Stollen und Geländeoberkante auch versucht werden archäologische Fragestellungen im Nahbereich des Josef-Stollen zu klären. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden wurde die im Folgenden beschriebene Messauslage gewählt.

Abb. 65 zeigt alle in verschiedenen Konstellationen verwendeten Elektrodenpositionen der Messkampagne 2019. Die in Pink dargestellten Elektroden befinden sich im Josef-Stollen, die in Gelb dargestellten sind an der Oberfläche installiert. Die Position der Oberflächenelektroden wurde so gewählt, dass ein Teil so exakt wie möglich über dem Josef-Stollen positioniert war und der andere Teil (südlicher Teil) etwa 50 m dazu parallel verschoben wurde. Dies entspricht in etwa der senkrecht auf die Geländeoberkante projizierten Position des Christina-Stollens. Mit den beiden Profilteilen an der Oberfläche konnte auch in gewissem Maße eine 3D-Information über den Untergrundbereich zwischen Stollen und Oberfläche gewonnen werden. Zu den in Abb. 65 dargestellten Elektrodenpositionen kommen noch zwei Referenzelektroden (Strom und Potenzial), die für die hier gewählte Messkonfiguration (Pole-Pole) notwendig sind, hinzu.

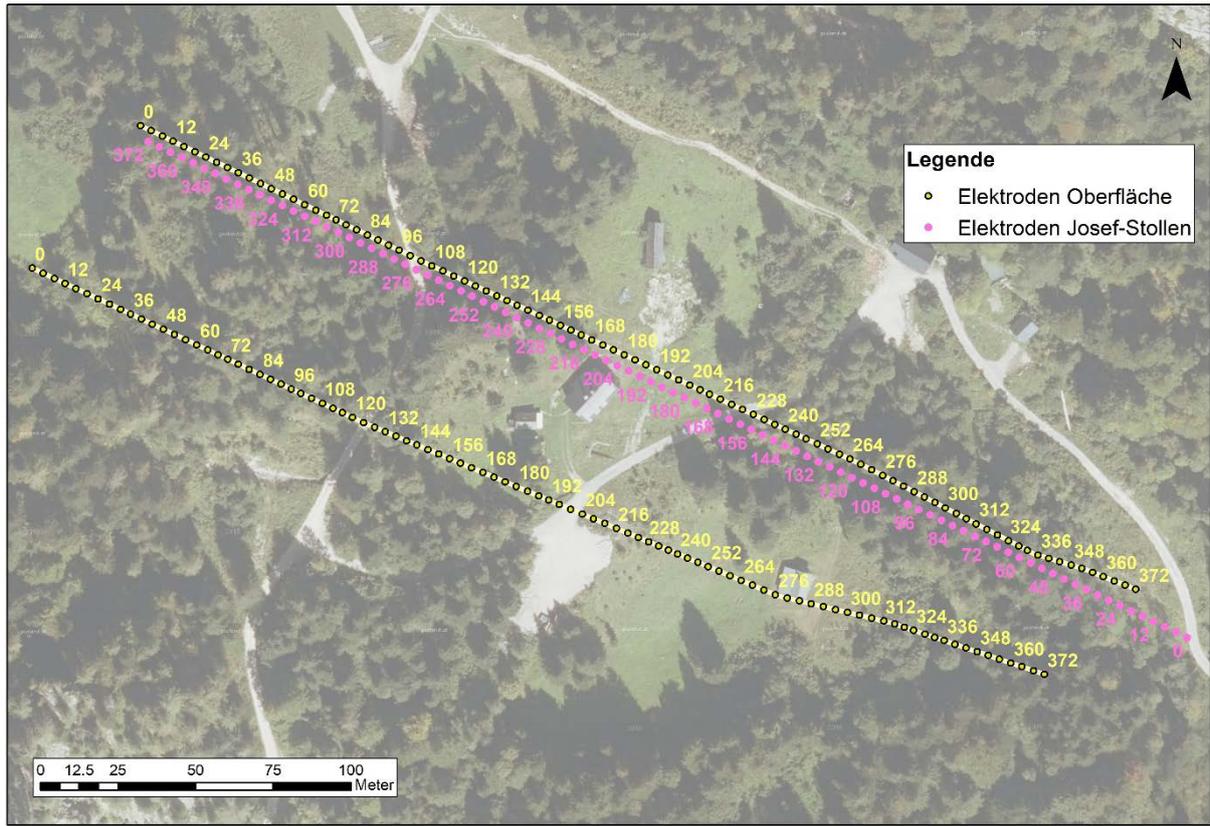


Abb. 65: Lageplan mit den schlussendlichen Elektrodenpositionen für alle durchgeführten Kombinationen der Messauslagen

In den Abbildungen 66 – 69 sind alle verwendeten Auslagekonfigurationen dargestellt. Unter Berücksichtigung, dass die skizzierten Auslagekonfigurationen für beide Oberflächenprofile gelten, kommen in Summe 8 unterschiedliche Auslagekonfigurationen zustande. Für jede Konfiguration wurden mindestens 5000 Messpunkte gemessen. Entsprechend dem zeitlichen Ablauf der Messkampagne wurden einige Messkonfigurationen auch über Nacht gemessen. In diesen Fällen (12 Stunden Zeit für die Messung) wurden die Messesequenzen mehrere Male wiederholt, um so, anhand der Reproduzierbarkeit der einzelnen Messpunkte, auch ein gewisses Maß für die Datenqualität zu bekommen. Wie an den detaillierten Angaben in den Skizzen von Abb. 66 – 69 zu sehen ist, war der Aufwand beim Aufbau der Messanordnung relativ groß, da große Distanzen (vor allem zu den Referenzelektroden) mit Verlängerungskabeln überwunden werden mussten.

Die akquirierten Daten wurden mit einer detaillierten Beschreibung an die Kollegen vom KIGAM übermittelt, die das Datenprozessing und die Auswertung übernommen haben. Im Zuge dessen wurden auch die Daten der Oberflächenprofile angefordert, die in der Gesamtauswertung (Messdaten von 2016, 2018 und 2019) mitberücksichtigt wurden.

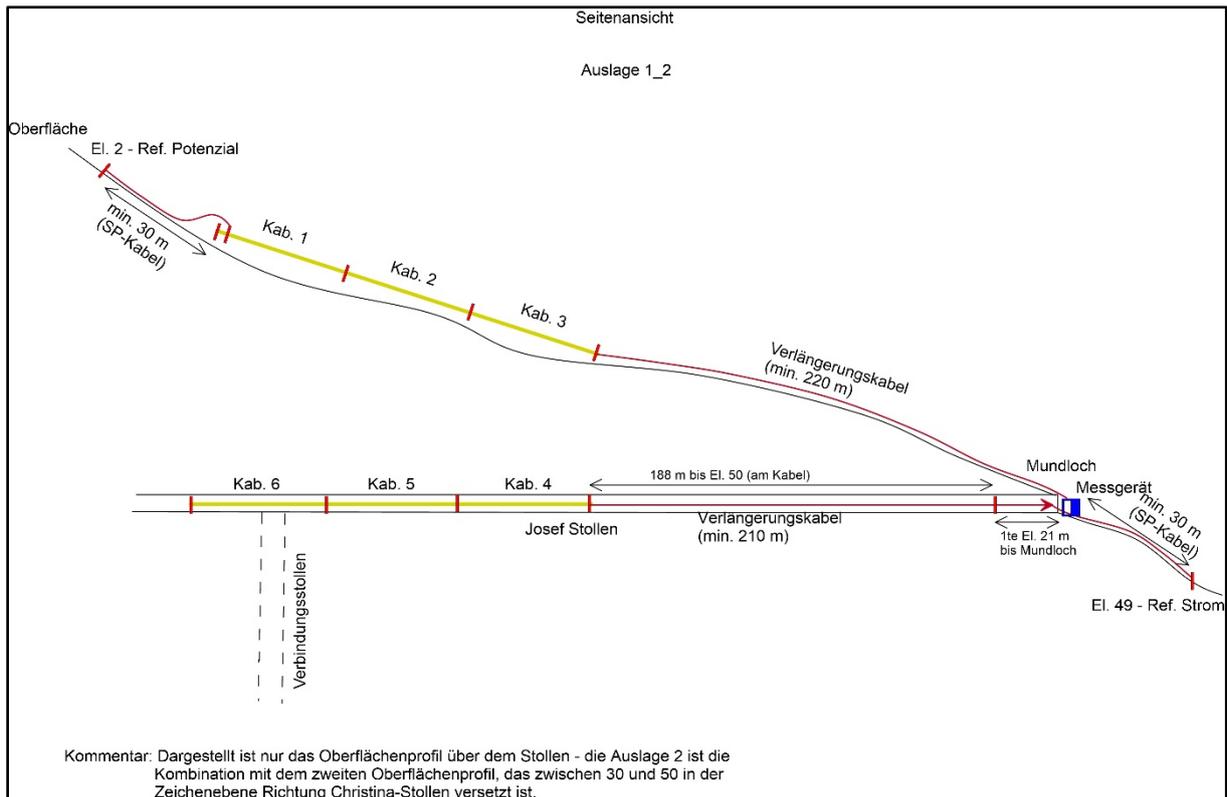


Abb. 66: Schematische Skizze der „Basismesskonfiguration“ (Seitenansicht – Tiefenschnitt) mit detaillierte Beschreibung

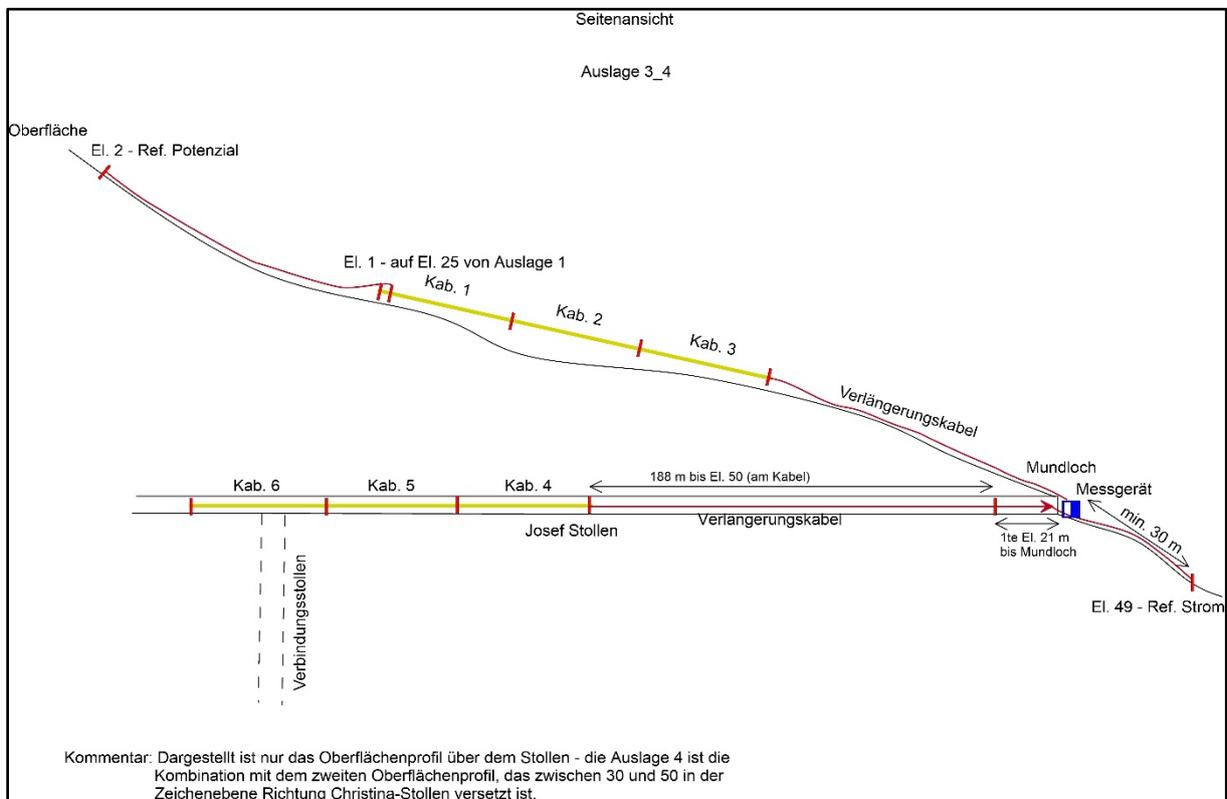


Abb. 67: Schematische Skizze der „Roll1messkonfiguration“ (Seitenansicht – Tiefenschnitt) mit detaillierte Beschreibung

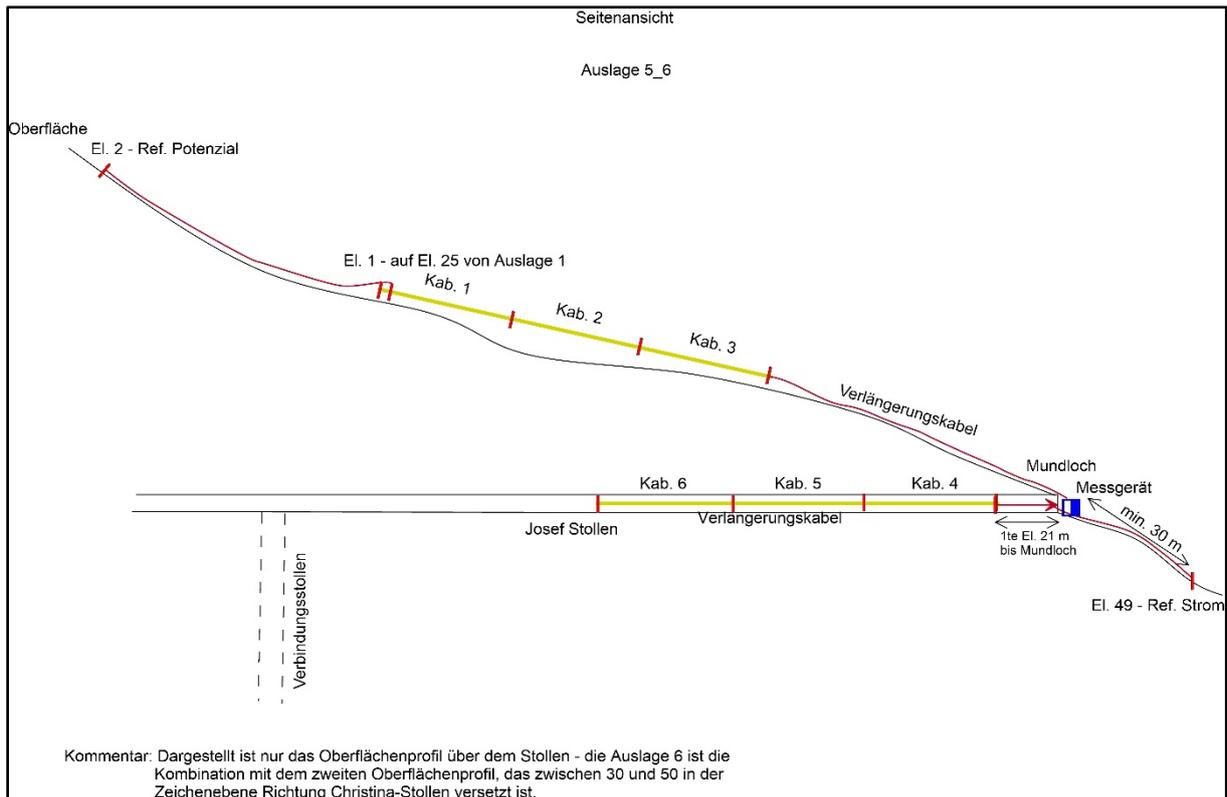


Abb. 68: Schematische Skizze der „Roll2messkonfiguration“ (Seitenansicht – Tiefenschnitt) mit detaillierte Beschreibung

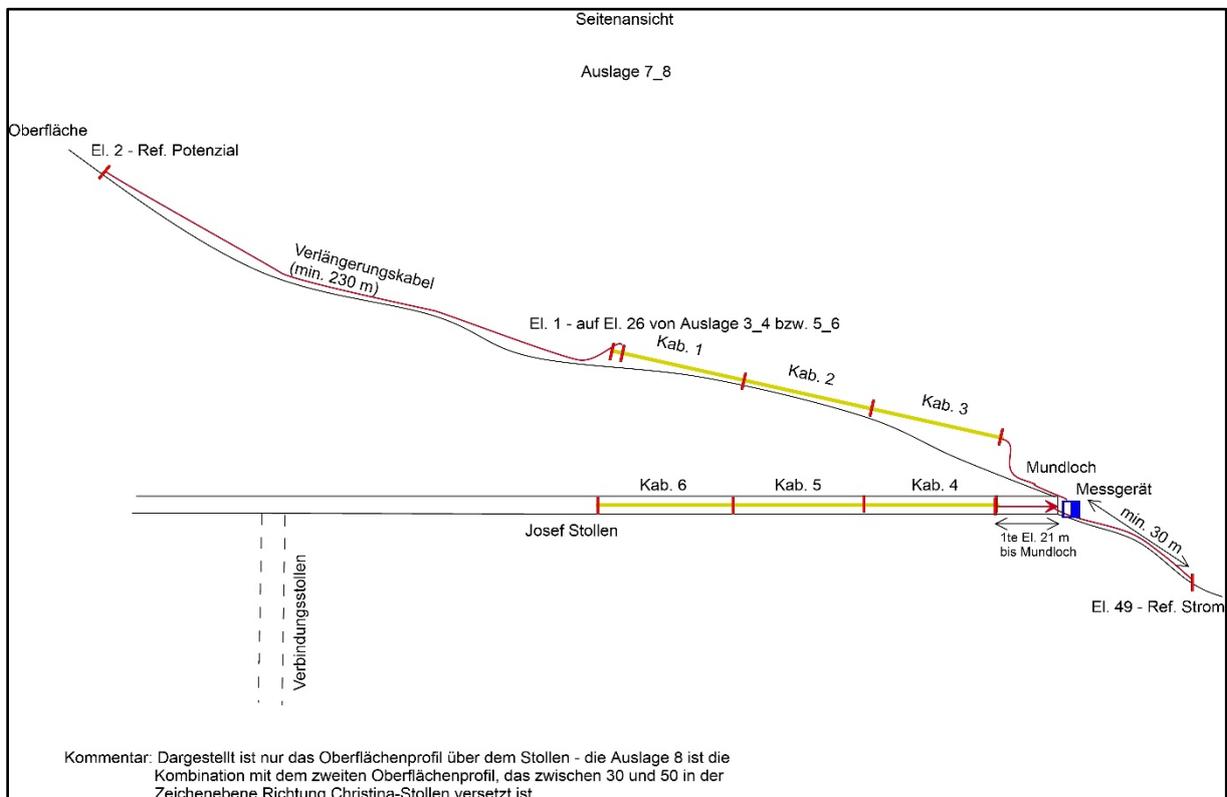


Abb. 69: Schematische Skizze der „Roll3messkonfiguration“ (Seitenansicht – Tiefenschnitt) mit detaillierte Beschreibung

Das schlussendliche Ergebnis der Dateninversion (Messdaten von 2016, 2018, 2019 und den entsprechenden Oberflächenprofilen) stellt einen 3D-Block mit entsprechender Verteilung des spez. elektr. Widerstandes dar (siehe Abb. 70 und 71). Die Ausdehnung des 3D-Block wird über die räumliche Verteilung der Messpunkte definiert, wobei (trotz gleichmäßiger Modelblockgröße) keine gleichmäßige Auflösung gewährleistet werden kann. Die Werte des spez. elektr. Widerstandes in manchen Randbereichen des 3D-Blockes kommen nur durch die Inversionsrechnung zustande und haben einen sehr geringen Bezug zu tatsächlich gemessenen Messpunkten. Daher muss der 3D-Block für die schlussendliche Interpretation, um diese Bereiche bereinigt werden. Die 3D-Darstellung des Inversionsergebnisses erfolgt mithilfe der Software „Voxler“ von der Firma Golden Software.

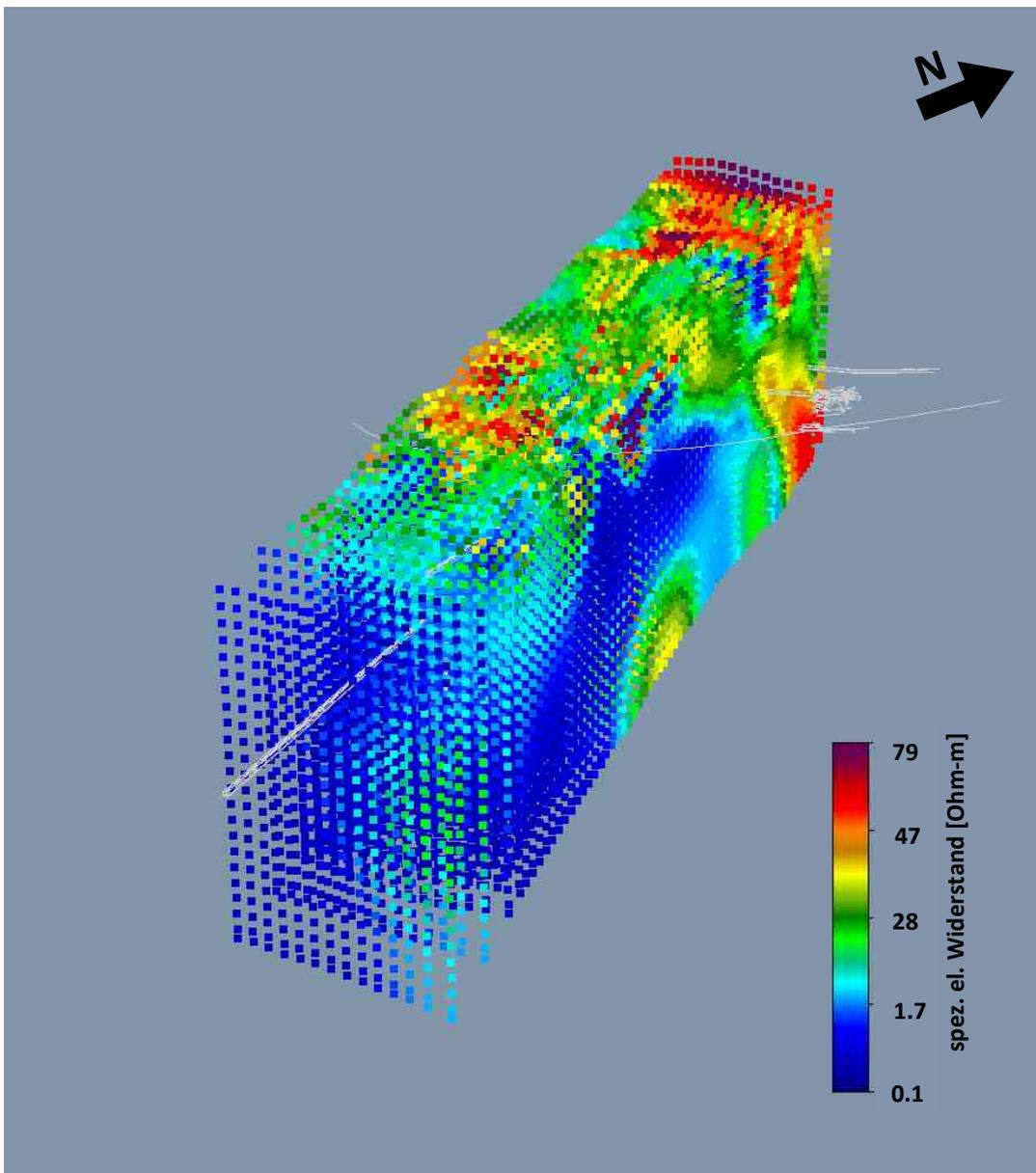


Abb. 70: 3D-Darstellung des Inversionsergebnisses – 3D Block mit entsprechender räumlicher Verteilung des spez. elektr. Widerstandes (in der angegebenen Farbskala)

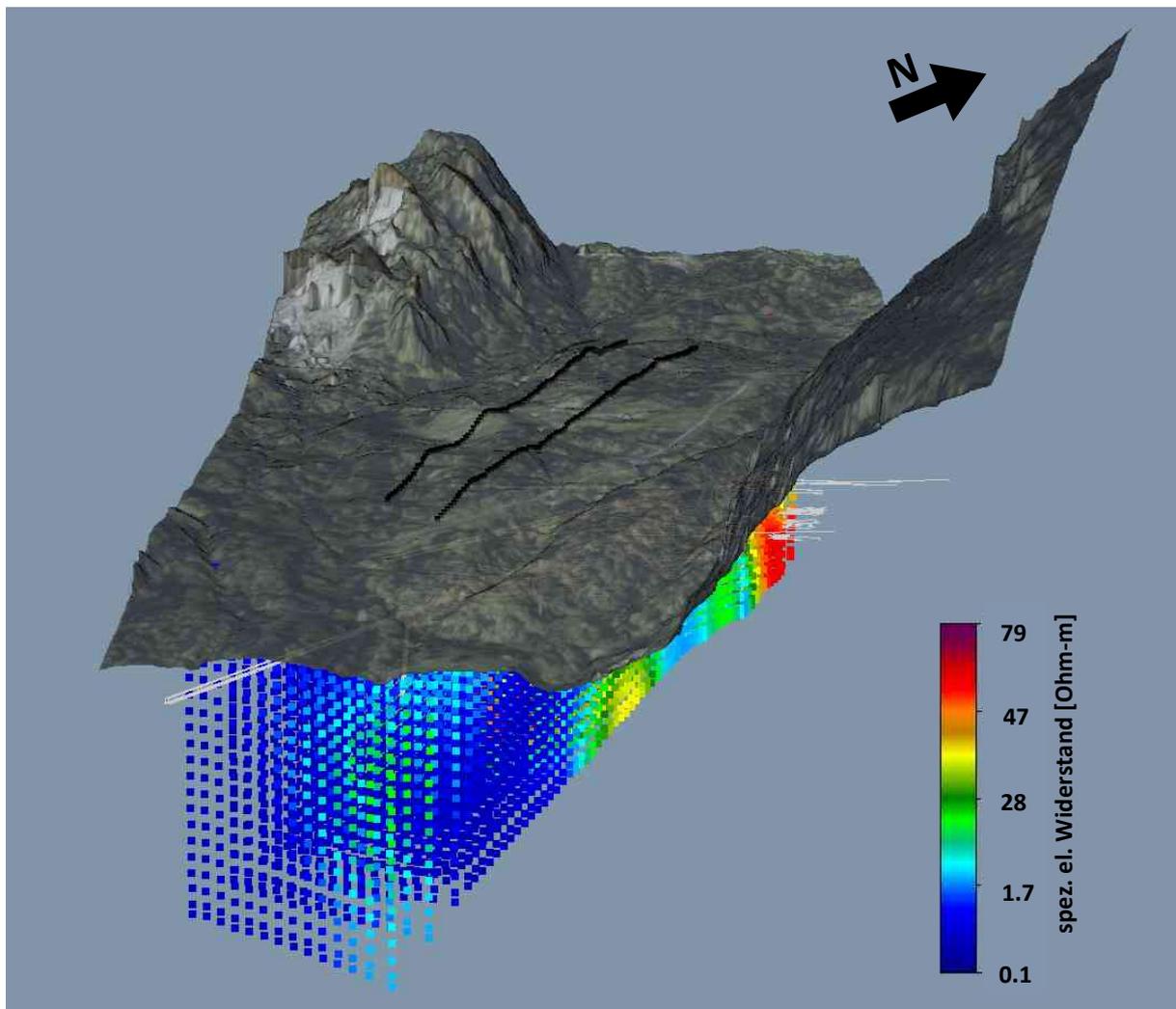


Abb. 71: 3D-Darstellung des Inversionsergebnisses – 3D Block mit entsprechender räumlicher Verteilung des spez. elektr. Widerstandes (in der angegebenen Farbskala) inklusive Orthofoto auf digitalen Geländemodell

In Abb. 70 und 71 sind die einzelnen Modellblöcke der Inversionsrechnung dargestellt. Um die Interpretation des 3D-Inversionsergebnisses zu erleichtern, werden die Modellblöcke 3D-gegriddet, um ein feinmaschigeres Bild der 3D Widerstandsverteilung zu bekommen. In weiterer Folge besteht dann auch die Möglichkeit einzelne Schnittebenen des interpolierten 3D-Blocks im Detail zu betrachten. In Abb. 72 ist der gegriddete 3D-Block des Inversionsergebnisses dargestellt. Die Interpolation erfolgte mit der Methode der inversen Distanzgewichtung und der schlussendliche Punktabstand im interpolierten 3D-Block beträgt unabhängig von der Richtungsachse etwa 2 m.

In Abb. 73 ist dem 3D-Block eine beliebige Schnittebene hinzugefügt, deren Widerstandsverteilung dann in Abb. 74 dargestellt ist. Auf diese Weise lassen sich mit der verwendeten Software beliebige Schnittebenen definieren und interaktiv durch den 3D-Block manövrieren. Dadurch kann eine gezielte Interpretation der vorhandenen

Widerstandsverteilung in bestimmten Bereichen des 3D-Blocks erfolgen, um ganz lokale Fragestellungen zu betrachten.

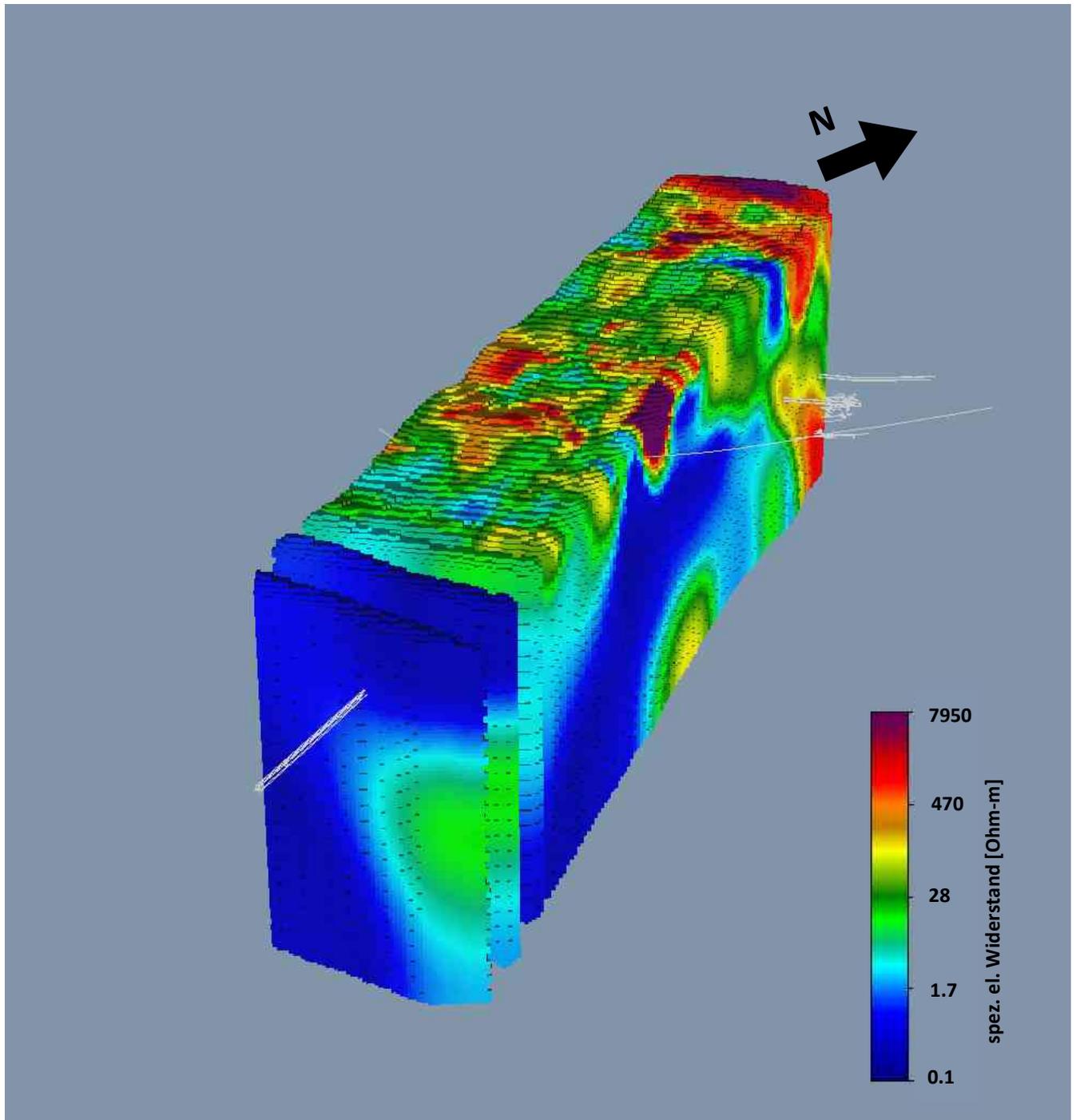


Abb. 72: 3D-Darstellung der gegriiddeten Modellblöcke des Inversionsergebnisses

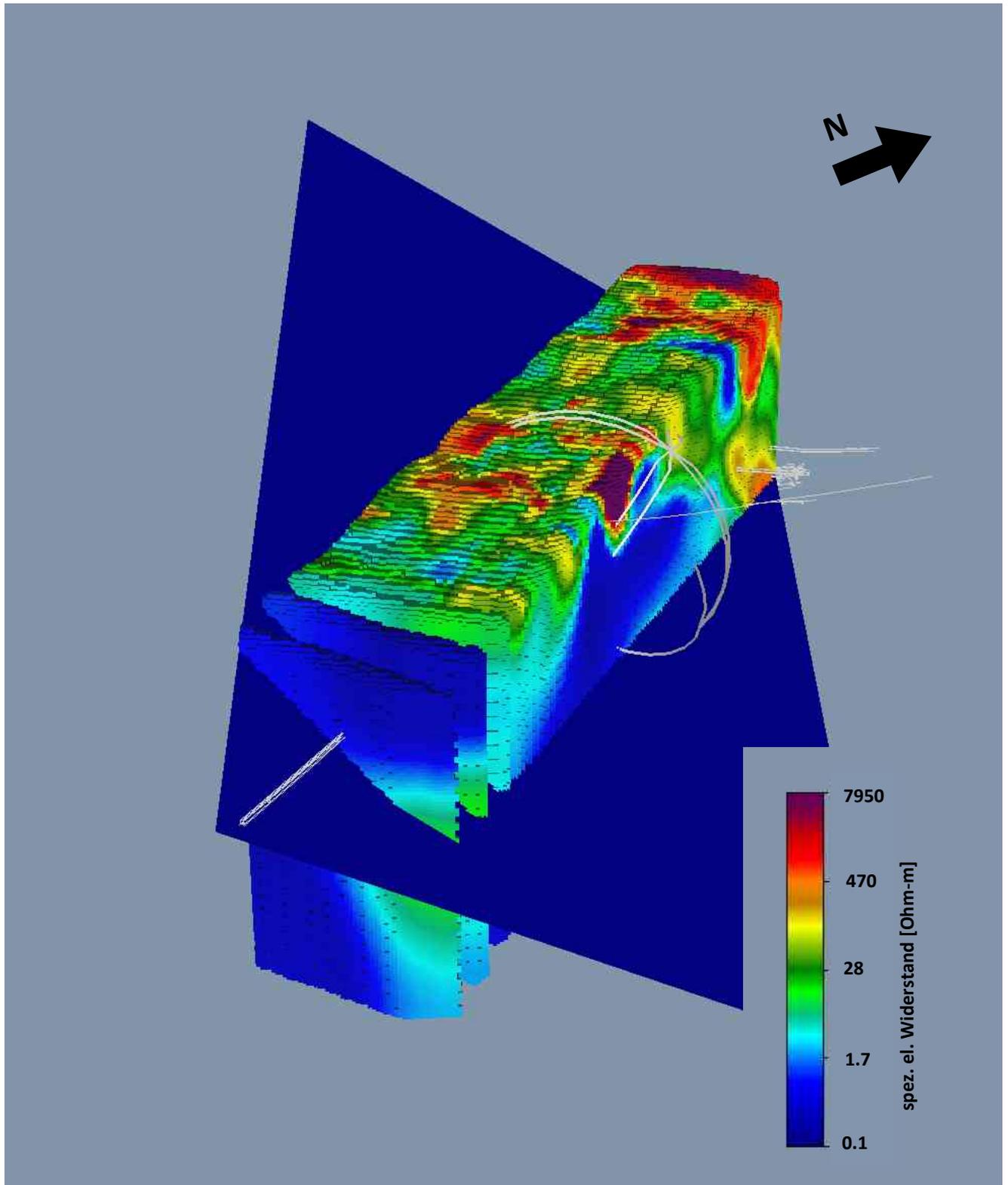


Abb. 73: 3D-Darstellung der gegitterten Modellblöcke des Inversionsergebnisses mit beliebig eingezeichneter Schnittebene

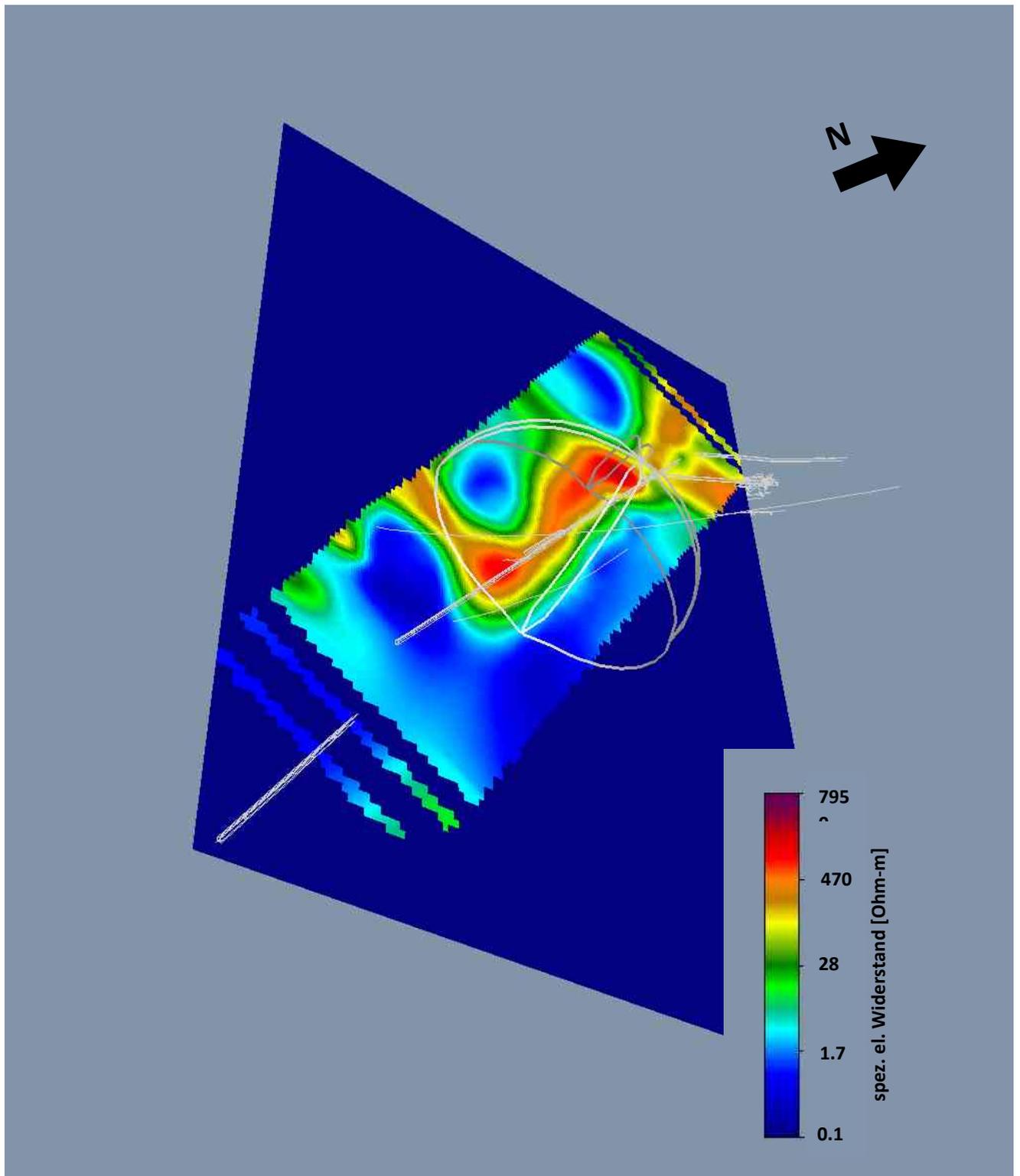


Abb. 74: 3D-Darstellung einer der Widerstandsverteilung auf der Schnittebene von Abb. 9

Anhand der vorliegenden geologischen und archäologischen Informationen kann gesagt werden, dass die großräumige Verteilung des spez. elektr. Widerstandes durchaus mit den vorhandenen Informationen in Übereinstimmung zu bringen ist. Detailfragen werden noch unter Mithilfe der vor Ort tätigen Archäologen zu betrachten sein.

Zusammenfassend konnten die umfangreichen Stollenmessungen im Hallstätter Hochtal (2016, 2018 und 2019) zweifellos interessante Zusatzinformationen über den Aufbau des Untergrundes im Bereich des Christina- und Josef-Stollens liefern. Vonseiten der dort tätigen Archäologen wurde allerdings gehofft, dass deutlich kleinräumigere Strukturen (prähistorische Bergbaubereiche) mit der angewandten Methode detektiert werden können. Dies konnte leider nicht vollumfassend realisiert werden. Vielmehr bilden sich nur die wirklich großräumigen (zum Teil bereits bekannten) Strukturen deutlich ab. Die Anwendung der geoelektrischen Messmethode unter diesen Voraussetzungen (viele technische Einbauten in den Stollen, starke Kontraste im spez. elektr. Widerstand, unklarer Einfluss der zum Großteil feuchten Stollenwände, ...) stellt eine enorme Herausforderung dar. Die einzelnen Messkampagnen wurden dazu genutzt, die Datenakquisition hinsichtlich der Datenqualität von Mal zu Mal zu verbessern. Hierbei wurde gleich nach der ersten Messkampagne klar, dass die größte Verbesserung durch eine an die Fragestellung optimierte Messkonfiguration (Elektrodenanordnung) zu erzielen ist. Zudem wurde von Messkampagne zu Messkampagne die Installation von Elektroden und Messkabeln erweitert, um in bestimmten Bereichen die Auflösung zu erhöhen (z.B. Messkampagne 2018 – Installation von Elektroden im Verbindungsstollen). Mit der Messkampagne 2019 wurde schlussendlich auch noch die Informationslücke zur Geländeoberkante geschlossen, wodurch sich eine (unter Berücksichtigung des erfolgten Messaufwandes) optimale Abdeckung des Untergrundes im entsprechenden Bereich erzielen ließ.

3.4 Resümee geoelektrische Stollenmessungen

- Zusätzliche Inversionsansätze zur Verbesserung der Ergebnisse sollten getestet werden. Eine mögliche Inversionsstrategie umfasst die 3D-Inversion eines Datensatzes mit realen Koordinaten, während die Modellparametrierung auf die von zwei Stollen definierte 2D-Ebene angewendet wird.
- Weitere Messungen zwischen Oberflächen-Stollen und gemeinsame Inversion mit dem vorhandenen Datensatz. So könnte der gesamte Untergrundbereich bis zur Oberfläche abgebildet werden. Diese Daten würden vor allem auch die Zuverlässigkeit der aktuell vorliegenden Ergebnisse verbessern.
- Nutzung eines kommerziellen ERT-Systems zum Vergleich der Datensätze – möglicherweise wäre eine höhere Stromspeisung von Vorteil – sind momentan auf 1 A limitiert – allerdings wurde das ohnehin nicht ausgeschöpft, da die Übergangswiderstände zu hoch waren. Verbesserung der Elektrodenanbindung, soweit möglich.

- Ev. Erweiterung auf Messung des IP-Effektes (induzierte Polarisation), da vor allem im Untergrundbereich mit hohem Tonanteil möglicherweise Zusatzinformationen zu erwarten sind. Allerdings gestaltet sich bei dieser Methode die Interpretation von realen Untergrundstrukturen als äußerst komplex, dennoch sollten die tonreichen Untergrundbereiche besser identifiziert werden können.
- Es kann angenommen werden, dass bei vergleichbaren Untersuchungen in einer weniger komplexen geologischen Situation (auch geringere Kontraste des spez. elektr. Widerstandes) zumindest gleichwertige Ergebnisse hinsichtlich Datenqualität und schlussendlicher Aussagekraft zu erzielen sein sollten. Insofern kann aus unsere Sicht die geoelektrische Messmethode für diese Art von Stollenmessungen durchaus als sinnvoll bewertet werden.

4 Literatur

FUCHS, W. 1983: geolog. Karte, 1:50.000, ÖK 79, Neusiedl am See, GBA, Wien

HERRMANN, P., PASCHER, G. & PISTOTNIK, J., 1993: geolog. Karte, 1:50.000, ÖK 78, Rust, GBA, Wien

KERN, A., KOWARIK, K., RAUSCH, A. W., RESCHREITER, H., 2008: Salz-Reich. 7000 Jahre Hallstatt, VPA 2 S. 67, Wien

KRÖLL, A. & WESSELY, G., 1993: Wiener Becken und angrenzende Gebiete: *Strukturkarte - Basis der tertiären Beckenfüllung, 1 : 200.000.* - In: *Wiener Becken und angrenzende Gebiete.* Geologische Bundesanstalt, Wien

ROETZEL, R., 1998: geolog. Karte, 1:50.000, ÖK 22, Hollabrunn, GBA, Wien

SCHÄFFER, G., 1982: geolog. Karte, 1:50.000, ÖK 96, Bad Ischl, GBA, Wien

SCHORN, A., NEUBAUER, F., BERNROIDER, M., 2013: Polyhalite microfabrics in an Alpine evaporite mélange: Hallstatt, Eastern Alps, *Journal of Structural Geology* 46 (2013)