



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Charakterisierung von hydrogeologischen Parametern in Überschwemmungsgebieten mittels geoelektrischer Bildgebung

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation
Forschungsgruppe Geophysik
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Univ. Ass. Dr. rer. nat. Adrian Flores-Orozco

durch

Benjamin Lehner, BSc
Kleinrötzerstrasse 22
2111 Mollmannsdorf

Wien, 07. 04. 2015

Unterschrift Verfasser

Inhaltsverzeichnis

1. Danksagung	7
2. Einleitung	8
2.1. Kurzfassung	8
2.2. Abstract	8
2.3. Aufgaben / Ziel des Projekts	9
2.4. Messgebiet	9
3. Theorie - Grundlagen der Geoelektrik	11
3.1. IP - Messung	11
3.1.1. Zeitbereichsmessung	13
3.1.2. Frequenzbereichsmessung	15
3.2. Halbraum	16
3.3. Anordnungen	16
3.4. Messaufbau	18
3.5. Messvorgang	18
3.6. Inversion	20
3.7. Komplexe Leitfähigkeit	21
4. Numerische Untersuchungen	23
4.1. Modellgeneration	23
4.1.1. Grids	23
4.1.2. Modelle	25
4.2. Programme	26
4.2.1. Res2DInv	26
4.2.2. CRTomo	28
4.3. Ergebnisse und Folgerung	30
5. Elektrische Bildgebung für gemessene Daten in Rifle	32
5.1. Messgebiet - Geologie und Hydrologie	32
5.2. Biomineralisation	36
5.3. Messungen - Konfiguration	37
5.4. Rohdaten	41
5.5. Inversionsergebnisse	42
5.5.1. Vergleich Res2DInv - CRTomo	43

5.5.2.	2D Profile / Electrical Image	45
5.5.3.	Karten mit ausgewählten Profilen und Interpolationen	46
5.5.4.	Karten	48
6.	Hydrogeologische Interpretation von elektrischen Darstellungen	49
6.1.	Parameter der Hydrogeologie	49
6.2.	Hydraulische Leitfähigkeit	50
6.2.1.	Hydraulische Leitfähigkeit bei reiner Widerstandmessung	51
6.2.2.	Hydraulische Leitfähigkeit bei Induzierter Polarisation	52
6.3.	Ergebnisse und Darstellung	54
7.	Schlussfolgerung	57
7.1.	Modellierung und Vergleich von CRTomo zu Res2DInv	57
7.2.	Inversionsergebnisse	57
7.3.	Hydrogeophysikalische Ergebnisse	59
	Literatur	61
	Appendices	63
	A. Bohrprotokolle	
	B. Ergebnisse der Inversionen	
B.1.	Übersichten aller Profile für scheinbaren spezifischen Widerstand und Phasenverzögerung berechnet mit Res2DInv	
B.2.	Ergebnisse der einzelnen Profile für Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit, sowie Phasenverzögerung berechnet mit Res2DInv	
B.3.	Übersichten aller Profile für scheinbaren spezifischen Widerstand und Phasenverzögerung berechnet mit CRTomo	
B.4.	Ergebnisse von gewählten Profilen für Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit, sowie Phasenverzögerung berechnet mit CRTomo	
	C. Abbildungen zu Interpolationen	
	D. Tiefenschnitte für scheinbaren spezifischen Widerstand und Phasenverzögerung	
	E. Tiefenschnitte der hydraulischen Leitfähigkeit	

Abbildungsverzeichnis

2.1. Messgebiet	10
3.1. Gegenüberstellung von Geoelektrik und Kernbohrung	11
3.2. Parameter der Abklingkurve	14
3.3. Abklingkurve mit Integration	14
3.4. Darstellung der Phasenverzögerung	15
3.5. Homogener Halbraum	16
3.6. Wenneranordnung	17
3.7. Schlumbergeranordnung	17
3.8. Dipolanordnung	18
3.9. Messmittel und Messaufbau	19
3.10. Definition von elektrischer Vorwärts- und Inverslösung	20
3.11. Magnitude und Phase	22
4.1. Rechteckgrid	24
4.2. Dreieckgrid	24
4.3. Abbildung der Modelle	25
4.4. Fehlergrafik	30
4.5. Modelle und Inversionsergebnisse in Res2DInv und CRTomo	31
5.1. 3D Modell des Messgebiets und dessen Umgebung	33
5.2. Schematisches Kernbohrungsprotokoll	34
5.3. Schematischer Schichtaufbau in Rifle	34
5.4. Hydrologie im Messgebiet	35
5.5. Übersicht der Profile und Bohrungen	40
5.6. Pseudosections für Profil #17 und #69 mit Phasenverzögerung	42
5.7. Vergleich von Res2DInv und CRTomo mit Profil #7	44
5.8. Vergleich von Res2DInv und CRTomo mit Profil #20	44
5.9. Vergleich von Res2DInv und CRTomo mit Profil #55	45
5.10. Electrical Image Profil #15	46
5.11. Interpolationen	47
5.12. Interpolationskarte in 5 m Tiefe	48
6.1. Spezifische Porenoberfläche und Porosität	50
6.2. Schema der Abhängigkeit K von b	52

6.3.	Diagramm $S_{por} - \sigma''$ (Weller et al., 2010)	53
6.4.	Diagramm $S_{por} - \sigma''$ für Rifle	54
6.5.	Formationsfaktor in Rifle	55
6.6.	Flussdiagramm - Hydraulische Leitfähigkeit	56
6.7.	Interpolationskarte der hydraulischen Leitfähigkeit	56
7.1.	Übersicht der Profile (Phasenverzögerung)	58
7.2.	Übersicht der Profile (scheinbare spezifische Widerstände)	59

Tabellenverzeichnis

5.1. Profilaufistung	40
5.2. Bohrungsaufistung	40

1. Danksagung

Ich möchte mich auf das Äußerste bedanken...

- bei meiner Familie, im Speziellen meine Eltern und meine Lebensgefährtin Sandra, die mir dieses Studium ermöglichten und mir stets zur Seite stehen, sowie für ihre Geduld und aufmunternden Worte,
- bei Frau Dipl. Ing. Ingrid Kreuzer, Herrn Dr. Werner Chwatal und Herrn Ing. Walter Loderer sowie Herrn Dr. Ewald Brückl, für jegliche Information sowie Hilfe mit Hardware,
- bei meinem guten Freund und Studienkollegen MSc. Matthias Steiner, für seine guten Tipps und Ratschläge bei den Quelltexten, sowie der angenehmen Zeit über das gesamte Studium gesehen und
- bei Herrn Dr. Adrian Flores-Orozco, ohne dem dieses interessante Projekt nicht stattfinden hätte können, der mich überaus begeistert hat und mir die Vorteile der Geoelektrik nähergebracht hat, sowie mir über viele Stunden hinweg mit Rat und Expertenmeinung zur Seite stand.

2. Einleitung

In diesem Kapitel findet sich ein kurzer Überblick der Arbeit und deren Ziele, sowie eine kurze Beschreibung des Messgebietes.

2.1. Kurzfassung

Dieses gezielte Projekt beschäftigt sich mit Untersuchungen von Anwendungen zur Erstellung von elektrischen Darstellungen, um hydrogeologische Parameter in Überschwemmungsgebieten beschreiben zu können. Die herkömmliche Art und Weise, solche Parameter zu charakterisieren, geschieht mittels geologischen Kernbohrungen, welche jedoch nicht die gewünschte räumliche Auflösung bieten.

Deshalb wird die Anwendbarkeit von geophysikalischen, geoelektrischen Methoden in dieser Arbeit untersucht, um die hydrogeologische Charakterisierung dieses Areals verbessern zu können. Die behandelten Messwerte wurden zu einem früheren Zeitpunkt, auf dem Gelände einer ehemaligen Urananreicherungsanlage, gemessen. Sie umfassen 70 2D Profile, die über das gesamte Überschwemmungsgebiet verteilt sind und beinhalten spezifische elektrische Widerstandswerte, sowie Werte für die „Induzierte Polarisation“.

Diese Werte werden herangezogen, um die Verteilung der Untergrundparameter mittels Inversion zu modellieren. Ferner werden Karten dieser Parameter für unterschiedliche Tiefen erzeugt. Dafür werden verschieden Arten von Interpolationen benutzt.

2.2. Abstract

This target project deals with investigations of applications of electrical images to quantify hydrogeological parameters in a floodplain. The typical way to to perform

hydrogeological characterization occurs by way of borehole - tests, which do not feature the required spatial resolution.

Therefore, the applicability of geophysical, geoelectrical methods has been investigated in this thesis, to improve the hydrogeological characterization of the site. The treated measurements were collected previously in the area of a former uranium mill. The surveyed dataset consists of 70 2D profiles, distributed all over the floodplain for the collection of electrical resistivity and „Induced Polarisation“ values.

Those have been exploited for modelling ground parameter distributions using inversions. Furthermore, maps of these parameters for different depths have been created. To ensure that, various ways of interpolations have been carried out.

2.3. Aufgaben / Ziel des Projekts

Ziel dieser Arbeit ist es, mit den Methoden der Geoelektrik eine Bodenerkundung durchzuführen. Dabei wird auf eine Modellierung und numerische Auswertung, die Daten der tatsächlichen Messung (Induzierte Polarisations Daten) und deren Auswertung mittels Inversion, sowie einem Vergleich der Tomographie verschiedener Inversionsalgorithmen eingegangen. Weiters wird eine Quantifizierung der hydrogeologischen Parameter durchgeführt. Mittels dieser Methoden sollen Geometrie und Materialien der Bodenschichten, sowie der Aquifer berechnet und dargestellt werden. Ferner soll aufgrund dieser Ergebnisse eine Interpretation der hydrogeologischen Situation erfolgen.

2.4. Messgebiet

Das Messgebiet befindet sich südöstlich der Stadt Rifle, rund 200 km westlich von Denver und somit in den Rocky Mountains (siehe Abbildung 2.1). Das Areal liegt am nördlichen Ufer des Colorado Rivers, in einem Überschwemmungsgebiet. Der Untergrund ist sedimentär geschichtet und wird von Grundwasser durchflossen.

Die Rocky Mountains bestehen überwiegend aus metamorphem und magmatischem Gestein. In dieser Region gibt es reiche Vorkommen von diversen Metallen, sowie fossilen Bodenschätzen und darüber hinaus auch Uranvorkommen.

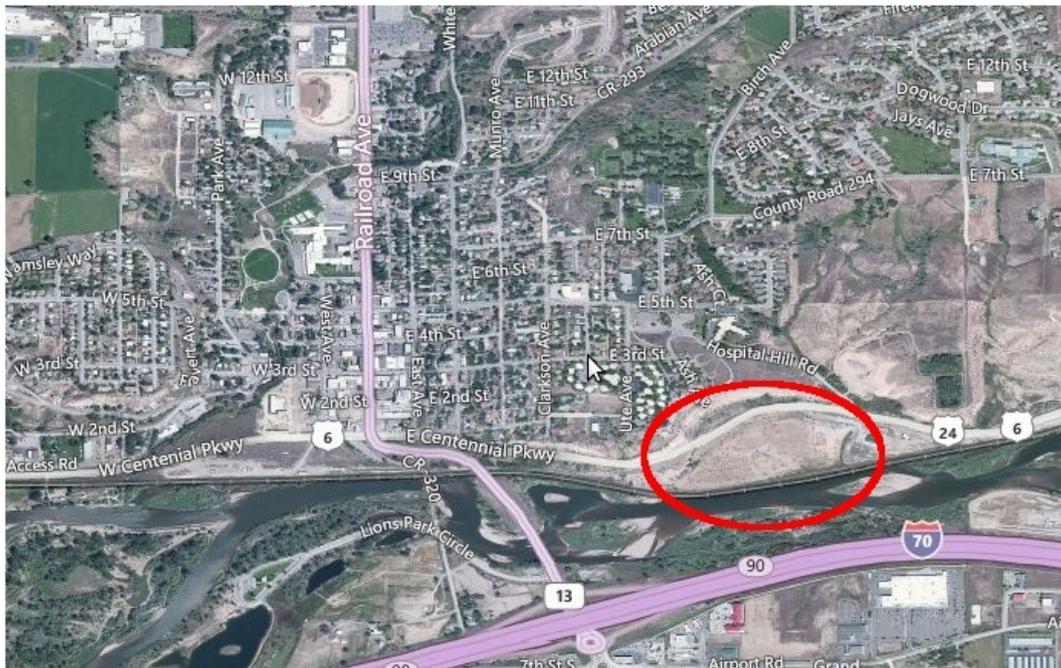


Abbildung 2.1.: Übersicht von Rifle mit dem Messgebiet (rot markiert)

3. Theorie - Grundlagen der Geoelektrik

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht der Geoelektrik, verschiedenen Messmethoden und deren Auswertung.

Der Grund für die Verwendung von geoelektrischen Beobachtungen wird mittels Abbildung 3.1 deutlich. Sind nur geologische Bohrkerne vorhanden, so kann nur an den Stellen der Bohrung der Bodenaufbau sehr genau beobachtet werden, die Stellen dazwischen jedoch können nur grob geschätzt werden. Bei der Geoelektrik, im Speziellen der elektrischen Widerstandstomographie, wird ein komplettes Bild des Untergrundes erzeugt, welches auch Anomalien erkennen lässt, die in den Räumen zwischen den einzelnen Bohrungen sonst vernachlässigt werden würden. Die Tatsache einer etwas geringeren Auflösung nimmt man hier meist gerne in Kauf.

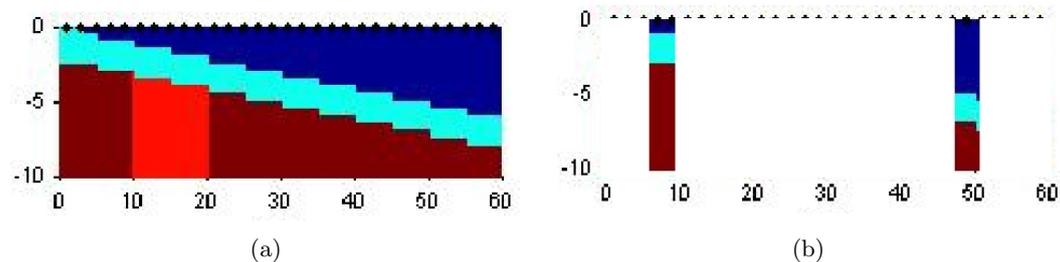


Abbildung 3.1.: (a) Abbildung eines Beispiels für Bodenschichten, beobachtet mittels geoelektrischer Messung; (b) Abbildung eines Beispiels für Bodenschichten, beobachtet mittels geologischer Bohrkerne

3.1. IP - Messung

Dieser Abschnitt basiert auf (Berckheimer, 2005), welcher erklärt, dass mittels Metallspießen (Elektroden) Gleichstrom oder sehr niederfrequenter Wechselstrom (I), in Ampere [A], dem Untergrund zugeführt wird und mittels zusätzlicher Erdspieße Spannungen (U), in Volt [V], gemessen werden. Das äußerst bekannte Ohm'sche Gesetz definiert die Bestimmung des Widerstandes (englisch Resistance)

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

R wird mit der Einheit Ohm [Ω] angegeben und ist vom spezifischen Widerstand (englisch Resistivity) ρ des Materials, sowie der Leitergeometrie abhängig. Für einen Leiter mit der Länge l und dem Querschnitt A ist

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (3.2)$$

Der spezifische Widerstand ist mit der Einheit Ohm-Meter [$\Omega \cdot m$] definiert und beschreibt die Eigenschaften des Untergrundes, bezüglich dessen elektrischer Leitung.

Aus der Anordnung, auch Elektrodengeometrie genannt, sowie I und U ergibt sich für einen homogenen Halbraum der spezifische Widerstand ρ in der Form:

$$\rho = k \cdot \frac{U}{I} \quad (3.3)$$

Der Geometriefaktor k beschreibt die Geometrie der Anordnung und wird im Kapitel 3.3 definiert.

In einem heterogenen Halbraum und somit jeder Feldmessung, wird jedoch nicht der spezifische Widerstand, sondern der scheinbare spezifische Widerstand ρ_s (englisch Apparent Resistivity ρ_a) ermittelt. Er beschreibt die Messwerte bezüglich der Anordnungsgeometrie, wobei ρ die Eigenschaften bezüglich der elektrischen Leitung, in den einzelnen Bereichen des beobachteten Untergrundes, beschreibt.

$$\rho_a = k \cdot \frac{U}{I} \quad (3.4)$$

Um die Eigenschaften im Untergrund beschreiben zu können, muss der scheinbare spezifische Widerstand ρ_a mittels Inversion (siehe Kapitel ??) prozessiert werden, um eine Verteilung des spezifischen Widerstands zu erhalten ρ .

Jene Daten, die mittels IP-Messungen (Induzierte Polarisation) gesammelt wurden, enthalten zwei Teile. Die schon bekannten scheinbaren spezifischen Widerstandswerte und Werte der IP. Somit verdoppelt sich die Anzahl an Daten.

Die Polarisation erfolgt aufgrund der niederfrequenten Wechselströme, die Anionen und Kationen wechselwirkend anziehen und wieder abstoßen. Der Boden wirkt in diesem Fall wie ein Kondensator. Sind die besagten Ionen in Bewegung, so kann der Ladevorgang im Untergrund beobachtet werden. Dies ist so lange möglich, bis der Ladevorgang abgeschlossen ist, da bei voller Ladung keine weitere Strombewegung mehr möglich ist. Von diesem Moment an werden die bereits erklärten scheinbaren spezifischen Widerstände detektiert, da keine Ladungsänderung mehr auftreten kann. Sind beide Werte gemessen, so beginnt der Vorgang in anderer Polarisation

erneut.

Viele IP-Instrumente messen die Aufladungsfähigkeit (chargeability) M , als Integration der Fläche unter der Aklingskurve [ms].

Es gibt zwei Möglichkeiten die Daten zu bearbeiten. Zum Einen ist es möglich, beide Teile der Daten gleichzeitig und schrittweise zu invertieren, zum Anderen wird vorrangig eine Inversion der scheinbaren spezifischen Widerstandswerte durchgeführt und anhand des Ergebnisses der letzten Iteration eine Inversion der IP-Werte berechnet.

IP-Messungen wurden traditionell in der Mineralerkundung (Sulfide und Tone) angewendet. Heutzutage wird diese Methode auch in Bereichen der Ingenieurs- und Umwelterkundung durchgeführt, jedoch mit geringeren Stromstärken. Das führt eine erhöhte Messdauer und somit eine größere Rauschbelastung mit sich.

Die Unterpunkte für IP - Messungen im Zeit- und Frequenzbereich sind nach (Binley und Kemna, 2005) beschrieben und sollen Details der IP - Messungen verständlich machen.

3.1.1. Zeitbereichsmessung

Für die Messungen im Zeitbereich werden Ströme injiziert und Spannungen gemessen. Die Quelle wird als Gleichstromquelle angesehen, im Sinne, dass während der Messung keine Variationen vorliegen. Jedoch handelt es sich um einen sehr niederfrequenten Arbeitszyklus mit alternierenden Strömungsrichtungen. Die Richtung ist alternierend um die Eigenpotenziale des Untergrundes zu minimieren.

Die beiden Methoden zur Messung der Aufladungsfähigkeit im Zeitbereich sind unten beschrieben.

- Die folgende simple Definition der Aufladungsfähigkeit wird selten verwendet, da sie unpraktisch zu messen ist. Abbildung 3.2 zeigt die gemessene Spannung bei erstmaligem Einschaltender Quelle und späteren ausschalten dieser. Mit den Parametern der Abbildung berechnet sich die scheinbare Aufladungsfähigkeit zu $m = \frac{V_s}{V_m}$ mit V_s und V_m als sekundäres und maximales Potential.

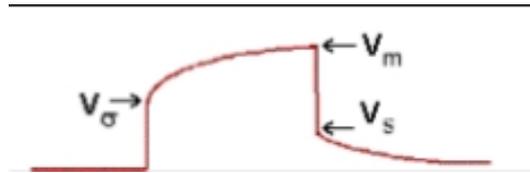


Abbildung 3.2.: Parameter der Abklingkurve

- Ohne die Aufladungsfähigkeit würde V_σ (Vorderflanken Potential) gemessen werden, was dem spezifischen Widerstand des Bodens ergeben würde.
 - V_m ist der kombinierte Effekt von Stromfluss im Boden und Aufladung im elektrischen Feld.
 - V_s hängt aufgrund der Ladungsungleichheit nur von der Aufladung ab.
 - In dieser Form liegt M nur zwischen 0 und 1 vor; bei $M = 0$ gibt es keinen Einfluss der Ladung. Das Ausgangssignal würde der Signalantwort entsprechen.
- Die am häufigsten gemessene Form der Zeitbereichs - IP ist die Fläche unter der Abklingkurve. Die Formel für M bezieht sich auf die Abbildung 3.3. Das abklingende Potential nach V_s wird mit $V_s(t)$ bezeichnet. M (scheinbare Aufladungsfähigkeit) sind die roten Bereiche unter der Kurve in Abbildung 3.3, normalisiert mit der Ausgangsspannung.

$$M = \frac{1}{V_m} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad (3.5)$$

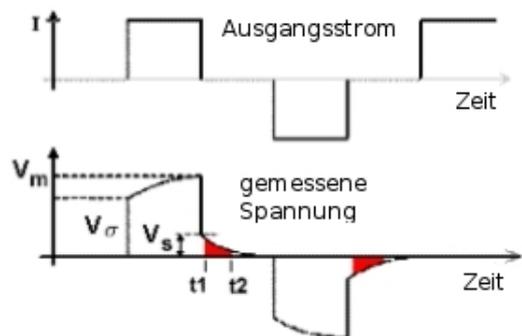


Abbildung 3.3.: Abklingkurve mit Integration

3.1.2. Frequenzbereichsmessung

Ein oszillierender Ausgangsstrom kann für die Beobachtung der Aufladungsfähigkeit herangezogen werden. Dies geschieht oft mit relativ niedrigen Frequenzen und wird daher als Gleichstrommessung behandelt. Des Weiteren gibt es auch noch Messungen der Aufladungsfähigkeit die unten stehend erklärt werden. Zwei Methoden diese Messung im Frequenzbereich durchzuführen werden hier angeführt.

- Die Daten werden in Bezug auf die Phasenverzögerung beziehungsweise die Phase mit sinusförmigen Ausgangsströmen aufgezeichnet. Dadurch kann die Differenz der Phase des Ausgangssignals und der Signalantwort detektiert werden. Diese Phasenverzögerung (ϕ) ist ein Maß für die Aufladungsfähigkeit des Untergrunds. Die Einheiten sind üblicherweise [mrad]. Abbildung 3.4 zeigt dies.

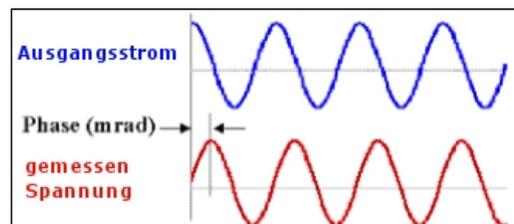


Abbildung 3.4.: Darstellung der Phasenverzögerung

- Die Amplitudenmessung des potenziellen Signals bei zwei verschiedenen Frequenzen und Berechnung des Prozentuellen Frequenz Effekts (PFE). Auf diesen Punkt wird nicht genauer eingegangen.

Diese vier Methoden befassen sich alle mit der Aufladung im Boden, liefern aber nicht die gleichen Werte. Die Einheiten sind alle unterschiedlich. Die folgende Annäherung gibt einen Vergleich der vier Methoden und ihrer Werte.

Eine Aufadungsfähigkeit von $m = |0.1|$ entspricht einem Prozentuellen Frequenz Effekt $PFE = |10|$ entspricht einer Phasenverzögerung $\phi = -70$ mrad oder einer scheinbaren Aufladungsfähigkeit (apparent chargeability) $M = 70$ ms.

Im Zuge dieses Projekts wurden die Werte ϕ und M verwendet. Sie stehen im Verhältnis $M = -1 \cdot \phi$.

3.2. Halbraum

Da die Luft als nicht leitend anzusehen ist und somit der gesamte Stromfluss zwischen den Elektroden im Boden stattfindet, spricht man von einem Halbraum. Das bedeutet, dass trotz einer kugelförmigen Ausbreitung des Stroms von der Erdoberfläche (Kontaktpunkt zwischen Elektrode und Boden) nur die Ausbreitung im Boden berücksichtigt wird.

Abbildung 3.5 zeigt außerdem, die Flächen gleicher Spannung (Äquipotentialflächen) und die normal dazu verlaufenden Stromisolines.

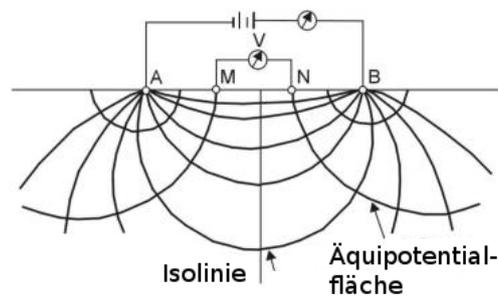


Abbildung 3.5.: Skizze eines homogenen Halbraums mit Isolinien (Strom) und Äquipotentialflächen (Spannung)

3.3. Anordnungen

Als Anordnung bezeichnet man die Position von Strom- und Spannungselektroden zueinander, welche jedoch nicht vom Messaufbau abhängen, sondern nur die Positionen im Messaufbau wiedergeben. Es sind einige Anordnungen bekannt, wobei in dieser Arbeit nur drei davon behandelt werden. Tests und Auswertungen wurden nur mit der Methode nach Wenner, Schlumberger und der Dipol - Dipol - Methode durchgeführt.

Bei jeder Anordnung wird ein Geometriefaktor berechnet. Er berechnet sich bei jeder einzelnen Messung aus den Abständen der vier verwendeten Elektroden zu einander und wird für die Beziehung zwischen Widerstand und scheinbarem spezifischen Widerstand benötigt. Die erläuternden Formeln finden sich in 3.1.

Bei der Wenner Anordnung haben die vier verwendeten Elektroden jeweils denselben Abstand zueinander (siehe Abbildung 3.6). Der Geometriefaktor berechnet sich zu

$$k = 2 \cdot \pi \cdot a \quad (3.6)$$

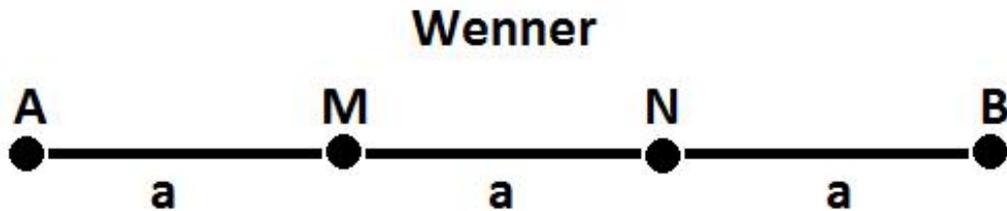


Abbildung 3.6.: Schema einer Wenneranordnung

Die Schlumberger Anordnung ist symmetrisch ausgeführt und wird mit den Stromelektroden an den Enden des Profils (veränderlich) und den Spannungselektroden nahe der Profilmitte (unveränderlich) realisiert (siehe Abbildung 3.7). Der Geometriefaktor berechnet sich zu

$$k \approx \frac{\pi \cdot L^2}{4a} \quad (3.7)$$

mit $L \gg a$.

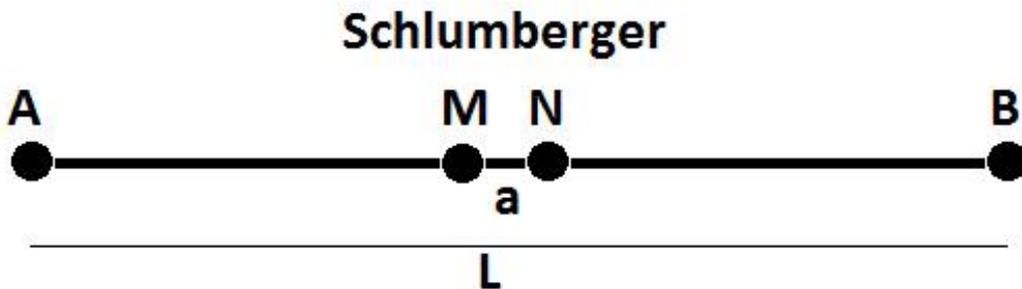


Abbildung 3.7.: Schema einer Schlumbergeranordnung

Bei der Dipol - Dipol - Anordnung werden beide Dipole entlang des Profils und zueinander verschoben, behalten jedoch intern denselben Abstand. Dafür hält man zuerst die Stromelektroden fest und bewegt die Spannungselektroden. Anschließend werden die Stromelektroden bewegt und ein neuer Zyklus beginnt. So werden alle möglichen Kombinationen durchlaufen (siehe Abbildung 3.8). Der Skip gibt die Anzahl an freien Elektroden innerhalb der Elektrodenpaare an. Die freie Strecke zwischen den beiden Dipolen wird als $n \cdot a$ definiert. Der Geometriefaktor berechnet sich zu

$$k = 2\pi \cdot n(n+1)(n+2)a \quad (3.8)$$

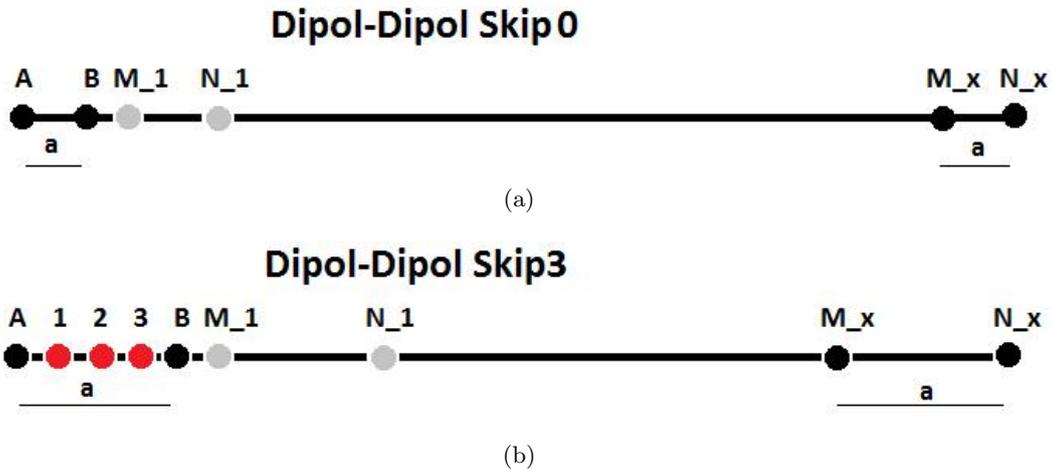


Abbildung 3.8.: (a) Schema einer Dipolanordnung mit Skip-0: keine freien Elektroden innerhalb der einzelnen benutzten Elektrodenpaare; (b) Schema einer Dipolanordnung mit Skip-3: drei freie Elektroden innerhalb der einzelnen benutzten Elektrodenpaare

3.4. Messaufbau

Bevor der Messaufbau realisiert werden kann, müssen Auflösung und Eindringtiefe festgelegt werden. Die Auflösung verhält sich indirekt proportional zum Elektrodenabstand, die Eindringtiefe direkt proportional zur Auslagenlänge.

Nach Festlegung dieser beiden Parameter werden die Elektroden (Erdspliese) neben einem Maßband mit bestimmten Abstand in den Boden gedrückt. Es ist auf gute Anbindung zu achten. Anschließend werden sie mit Jumper-Kabeln an das mehradrige Spezialkabel angeschlossen. Dieses ist mit der Mess- und Recheneinheit verbunden. Als Energiequelle dient in vielen Fällen eine einfache Autobatterie, oder ähnliche Stromquellen (siehe Abbildung 3.9).

3.5. Messvorgang

Wie alle geophysikalischen Methoden, basiert auch die Geoelektrik auf dem Prinzip eines anregenden Quellsignals in einem Untergrundkörper und Messungen der Si-



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3.9.: (a) Abbildung der Messeinheit mit Autobatterie als Stromquelle;
 (b) Abbildung einer Elektrode mit fixiertem Jumper-Kabel;
 (c) Übersicht eines Messaufbaus, wie er bei einer Feldübung realisiert wurde

gnalantworten an gewählten Punkten.

Vor Beginn der Messung wird mit einem voreingestelltem Test der Messeinheit die Anbindung getestet, um fehlerhaft oder nicht verbundene Elektroden auffinden und anschließen zu können. Weiters wird damit die Anbindung zum Boden getestet. Falls diese keine oder geringe Werte für die Leitfähigkeit, beziehungsweise sehr große Werte für den Widerstand liefert, muss die Elektrode nachgesetzt werden. Sind die Werte für den Widerstand sehr hoch, so besteht keine Anbindung zum Boden und der Strom müsste durch die Luft fließen, die bekanntlich nur sehr schwach leitfähig ist.

Nach Beendigung dieses Tests wird ein voreingestelltes, oder vom Benutzer selbst definiertes Anordnungsprotokoll gewählt, anhand dessen die Messung durchgeführt wird. Ein solches Anordnungsprotokoll beschreibt, welche der gesetzten Elektroden

zur Messung herangezogen werden und den Quadrupol bilden. Mittels eingespeistem Strom und abgenommener Spannung kann der Widerstand im Boden zwischen den verwendeten Elektroden bestimmt werden. Werden nun alle möglichen Kombinationen dieses Quadrupols gebildet, kann auf die Verteilung der Widerstände im Untergrund geschlossen werden.

3.6. Inversion

Orientiert an (Binley und Kemna, 2005) ist das Ziel geoelektrischer Methoden, die Verteilung von elektrischen Eigenschaften im inneren eines Objekts, hier im allgemeinen der Untergrund, anhand von Messungen am Rand oder außerhalb dieses Objekts herzuleiten. Ein theoretisches Ergebnis solcher Messungen kann, für gegebene elektrische Eigenschaften, mathematisch bestimmt (modelliert) werden. Diese Anwendung definiert das so genannte „Forward Problem“ oder die Vorwärtslösung.

Jedoch muss für den Zweck einer Untergrundsuntersuchung in jedem Fall das „Inverse Problem“ oder die Inversionslösung berechnet werden, d.h. für gegebene Messwerte (DATA) wird die Verteilung der elektrischen Eigenschaften (MODEL) gesucht, die die Beobachtungen in angemessenem Grad erklärt (siehe Abbildung 3.10).

Für scheinbare spezifische Widerstandsbeobachtungen liegen die Daten als „apparent resistivities“ vor und das Modell wird in Form von spezifischen Widerständen oder Leitfähigkeiten berechnet. Bei der IP-Beobachtung liegen die Daten in Form der scheinbaren Aufladungsfähigkeit (apparent chargeability) vor und das Modell wird in Form komplexer spezifischer Widerstände berechnet.

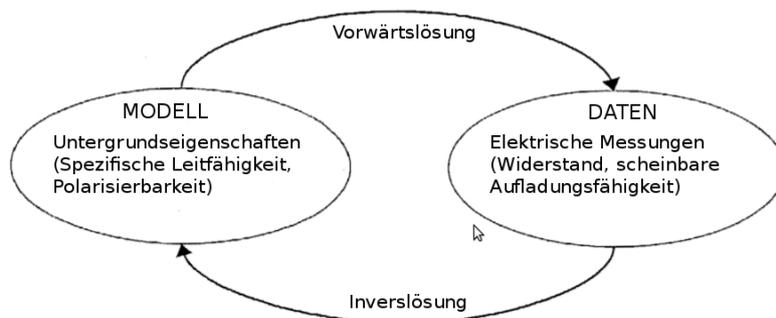


Abbildung 3.10.: Definition von elektrischer Vorwärts- und Inverslösung

Unglücklicherweise gibt es für dieses Problems keine eindeutige Lösung. Es sind normalerweise eine Vielzahl an verschiedenen Modellen vorhanden, welche die gleiche Antwort liefern. Im Gegenzug gibt es eine unbegrenzte Anzahl an Modellen, die den Messdaten mit gegebener Ungenauigkeit zugeschrieben werden können.

Die Inverslösung ist nun das Modell, das die Messdaten mit den gewählten Ungenauigkeiten reproduziert. Jedoch können Datenfehler zu einem sehr schlecht gestellten (ill-posed) numerischen Problem führen. Dem wird mittels Regularisierung nach (Tikhonov und Arsenin, 1978) entgegengewirkt.

3.7. Komplexe Leitfähigkeit

Die komplexe Leitfähigkeit errechnet sich aus den ermittelten komplexen spezifischen Widerstandswerten aus der Inversion. Jede komplexe Messgröße enthält einen Speicherterm (Polarisation) und einen Verlustterm (Leitung). Komplexe Messgrößen sind von hier an in dieser Arbeit immer mit einem * gekennzeichnet.

Der mittels Inversion berechnete komplexe spezifische Widerstand ρ^* entspricht dem Reziprok der komplexen spezifischen Leitfähigkeit σ^* . Das bedeutet, umso größer der Widerstand ist, desto kleiner ist die Leitfähigkeit. Aus Magnitude $|\sigma^*|$ und Phase ϕ (Abbildung 3.11) berechnet sich der Leitungsterm (Realteil), zu

$$\sigma' = |\sigma^*| \cdot \cos(\phi) \quad (3.9a)$$

und der Polarisationsterm (Imaginärteil) zu

$$\sigma'' = |\sigma^*| \cdot \sin(\phi) \quad (3.9b)$$

Magnitude und Phase von elektrischer Leitfähigkeit

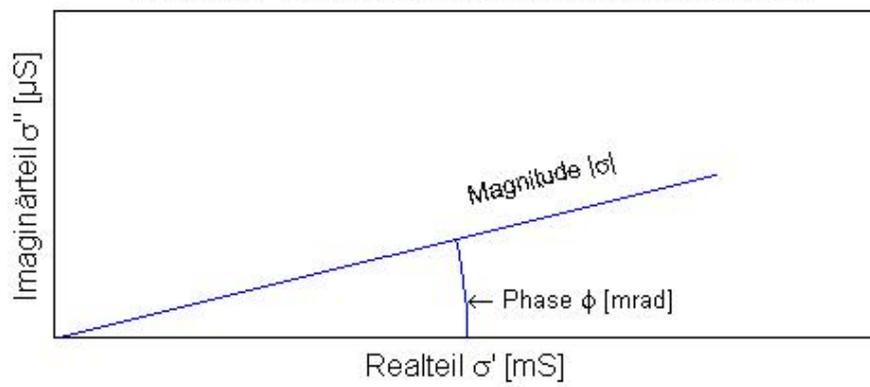


Abbildung 3.11.: Darstellung der Magnitude $|\sigma^*|$ und Phase ϕ , sowie Real- und Imaginärteil σ' und σ''

4. Numerische Untersuchungen

Für die numerische Untersuchung werden beliebige Modelle erstellt. Diese müssen jedoch für bestimmte Gitter, oder englisch Grids, implementiert werden. Mittels dieser Gitter, beziehungsweise deren Maschen, entstehen finite Elemente im Halbraum, welche bei der numerischen Untersuchung mittels Vorwärtslösung und Inversion berechnet werden können. Bei der Vorwärtslösung werden Daten aus dem Modell numerisch erzeugt, welche mittels Inversion ein dem Modell ähnliches Ergebnis liefern sollen. Dieser gesamte Ablauf findet statt, um die Vertrauenswürdigkeit des Inversionsergebnisses eines Algorithmus zu untersuchen.

4.1. Modellgeneration

Die Modellgeneration eines Halbraumes geschieht in zwei Schritten. Zuerst wird die Länge, sowie die Tiefe des Modells festgelegt. Über die gewählte Elektrodenanzahl bestimmt man nun die Gitterpunkte. Ist eine geeignete Konfiguration gefunden muss damit das Gitter erzeugt werden. Der zweite Schritt befasst sich mit den spezifischen Widerständen im Modell. Es können beliebig viele Schichten, die in Ausrichtung, Mächtigkeit und spezifischem Widerstand voneinander variieren, definiert werden, oder ein homogener Halbraum als Modell dienen.

4.1.1. Grids

Um aus tatsächlich gemessenen Daten, beziehungsweise aus generierten Daten, eine Inversionslösung errechnen zu können, benötigt man ein Gitter, dessen Maschen den Halbraum und Elemente unterteilen. Man spricht hier von einem Grid. Ein solches Grid kann mit Drei-, Vier- und Vielecken realisiert werden. Im Verlauf dieses Projekts wurden Viereckgrids und Dreieckgrids (siehe Abbildungen 4.1 und 4.2) getestet, wobei letztere aufgrund der zeitaufwändigen und leistungsintensiven Berechnung nur zu Beginn verwendet wurden, um sie kennenzulernen. Alle weiteren Berechnungen

basieren auf Viereckgrids mit einer Maschenweite von 1 m oder 0,45 m. Grundlage für die Maschenweite ist der zuvor gewählte Elektrodenabstand, der die Distanz zwischen zwei verwendeten Elektroden beschreibt. Mit diesen Punkten (deutliche Punkte am oberen Rand des Grids) kann nun, sowohl bei der Vorwärtslösung, wie auch bei der Inversion, mittels einer bestimmten Anordnung, die Berechnung der Maschenelemente erfolgen. Die Grids wurden mittels Sungrid erstellt (Flores-Orozca et al., 2012).

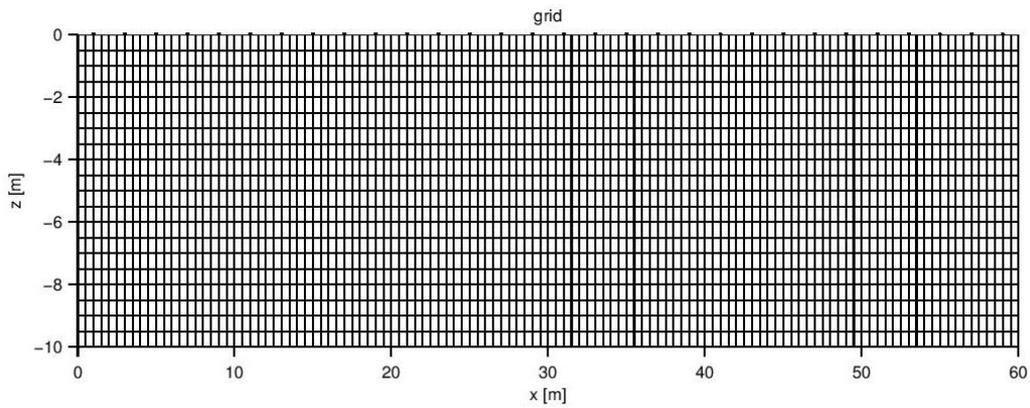


Abbildung 4.1.: *Abbildung eines Grids mit rechteckigen Maschen*

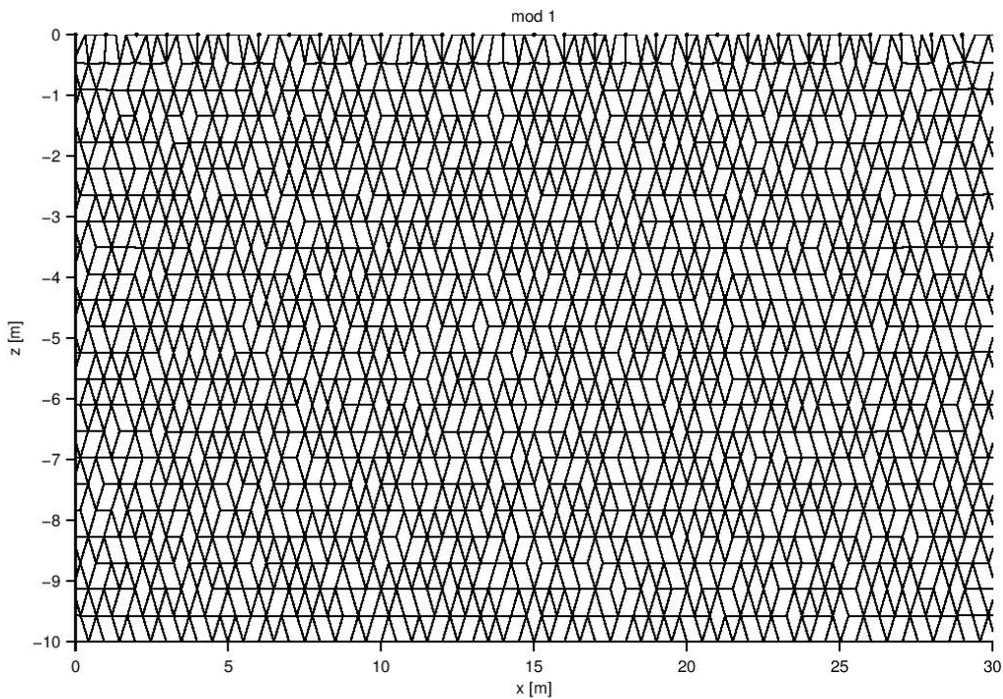


Abbildung 4.2.: *Abbildung eines Grids mit vorwiegend dreieckigen Maschen*

4.1.2. Modelle

Um ein passendes Modell für das zuvor erstellte Grid zu konstruieren, müssen die Abmaße des Grids einbezogen werden. Jedoch darf das Modell nicht nur deckungsgleich sein. Es müssen an den Rändern des Grids noch Bereiche des Modells überstehen, um die Randeffekte bei der Inversion zu berücksichtigen. Sind nun Länge und Tiefe des Modells gewählt, folgt die Anordnung der Schichten.

Als einfachstes Modell gilt der homogene Halbraum, der wie sein Name verrät homogen ist. Es muss daher nur noch ein einziger spezifischer Widerstandswert ($1000 \Omega\text{m}$) für das Modell definiert werden (siehe Abbildung 4.3).

Dieses Modell ist sehr einfach zu berechnen, um jedoch die Qualität des invertierenden Algorithmus und der Inversionsergebnisse zu evaluieren, sind drei aufwändigere Modelle erstellt worden. Mit ihnen soll festgestellt werden, ob sowohl Geometrie als auch Werte der Heterogenitäten rekonstruiert werden können.

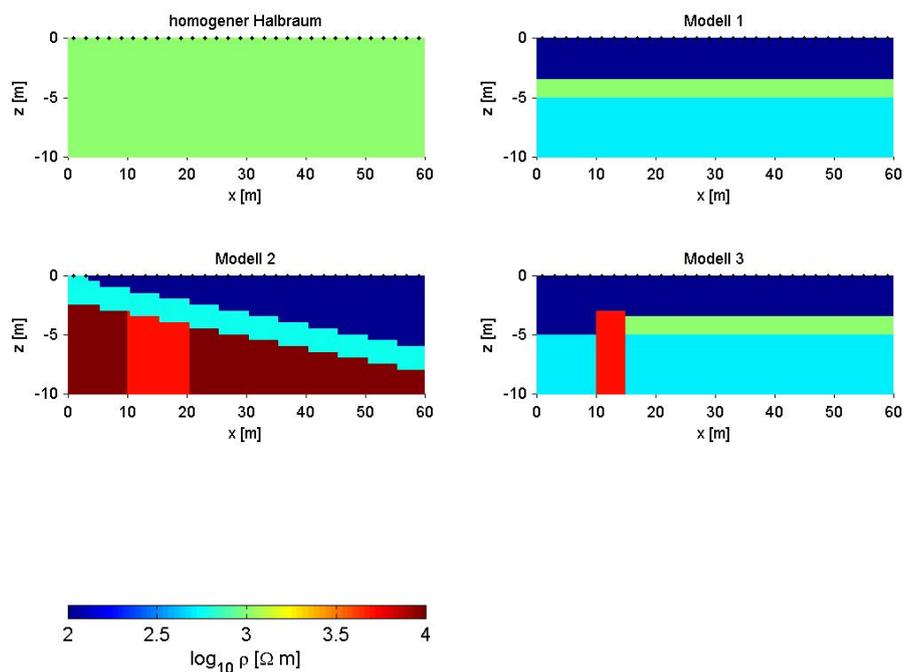


Abbildung 4.3.: Abbildung der Modelle (spez. Widerstand $[\Omega\text{m}]$):
Homogener Halbraum (links oben);
Modell 1 (rechts oben);
Modell 2 (links unten);
Modell 3 (rechts unten);

Die drei umfangreicheren Modelle weisen unterschiedliche Schichten auf, die in Lage und Ausdehnung variieren (siehe Abbildung 4.3).

Modell 1 hat nur waagrechte Schichten, deren spezifische Widerstände $100 \Omega\text{m}$, $500 \Omega\text{m}$ und $1000 \Omega\text{m}$ betragen.

Modell 2 fällt durch die geneigte Schicht mit $600 \Omega\text{m}$ auf. Darüber liegt die Deckschicht mit $100 \Omega\text{m}$, darunter eine durch eine Anomalie ($5000 \Omega\text{m}$) geteilte Schicht mit $10\,000 \Omega\text{m}$.

Das dritte Modell beschreibt eine durch eine Anomalie ($5000 \Omega\text{m}$) geteilte Schicht mit $500 \Omega\text{m}$. Rechts dieser Anomalie befindet sich eine waagrechte Schicht mit $1000 \Omega\text{m}$. All dies wird überlagert von der Deckschicht mit $100 \Omega\text{m}$.

Jedes dieser Modelle liefert, gemeinsam mit dem gewählten Grid im Forschungsalgorithmus CRMod (Kemna et al., 2000), eine Vorwärtslösung, welche anschließend als Basis für eine Inversion dient. Die Vorwärtslösung liefert Ergebnisse die jenen einer Messung gleichen. Sie werden in Widerstandswerten in $[\Omega]$ beziehungsweise als scheinbarer spezifischer Widerstand (in Kombination mit dem Geometriefaktor) in $[\Omega\text{m}]$ gegeben.

4.2. Programme

Im Zuge dieses Projekts werden die Daten der Vorwärtberechnung der Modelle und in weitere Folge die Daten einer Messkampagne mit Inversionsalgorithmen bearbeitet. Im Speziellen werden das kommerzielle Programm Res2DInv und der Forschungsalgorithmus CRTomo verglichen und gegenübergestellt. Die beiden Programme werden anschließend kurz erklärt und deren Berechnungseinstellungen erläutert. Bei jedem dieser Programme kann zusätzlich noch eine Inversion, der zusätzlich zu den scheinbaren spezifischen Widerständen ermittelten IP - Werten, berechnet werden.

4.2.1. Res2DInv

Res2DInv ist eine kommerziell vertriebene und genutzte Software für Auswertungen im Bereich der Geoelektrik. Sie wird von der Firma GEOTOMO SOFTWARE

SDN. BHD. vertrieben. Das Programm beschäftigt sich mit der Bildgebung, sowie Inversionen geoelektrischer Messungen und erstellt zweidimensionale Ergebnisse.

Mit Res2DInv wird auf die steigende Nachfrage nach bildgebenden Programmen für Zweidimensionale elektrische Beobachtungen eingegangen. Dieses Programm legt für jeden Datensatz (Profil) alle nötigen Parameter fest, was eine erhebliche Erleichterung für Nutzer darstellt. Sollen jedoch mehrere Datensätze mit den gleichen Parametern berechnet, sowie dargestellt werden, so ist es notwendig, dies für jedes Profil festzulegen, da sonst zwar gut angepasste, doch möglicherweise stark variierende Ergebnisse die Folge sind.

Bei den zuvor erwähnten Parametern handelt es sich um die Maschenweite in Bezug zum Elektrodenabstand. Wird dieser Parameter nicht verändert, ergibt sich die Maschenweite gleich dem Elektrodenabstand. Um Anomalien besser beschreiben zu können, sollte die Auflösung und somit die Maschenweite kleiner dem Elektrodenabstand gewählt werden.

Zudem gilt es die Abbruchparameter festzulegen. Es werden sowohl die Anzahl der Inversionszyklen, wie auch ein RMS-Fehler gewählt. Die Zyklanzahl gibt an wie oft eine Inversion, basierend auf dem vorherigen Ergebnis berechnet wird. Für den ersten Schritt wird ein homogener Halbraum vom Programm angenommen. Der RMS-Fehler, der als Abbruchkriterium herangezogen wird, liegt Standardmäßig bei eins. Diese Zahl gibt die prozentuale Abweichung des aktuellen Zyklenergebnisses von den gemessenen Daten an. Unterschreitet diese Abweichung die vorgegebene Prozentzahl, so wird kein weiterer Inversionszyklus gestartet. Der RMS-Fehler kann aufgrund von lokalen Minima und Maxima auch wieder ansteigen. Beide zuvor erwähnten Möglichkeiten kann der Nutzer jedoch individuell akzeptieren oder überstimmen.

Res2DInv legt außerdem eine bestimmte Gridform fest. Die Maschen werden nicht bis zu den Enden des Profils berechnet. Außerdem weist das Grid an den Rändern zur Mitte hin abfallende Flanken auf. Die nicht berechneten Bereiche, die dadurch entstehen, werden aufgrund der Strahlengeometrie nicht stark durchlaufen und wären somit ohnehin fragwürdig. Auch die Tiefe ist vordefiniert, sie kann jedoch vom Nutzer für jedes Profil verändert werden.

Zusätzlich gilt es Glättungen (*Flatness*) in Längsrichtung sowie Tiefe festzulegen. Dies geschieht über eine einzige Zahl, wobei Werte größer eins als Glättungsparameter für die Längsrichtung angenommen werden und Dezimalzahlen kleiner eins für die Tiefe. Ungeglättet steht diese Zahl bei eins. Mit dieser Funktion kann daher nur in eine Richtung geglättet werden.

Ähnlich zur Glättung kann auch eine robuste Inversion durchgeführt werden. Wird vor Beginn der Inversion der Zusatz *Robust* gewählt, so werden Ausreißer mit Hilfe der Berechnung „gemessene Daten minus berechnete Daten“ detektiert und anschließend reduziert. Des Weiteren werden zwar die einzelnen Schichten geglättet, die Schichtgrenzen jedoch ungeglättet beibehalten und darüber hinaus scharf und deutlich dargestellt.

IP-Berechnungen müssen bereits im Kopf der Daten definiert werden. Die Werte für IP werden in Res2DInv als chargeability berechnet. Sind diese jedoch in einer anderen Maßeinheit gegeben, werden sie vom Programm automatisch umgerechnet. Auszuwählen ist noch, ob eine gleichzeitige und Schrittweise Inversion von IP und scheinbaren spezifischen Widerstandswerten durchgeführt werden soll, oder anhand des letzten vorliegenden Iterationsergebnisses der scheinbaren spezifischen Widerstandsmessung die Inversion für IP berechnet werden soll.

Weitere Parameter, die das Ergebnis beeinflussen würden, sind hier nicht angeführt. Sie sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Abschließend ist zu erwähnen, dass Res2DInv aufgrund der Vereinfachung für den Nutzer und die dadurch automatisierte Anwendung, die Ergebnisse für jedes Profil bestmöglich darstellt. Will man eine Reihe von Profilen berechnen so empfiehlt es sich, entweder mittels Festlegung einer Legende die einzelnen Bereiche in der Darstellung zu definieren, oder über ein weiteres Programm die Darstellung einheitlich durchzuführen. Im Zuge dieses Projekts wurde die Darstellung der Res2DInv - Ergebnisse mit Matlab ausgeführt.

4.2.2. CRTomo

CRTomo (Kemna et al., 2000) ist im Vergleich zu Res2DInv keine kommerzielle, sondern eine echte Forschungssoftware. Sie ist rein zum Zweck von diversen Forschungsanwendungen erstellt worden.

Wie in Res2DInv müssen auch in CRTomo einige Parameter vorab gewählt werden. Dabei handelt es sich in den ersten Zeilen um die Maschenweite des Gitters, sowie Elektrodenabstände und die Anordnung. Diese Parameter werden über eine Datei eingelesen. Ebenso wird ein Pfad für das Ausgabe-File (Ergebnis) verlangt.

Ferner gilt es die Glättungsparameter in Profilrichtung, sowie in Tiefe anzugeben. Die ganzzahligen Werte geben an, wie viele der Maschenelemente zur Glättung herangezogen werden. Stehen beide Parameter auf eins, so wird keine Glättung vollzogen.

Auch in CRTomo kann eine robuste Berechnung der Inversion gewählt werden. Dabei entsteht ähnlich zu Res2DInv ein glatteres Ergebnis.

Die nächsten Punkte beschäftigen sich mit den Abbruchkriterien. Wie auch in Res2DInv werden die Anzahl der maximalen Inversionszyklen, sowie Fehlergrenzwerte angegeben. Jedoch ist hier zu beachten, dass in CRTomo zwei Fehler angegeben sind. Dabei handelt es sich zum Einen um den relativen Fehler ($b[\%]$) und zum Anderen um den absoluten Fehler(a). Aus diesen beiden Werten entsteht ein Gesamtfehler nach

$$\varepsilon R = a + b \cdot R \quad (4.1)$$

wobei R den Widerstand darstellt. Laut dieser Formel ist der gesamte Fehler $\varepsilon \cdot R$ vom Widerstand abhängig. Stellen sich große Werte für R ein, so hat der relative Fehler (b) mehr Einfluss, bei einem kleinen Widerstandswert spielt der absolute Fehler (a) stärker hinein. Um sich die Auswahl der Fehlerparameter zu erleichtern, bedient man sich der Statistik.

Für die IP-Berechnung muss nur eine Wahr-/Falschabfrage bestätigt werden. Im Vergleich zu Res2DInv werden die IP-Daten nicht in chargeability berechnet, sondern mit der Phase. Das bedeutet, dass diese Werte vor Beginn der Berechnung angepasst werden müssen.

Mittels Histogrammen (siehe Abbildung 4.4 oben) kann der absolute Fehler (a) gut abgeschätzt werden. Wird dieser zu groß gewählt, werden Daten vernachlässigt. Bei zu kleiner Annahme des absoluten Fehlers kommt es zu einem erheblichen Mehr an benötigten Berechnungen. Ist das Optimum für den jeweiligen Datensatz gefunden, kann ein Plot der Gesamtfehler, in Abhängigkeit des relativen Fehlers, erstellt werden (siehe Abbildung 4.4 unten), um den geeigneten relativen Fehler zu wählen.

CRTomo hat als letzten wichtigen Parameter eine Wahr-/Falschabfrage ob weitere Datensätze invertiert werden sollen. Dadurch kann der Nutzer mehrere Inversionen in Reihe berechnen und somit Stillstandszeiten verringern, was ein erheblicher Vorteil ist.

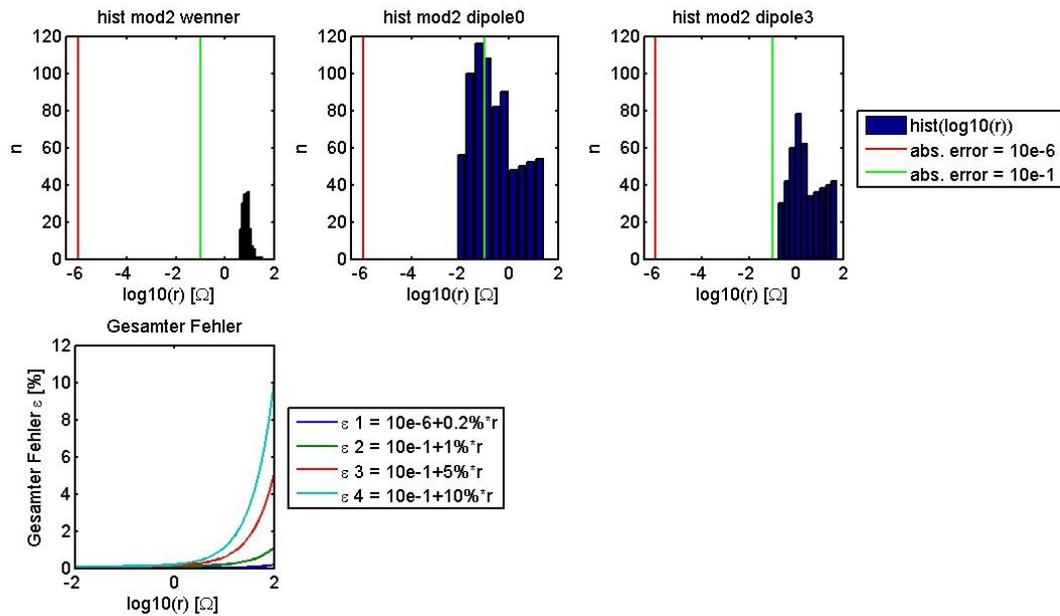


Abbildung 4.4.: Abbildung der Histogramme verschiedener Anordnungen, zur Abschätzung der absoluten Fehler (oben); Abbildung des Gesamtfehlers (unten)

4.3. Ergebnisse und Folgerung

Beide Algorithmen führen unabhängig voneinander zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Voraussetzung für einen Vergleich der Ergebnisse ist eine Darstellung der beiden Datensätze mit den gleichen Darstellungsparametern. Genauer bedeutet das, dass die Ober- sowie Untergrenze der Widerstandsskala gleich definiert werden muss und darüber hinaus die Abbildung der beiden Ergebnisse gleich skaliert dargestellt wird.

In Abbildung 4.5 sind nun die Ergebnisse der Inversion zu den Startmodellen 1, 2 und 3 mittels CRTomo und Res2DInv zu sehen.

Die Inversionsergebnisse der einzelnen Modelle ähneln sich grundsätzlich. Res2DInv löst in allen Fällen das Widerstandsfeld als solches besser auf, jedoch sind im Bereich der Anomalie die Lösungen von CRTomo, sowohl Lage und Ausdehnung, wie auch Gradient betreffend, aussagekräftiger.

Die Folgerung aus diesen Erkenntnissen leitet sich dahingehend ab, dass beide Algorithmen ähnlich funktionieren und beiden das Vertrauen für weitere Berechnungen geschenkt werden kann. Es ist zu beachten, dass noch nicht alle möglichen Einstellungen aufeinander abgestimmt sind und dass bei diesen Inversionen keine IP - Werte berücksichtigt wurden.

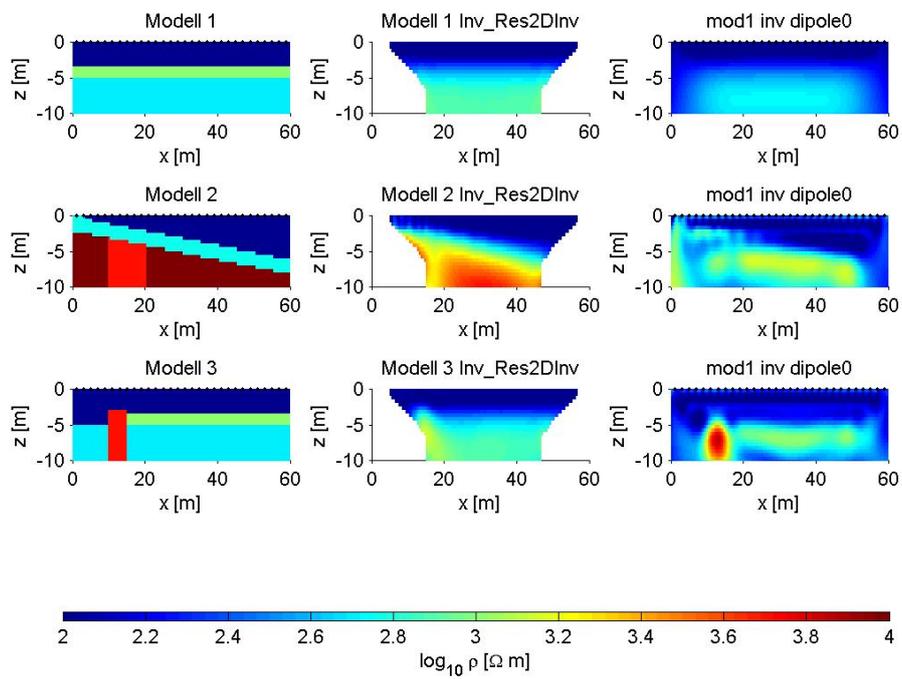


Abbildung 4.5.: *Abbildung der Modelle (links);
Abbildung der Inversionsergebnisse mittels Res2DInv (mitte);
Abbildung der Inversionsergebnisse mittels CRTomo(rechts)*

5. Elektrische Bildgebung für gemessene Daten in Rifle

Nach der erfolgreichen Überprüfung der beiden Inversionsalgorithmen, bezogen auf die Modelle und der numerischen Lösung, also die Daten die aus dem Modell numerisch erzeugt wurden und deren Inversion, werden nun die Daten einer reellen Messung im Messgebiet Rifle behandelt. Diese Prozessierung findet von hier an nur noch mit Res2DInv statt, da diese Ergebnisse letztendlich mit den, von (Flores-Orozca et al., 2012) in CRTomo berechneten, Ergebnissen abgeglichen werden sollen.

Dieses Kapitel beschreibt sowohl Messgebiet und dessen Eigenschaften, die Eigenheiten der Biomineralisation, die durchgeführten Messungen am zuvor erwähnten Standort sowie die daraus gewonnenen Daten und die Inversionsergebnisse dieser Datensätze.

5.1. Messgebiet - Geologie und Hydrologie

Das Messgebiet befindet sich südöstlich der Stadt Rifle, im Westen des US Bundesstaates Colorado. Rifle liegt rund 200 km westlich von Denver, in einem Tal in den Rocky Mountains. Die Fläche wird im Süden durch eine, parallel zum nördlichen Ufer (in Fließrichtung rechtes Ufer) des Colorado River verlaufende, Eisenbahnstrecke begrenzt. Im Norden und Westen verläuft die Route 6 direkt am Rand des Messgebiets. Östlich des Areal liegen ein Parkplatz und ein Gebäude (Kartbahn). Eine Übersicht des Areals wurde schon in 2.4 gegeben. An dieser Stelle wird in Abbildung 5.1 ein 3D Modell zum besseren Verständnis angeführt

Die Rocky Mountains sind eine überwiegend aus metamorphem und magmatischem Gestein bestehende Gebirgskette. Es gibt eine große Heterogenität im Gestein, wobei der Kalk, wie er aus den europäischen Alpen bekannt ist, nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt. In der Region der südlichen Rockies findet man oft die

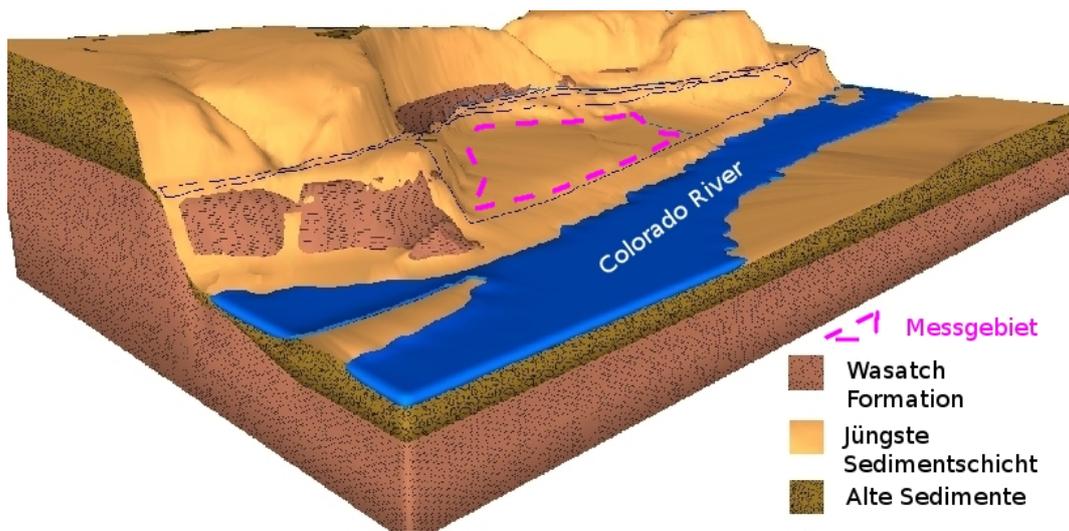


Abbildung 5.1.: 3D Modell des Messgebiets und dessen Umgebung

sogenannte *Wasatch Formation*. Dies ist auch in Rifle der Fall. Die Wasatch Formation besteht aus Tongestein, Sandstein und Konglomeraten. Von Geologen durchgeführte Kernbohrungen lassen auf eine durchschnittliche Tiefe von etwa 6 m bis 7 m schließen, bevor man auf die Wasatch Formation stößt (siehe Abbildung 5.2).

Weitere Bohrprotokolle werden in späteren Kapiteln angesprochen. Anhand dieser Bohrprofile kann grob eine Vorhersage des Schichtaufbaus im Areal gegeben werden. Die Abbildung 5.3 liefert ein mögliches Beispiel für die Schichten und deren Ausdehnung, wie sie am Areal vorzufinden sein sollten.

Laut (Williams et al., 2011) pendelt die Grundwasserfließrichtung im Areal, in Abhängigkeit des Pegels des Colorado Rivers, zwischen einem Nordazimuth von rund 180° bis 220° und somit zwischen südlicher und südwestlicher Richtung, wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist. Gemessen wurden diese Situationen mittels 20 Pegelmessungen am Areal vom (U.S. Department of Energy, 1999).

In dieser Region gibt es reiche Vorkommen von diversen Metallen, sowie fossilen Bodenschätzen und darüber hinaus auch Uranvorkommen. Diese wurden nach dem Abbau auf dem heutigen Messgebiet behandelt und weiterverarbeitet. Während dieser Tätigkeit, in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind, aufgrund von fehlendem Wissen und den dadurch lockeren Umweltrichtlinien, viele Verunreinigungen in den Boden gelangt.

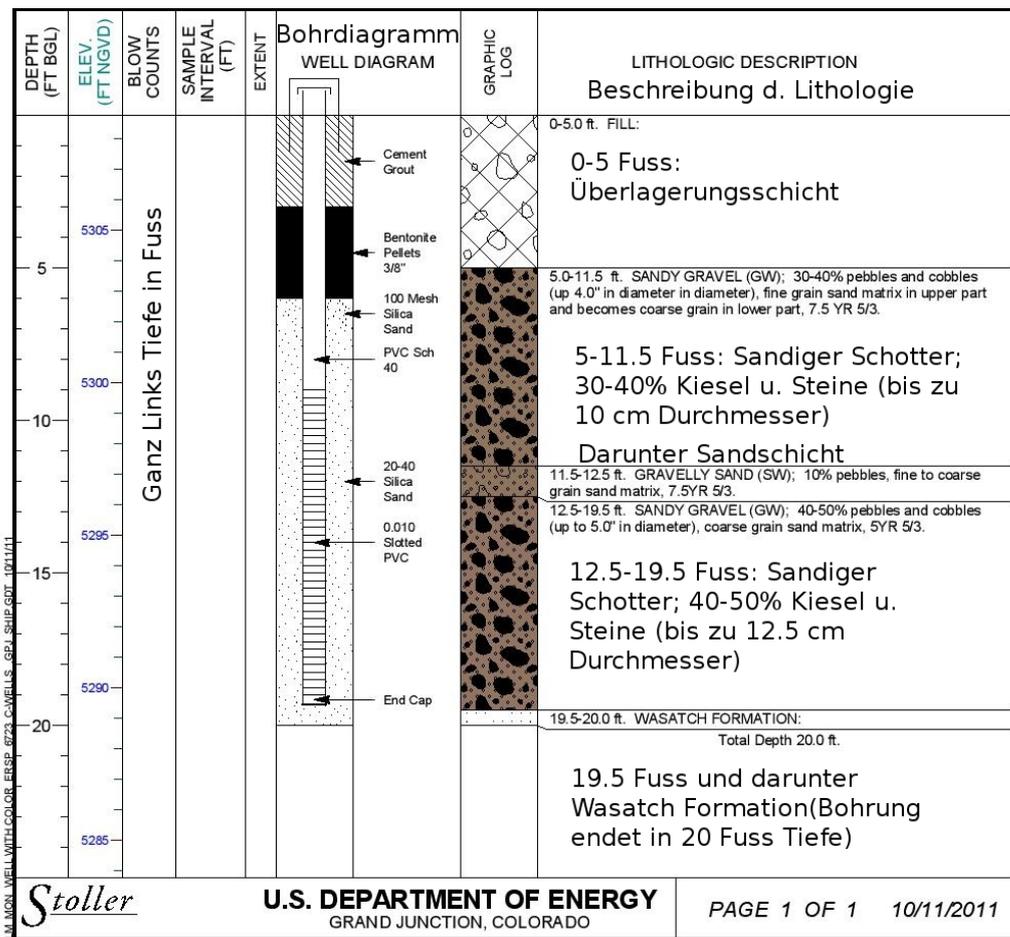


Abbildung 5.2.: Schematisches Protokoll einer, der auf dem Areal in Rifle durchgeführten, geologischen Kernbohrungen mit Übersetzungen

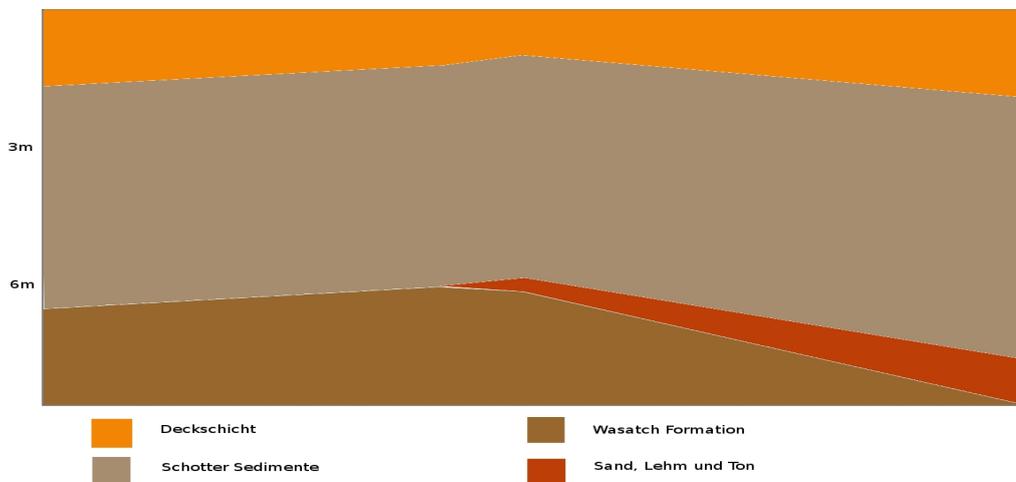
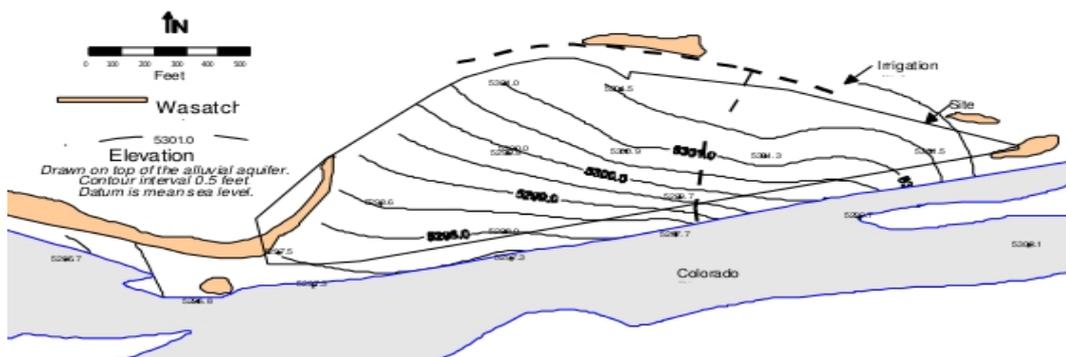
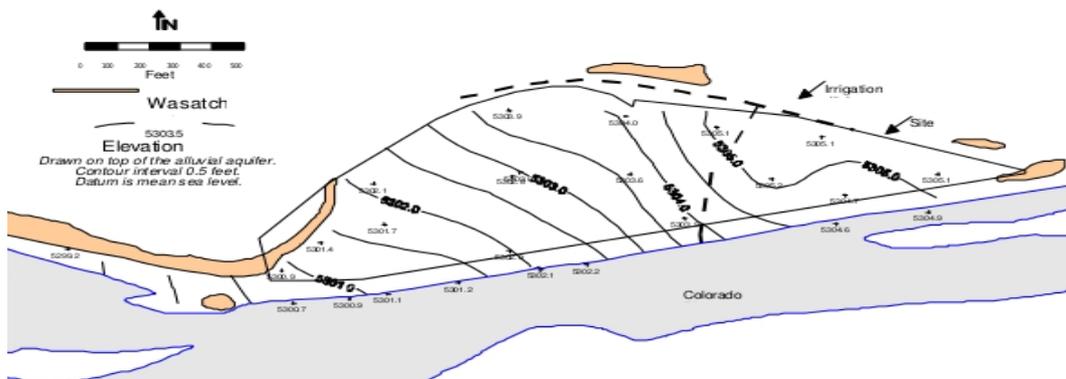


Abbildung 5.3.: Aus den Bohrprotokollen erstellte Skizze, zur schematischen Darstellung der Schichten im Messgebiet



(a)



(b)

Abbildung 5.4.: (a) Darstellung einer hydrologischen Karte des Messgebiets bei Niederwasser im Colorado River;
 (b) Darstellung einer hydrologischen Karte des Messgebiets bei hohem Wasserpegel im Colorado River;
 (U.S. Department of Energy, 1999)

5.2. Biomineralisation

Dieser Abschnitt erläutert die Grundlage, sowie Auswirkung der Biomineralisation und basiert auf (Williams et al., 2005). Es war lange Zeit ein Problem eine Sanierung von biologischen Altlasten durchzuführen, da die Aktivität der Mikroorganismen, sowie daraus entstandene metallische Ablagerungen, bei großen Arealen und mit sinnvoller Auflösung, nicht den Anforderungen entsprechend darstellbar waren.

Das Problem der Grundwasserkontamination durch Nuklearwaffenprogramme der Regierung, saurer Abwässer oder industrieller Quellen, haben das Interesse geweckt, mittels Mikroorganismen diese Verschmutzung als metallische, nicht lösliche Partikel ausfällen zu lassen.

Wie oben bereits erwähnt, war es lange Zeit nicht möglich die mikrobiologische Aktivität, beziehungsweise die ausgefallten Partikel zu überwachen und zu kartieren. Die geophysikalischen Methoden, im speziellen die Messung der scheinbaren spezifischen Widerstände und der Phasenverzögerung, haben sich in dieser Sparte als äußerst nützlich erwiesen.

All diese geophysikalischen Methoden basieren auf dem Prinzip eines anregenden Quellsignals in einem Untergrundkörper und der Messung der Signalantworten an gewählten Punkten. Feinste Änderungen der chemischen oder physikalischen Eigenschaften des Untergrundes können eine starke Änderung der Signalantwort mit sich führen. Gesteins- beziehungsweise Fluidleitfähigkeit, Korngröße, Verdichtung, sowie Grad und Art der Sättigung, werden als solche Veränderungen angesehen. Die Methode der Messung der scheinbaren spezifischen Widerstände und der Phasenverzögerung registriert beobachtbare Änderungen dahingehend, dass die Aufnahmefähigkeit der Bodenpartikel in Bezug auf elektrische Ladung beeinflusst wird.

Unterschiede zwischen Magnituden und Phasen der gemessenen Potentiale, relativ zum eingespeisten Strom, zeigen eine Frequenzabhängigkeit des scheinbaren spezifischen Widerstandes des Untergrundes. Starke Frequenzabhängigkeit findet sich an Stellen, an denen eine Ladungsabwanderung, aufgrund der Mechanismen der Grenzflächenleitung behindert wird, also an Stellen, an denen der Ladungstransfer von elektrolytisch zu elektronisch wechselt oder die Kornoberfläche den normalen Stromfluss erschweren. Als Ergebnis erhält man, wegen der Reaktionen auf den veränderten Weg der elektrischen Ladung durch den Porenraum, eine signifikante Veränderung der Phasenantwort für Sedimente mit mikrobiologischer Sanierung.

(Williams et al., 2005) hat dazu eine Testreihe mit Ergebnissen geophysikalischer Methoden angelegt, mit welchen Zink- und Eisensulfat reduzierende Bakterien (*Desul-*

foviobrio vulgaris) und deren Aktivität überwacht wurden. Dies geschah mit verschiedenen Zeitintervallen und Elektrodenpaaren.

Die Unterschiede der Phase (ϕ) von eingespeistem Strom und den resultierenden Potenzialfeldern wurden herangezogen, um Orte mit anomalem Phasenverhalten zu detektieren. In einem Vergleichsraum wurden keine signifikanten Phasenverschiebungen beobachtet.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen das komplexe Phänomen, das auch unter kontrollierten Bedingungen auftritt und die Nützlichkeit von geophysikalische Methoden für die Beobachtung der Porenumfangsänderung und der damit verbundenen Stimulation von sulfatreduzierenden Bakterien, sowie der Metallausfällung aus dem Fluid. Weiters war zu beobachten, dass der Abbau der mikrobischen Sulfate am Ort ihrer Induktion zuerst registriert wurde.

Die Auswertung für Biomineralisation hätte den Umfang dieses Projekts jedoch überstiegen, daher sind dahingehende Informationen aus (Flores-Orozco et al., 2013) zu entnehmen.

5.3. Messungen - Konfiguration

Die folgenden Zeilen geben Aufschluss über die einzelnen Profile der Messkampagne. Es werden sowohl Lage, Ausrichtung, Länge und Konfiguration jedes Profils erwähnt. Zudem werden etwaige Spezialfälle angesprochen, um auf mögliche Anomalien hinzuweisen (siehe Tabelle 5.1).

Die Messkampagne in Rifle umfasst zum Zeitpunkt der Auswertung 70 Profile. Es sind noch weitere Messungen auf dem Areal geplant, da sich während der Messung auf dem Gelände ein Labor in zentraler Position befand. Im Bereich des Zentrums ist daher verstärkt auf Artefakte zu achten, da das Labor geerdet ist und dadurch anthropogenes Rauschen verursacht wird.

Bei den Messungen in Rifle wurde ein Elektrodenabstand von 6 ft \approx 1,8 m gewählt. Durchgeführt wurde die Messung mit einem Dipol - Dipol Anordnungsprotokoll, wobei der Skip 3 beträgt. Das bedeutet, dass zwischen den beiden Stromelektroden und auch zwischen den beiden Potentialelektroden jeweils drei freie Elektroden liegen, die bei der Messung an der jeweiligen Position nicht verwendet werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Profile #1 und #2 nicht geoelektrisch beobachtet worden sind und daher nicht weiter erwähnt werden. Ferner ist Profil #70, aufgrund seiner Lage neben der Bahnstrecke und den dadurch entstandenen Fehlern in den Daten, vernachlässigt worden.

Profilnummer	Lage	Ausrichtung	Merkmale
3	SW	W-O	-
4	SW	W-O	-
5	SW	W-O	-
6	SW	W-O	-
7	SW	W-O	-
8	SW	W-O	Eisenmast neben Auslage, etwa bei Profilmittle
9	W	W-O	-
10	W	W-O	Kürzer als benachbarte Profile, Eisenmast begrenzt Auslage
11	W	W-O	-
12	W	W-O	-
13	W	W-O	-
14	W	W-O	-
15	W	W-O	-
16	N	W-O	-
17	N	W-O	-
18	N	W-O	-
19	N	W-O	-
20	N	WNW-OSO	-
21	N	SW-NO	-
22	N	SW-NO	-
23	N	SW-NO	-
24	N	SW-NO	-
25	SW	S-N	-
26	SW	S-N	-
27	SW	S-N	-
28	SW	S-N	-
29	SW	S-N	-
30	SW	SSW-NNO	Beginn an 29; Ende an 31

Profilnummer	Lage	Ausrichtung	Merkmale
31	SW	S-N	-
32	SW	S-N	-
33	SW	S-N	-
34	SW	S-N	-
35	SW	S-N	-
36	S	S-N	-
37	S	S-N	-
38	S	S-N	-
39	S	S-N	-
40	S	S-N	-
41	S	S-N	-
42	S	S-N	-
43	S	S-N	-
44	S	S-N	-
45	S	S-N	-
46	S	S-N	-
47	S	S-N	-
48	S	S-N	-
49	S	S-N	-
50	S	S-N	-
51	S	S-N	-
52	SO	S-N	-
53	S	WSW-ONO	-
54	S	WSW-ONO	-
55	S	WSW-ONO	-
56	SO	WSW-ONO	-
57	SO	WSW-ONO	-
58	O	WSW-ONO	-
59	O	WSW-ONO	-
60	S	WSW-ONO	Neben Bahn und Zaun
61	SO	S-N	-
62	SO	S-N	-
63	SO	WNW-OSO	Neben Zaun
64	SO	WNW-OSO	-
65	O	WSW-ONO	-
66	O	WSW-ONO	-
67	NO	WSW-ONO	-

Profilnummer	Lage	Ausrichtung	Merkmale
68	NO	WNW-OSO	-
69	NO	WNW-OSO	-

Tabelle 5.1.: Auflistung der Profile auf dem Areal in Rifle

Zusätzlich zu den Messungen mit der geoelektrischen Ausrüstung wurden im Vorfeld Kernbohrungen durchgeführt. In Abbildung 5.5 sind sowohl die Profile #3 bis #69, als auch die Position der Kernbohrungen zu sehen. Die Bohrungen LQ-114 und LQ-107 liegen innerhalb von nur wenigen Zentimetern und überschneiden sich daher in der Abbildung (rechter Rand). Eine Gewichtung in der Skizze des Schichtaufbaus darf deswegen nicht gemacht werden.

Auch die Bohrungen werden, in Tabelle 5.2 zusehen, kurz beschrieben. Im Anhang befinden sich Protokolle der geologischen Kernbohrungen.

Bohrungsbezeichnung	Lage	Merkmale
SY-06	S	-
LQ-114	SO	knapp neben LQ-107
LQ-107	SO	knapp neben LQ-114
CD-02	O	-

Tabelle 5.2.: Auflistung der relevanten Bohrungen auf dem Areal in Rifle



Abbildung 5.5.: Übersicht der in Rifle gemessenen Profile sowie der geologischen Kernbohrungen

5.4. Rohdaten

Die Rohdaten umfassen alle Werte, welche die Messeinheit im Laufe der Messung detektiert und abspeichert. Diese können für scheinbaren spezifischen Widerstand, Aufladungsfähigkeit und Phasenverzögerung, sowohl im positiven, wie auch im negativen Wertebereich liegen. Außerdem kann es vorkommen, dass fehlerhafte Daten mit NaN abgespeichert werden.

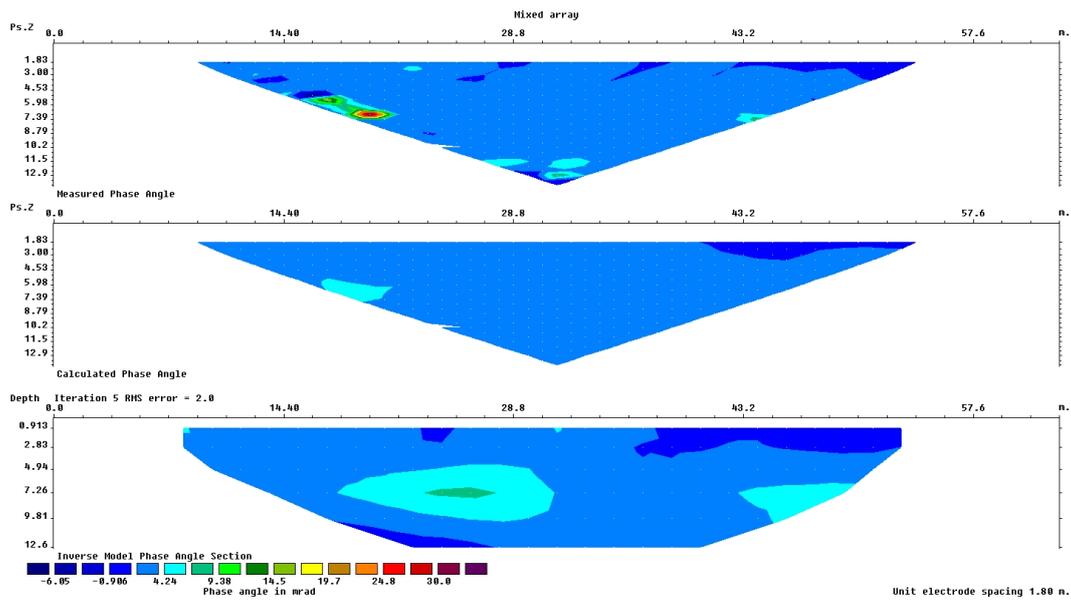
Als ersten Schritt der Prozessierung gilt es nun, die Daten von den fehlerhaften, sowie, falls dies nicht möglich ist, negativen Werten zu befreien. Des Weiteren gilt es im Zuge dieses Projekts, alle Phasenverzögerungswerte über 10 mrad auszusortieren.

Ähnlich zu diesem Schritt gilt es eine Filterung mittels Ausreißerdetektion für die beiden anderen Parameter, anhand der Standardabweichung durchzuführen. Dies geschieht um Spitzen zu entfernen, die aufgrund ihrer Umgebung einen nicht natürlichen Verlauf in den Daten beschreiben würden, der in einem von natürlichen Vorgängen geschichtetem Boden so nicht zu erwarten ist.

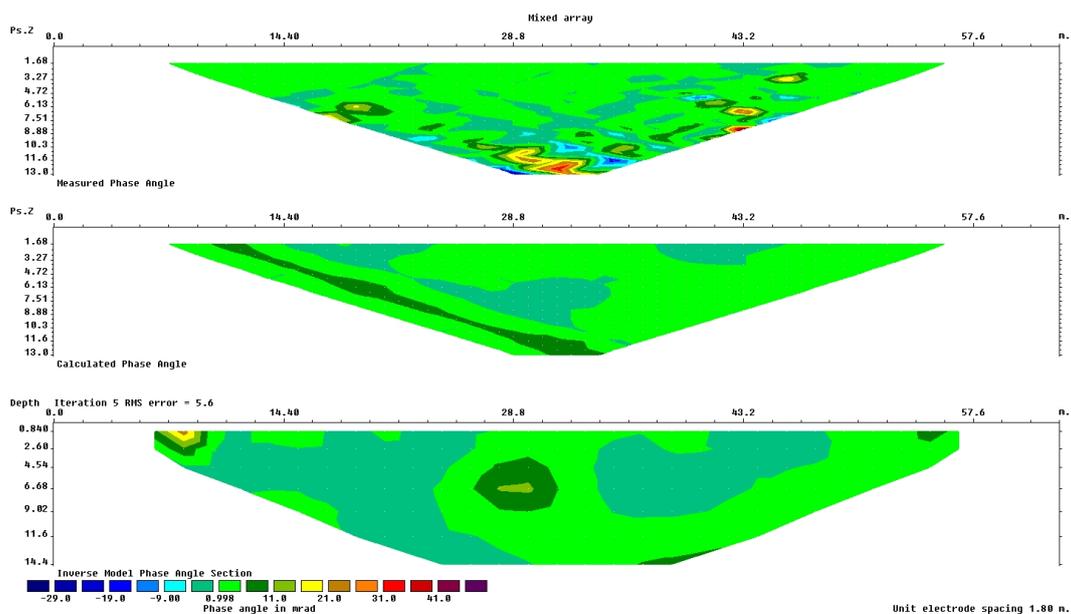
Diese oben beschriebenen Schritte wurden bereits im Zuge der Auswertung mittels CRTomo durch (Flores-Orozca et al., 2012) erledigt. Um die Qualität der noch ungefilterten Daten zu überprüfen, können in Res2DInv sogenannte Pseudosections berechnet werden. Sie zeigen die oben beschriebenen Ausreißer. Beachtet man hier die Größe der Strukturen, so erkennt man, dass viele der fehlerhaften Punkte, aufgrund der Auflösung (Anordnungsgeometrie), wahrscheinlich keinen Einfluss auf das Ergebnis haben werden, da sie nicht abgetastet (gesampelt) werden können. Trotz dessen ist eine Filterung in jedem Fall sinnvoll.

Als Beispiel für ein Profil mit zufriedenstellenden Datenpunkten, ist Profil #17 angeführt. Bei der Phasenverzögerung liegen nur sehr wenige Ausreißer vor ((a1); links und unten) und ein glatter Verlauf scheint auf, welcher nur wenig vom, mit Res2DInv modellierten (a2), Phasenverzögerungsfeld abweicht (siehe Abbildung 5.6).

Gegenteilig verhält es sich bei Profil #69. Es liegen bei der Phasenverzögerung einige Datenpunkte, mit starken Spitzen im Vergleich zum restlichen Feld, vor. Dadurch wirkt die gesamte Abbildung sehr unruhig (b1). Auch wenn im modellierten Ergebnis (b2) deutliche Strukturen vorhanden sind, so weichen beide Ergebnisse stark voneinander ab. Es ist mit erheblichen Filteraufwand und Abstrichen in der Datenmenge zu rechnen (siehe Abbildung 5.6).



(a)



(b)

Abbildung 5.6.: (a) Abbildung der Pseudosection für Phasenverzögerung im Profil #17 mit glattem Verlauf;
 (b) Abbildung der Pseudosection für Phasenverzögerung im Profil #69 mit einigen Ausreißern

5.5. Inversionsergebnisse

Die Inversionen sind im Rahmen dieses Projekts nur mit Res2DInv durchgeführt worden. Inversionsergebnisse, die mittels CRTomo erzeugt und zum Vergleich herangezogen werden, sind von (Flores-Orozca et al., 2012) berechnet und bereitgestellt

worden. Dieser Vergleich beruht auf rein visuellen Merkmalen in den Profilen.

Um für die komplette Messkampagne eine passende Inversions- sowie Auswerterroutine zu finden, wurde stichprobenartig an den Profilen #3, #17 und #53 mit unterschiedlichen Einstellungen getestet. Die daraus gewonnenen Parameter für die plausibelsten Ergebnisse werden auf den gesamten Datensatz angewandt. Die wichtigsten Parameter sind fünf Iterationszyklen bevor die Inversion abgebrochen wird, sowie eine robuste Inversion und Glättung über drei Elemente in die Tiefe.

An dieser Stelle ist noch anzufügen, dass sämtliche Profile, sowohl für scheinbaren spezifischen Widerstand, als auch für die Phasenverzögerung gemessen und ebenfalls für alle Profile komplexe spezifische Widerstände berechnet werden. Daher ist vor der Inversion zwingend nötig, die IP - Berechnung als zusätzlichen Input zu geben. In Res2DInv geschieht das einfach über das Menü.

5.5.1. Vergleich Res2DInv - CRTomo

Um die Inversionsergebnisse aus Res2DInv mit jenen aus CRTomo vergleichen zu können, ist es unbedingt notwendig, beide gleich darzustellen. Das führt dazu, dass die Ergebnisse von Res2DInv, an der richtigen Stelle des Ergebnisprotokolls, ausgelesen und mit Matlab weiter prozessiert werden müssen.

Dazu wird ein Grid erstellt, dessen Knotenpunktskoordinaten jenen im Ergebnisprotokoll des Res2DInv - Ergebnisses entsprechen. Die dadurch entstandenen Maschen werden entweder mit den komplexen spezifischen Widerstandswerten, oder jenen der Phase, mittels einheitlich definierter Grenzwerte, sowie einheitlicher Intervallschrittweiten, gefüllt.

In den Abbildungen 5.7, 5.8 und 5.9 sind die Profile #7, #20 und #55 dargestellt. Es sind der Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit und die Phase zu sehen. Die jeweils linke Grafik (a), zeigt das Ergebnis der Res2DInv - Berechnung. Analog dazu, zeigt die rechte Grafik (b) das CRTomo - Ergebnis. Beide Ergebnisse sind gleich Parametrisiert.

Diese Profile wurden aufgrund von speziellen Merkmalen, wie Anomalien oder fehlender Schichtausprägung, gewählt. Diese Merkmale sollen helfen einen Vergleich mit den Res2DInv-Ergebnissen ziehen zu können. Zusätzlich zu den Profilen mit speziellen Merkmalen, wurde Profil #55 gewählt, das den typischen Schichtverlauf

wiedergibt, um auch diese Situation beurteilen zu können.

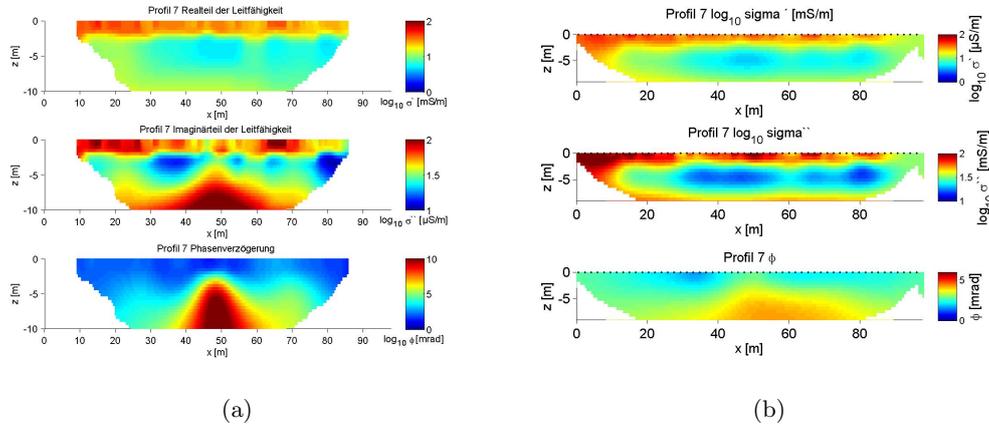


Abbildung 5.7.: Vergleich von Res2DInv und CRTomo mit Profil #7;
 (a) Abbildung der Inverionsergebnisse für Res2DInv von Profil #7;
 (b) Abbildung der Inverionsergebnisse für CRTomo von Profil #7

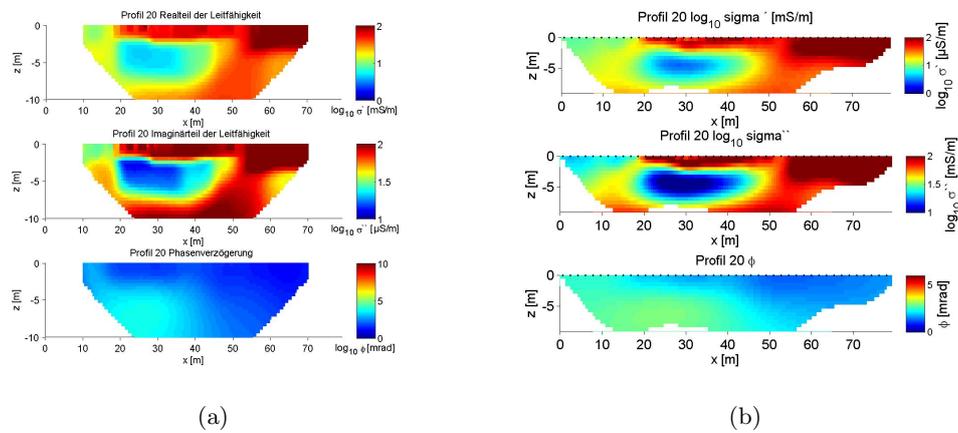


Abbildung 5.8.: Vergleich von Res2DInv und CRTomo mit Profil #20;
 (a) Abbildung der Inverionsergebnisse für Res2DInv von Profil #7;
 (b) Abbildung der Inverionsergebnisse für CRTomo von Profil #20

Die Übersichten, sowie alle Einzelprofile, sowohl für Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit, als auch für die Phase aus der Res2DInv - Berechnung, sind im Anhang zu finden. Ferner liegen auch die Übersichten der CRTomo - Ergebnisse vor, sowie die ausgewählten Profile #7, #11, #16, #20, #33, #55, #60, #63 und #69, bezogen auf Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit, als auch für die Phase.

Wie auch bei der Auswertung der Inversionsergebnisse der Modelle, liefern beide

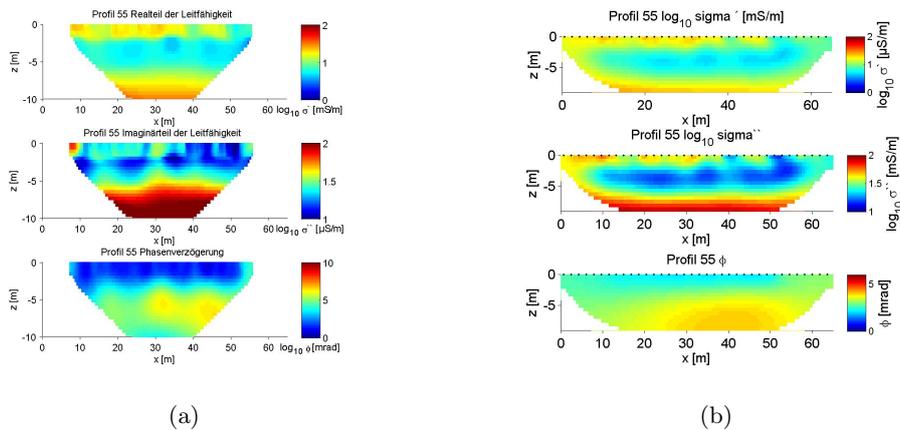


Abbildung 5.9.: Vergleich von Res2DInv und CRTomo mit Profil #55;
 (a) Abbildung der Inversionsergebnisse für Res2DInv von Profil #7;
 (b) Abbildung der Inversionsergebnisse für CRTomo von Profil #55

Algorithmen für diesen Datensatz ähnliche Ergebnisse. Es lassen sich Anomalien an denselben Stellen erkennen und keines der beiden Softwarepakete unterdrückt oder verzerrt Informationen, im Vergleich zum anderen. Die größten Differenzen ergeben sich durch die unterschiedlichen subjektiven Entscheidungen bei der Prozessierung durch mehrere Personen. Im Speziellen hat die Glättung den größten Einfluss auf das endgültige Ergebnis.

5.5.2. 2D Profile / Electrical Image

Als Electrical Image oder 2D Profile werden alle Messprofile angesehen. Die Ausdehnung ergibt sich aus den Elektrodenpositionen in Horizontalebene und der Eindringtiefe in Vertikalrichtung. Um diese 2D Profile zu erhalten, müssen die Daten, wie oben bereits erklärt, mit Res2DInv invertiert werden. Anschließend werden sie mittels Matlab bearbeitet, um eine einheitliche Darstellung zu erhalten.

Die Darstellung dieser 2D Profile ermöglicht das Auffinden von Anomalien. Ein möglicher Weg um dies durchzuführen ist, alle Profile in einer Übersicht auszugeben und Bereiche mit erhöhten Werten (farblich kodiert; gut zu erkennen) genauer zu betrachten.

Abbildung 5.10 zeigt Profil #15. Die Eindringtiefe und Profillänge sind anhand der Achsen abzulesen.

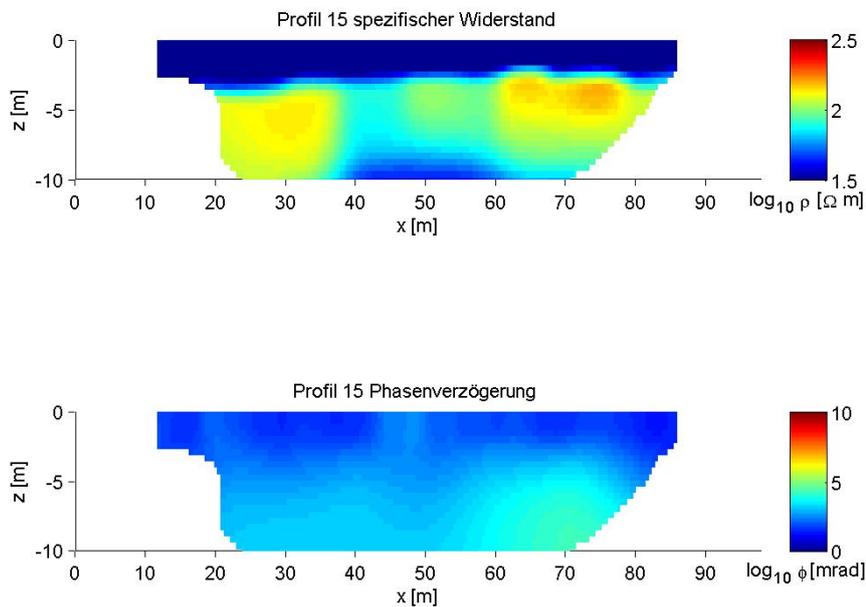


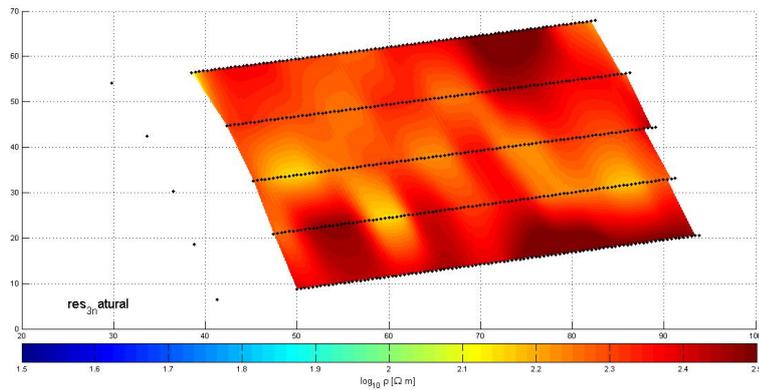
Abbildung 5.10.: *Electrical Image Profil #15 mit spezifischem Widerstand und Phasenverzögerung*

5.5.3. Karten mit ausgewählten Profilen und Interpolationen

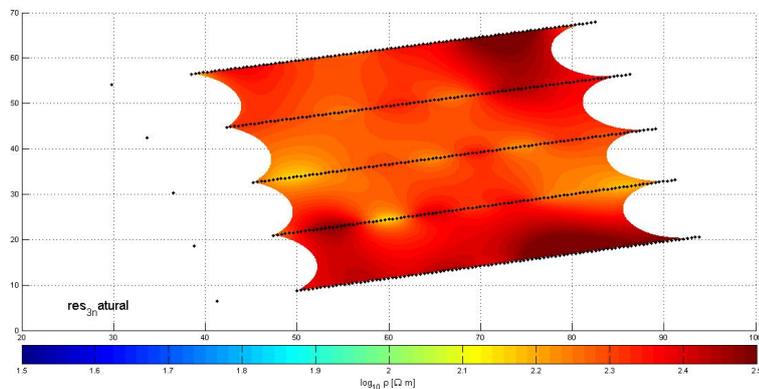
Für diese speziellen Karten werden nur Profile in, entweder grob Nord - Süd - Ausrichtung, oder grob West - Ost - Ausrichtung herangezogen. Mit diesen nun ausschließlich nahezu parallelen Profilen wird eine Interpolation berechnet. Die einzelnen von Matlab definierten Interpolationsmethoden werden damit verglichen.

Es gilt aus den Methoden „natürlich“, „nächste“ und „linear“ die geeignetste zu wählen. Die Methode „nächste“ wurde bereits frühzeitig ausgeschlossen. Nach Betrachtung der Ergebnisse (siehe Abbildung 5.11) wird ausschließlich die natürliche Methode benutzt. Die beiden anderen Arten liefern in Bezug auf Anomalien, sowie Gradient zwischen den Profilen, nicht die gewünschten Erfolge.

Die Profile in Nord - Süd - Ausrichtung liefern mit derselben Interpolationsmethode auch sehr ähnliche Ergebnisse, wie jene in West - Ost - Ausrichtung. Es sind ähnliche Spitzenwerte an denselben Positionen erkennbar. Bei der Verwendung aller Profile, somit einer Überlagerung der beiden Spezialfälle, kann es zu Berechnungslücken an den Enden der Profile kommen. Dennoch ergibt eine solche Berechnung sinnvolle Ergebnisse, die ebenfalls jenen ähneln, die nur die Nord - Süd - Ausrichtung, beziehungsweise die West - Ost - Ausrichtung berücksichtigen.



(a)



(b)

Abbildung 5.11.: *Abbildung der interpolierten Widerstandswerte für die Profile 53-57 in einer Tiefe von 3 m;
 (a) Abbildung der linear Interpolation;
 (b) Abbildung der natural Interpolation*

Falls eine Ausrichtung der Profile vor der Messung getroffen werden soll, ist es ratsam diese normal zur Fließrichtung des Grundwassers zu legen, um eventuell stark durchflossenen Kanäle detektieren zu können. Diese würden dadurch nicht zwischen den Profilen verlaufen und mittels Interpolation „übersehen“ werden.

Weitere Abbildungen zu den Interpolationen finden sich im Anhang.

5.5.4. Karten

Die hier angesprochenen Karten sind im Wesentlichen Schnitte durch die Vertikalprofile in bestimmten Tiefen. Im Zuge der Auswertung werden Schnitte in Abständen von 1 m erzeugt, bis hin zu einer Tiefe von 8 m, da man sich wie bereits erwähnt bei etwa 7 m bereits in der Wasatchformation befindet. Karten aus größeren Tiefen führen nicht zu sinnvollen Ergebnissen, da in der Gesteinsformation kein Grundwasserfluss auftritt und aufgrund der schlechten Leitfähigkeit Artefakte auftreten würden.

Um aus den Werten der einzelnen Profile eine flächenhafte Darstellung des Untergrundes an einer bestimmten Tiefe zu erhalten, muss mittels Interpolation in Matlab eine Lösung berechnet werden. Dazu ist ein natürlicher Interpolationsalgorithmus gewählt worden. Die Abbildung 5.12 zeigt einen solchen Schnitt für Widerstandswerte mit Interpolation in einer Tiefe von 5 m. Weitere Tiefschnitte finden sich, sowohl für scheinbare spezifische Widerstände, als auch für Phasenverzögerung, im Anhang.

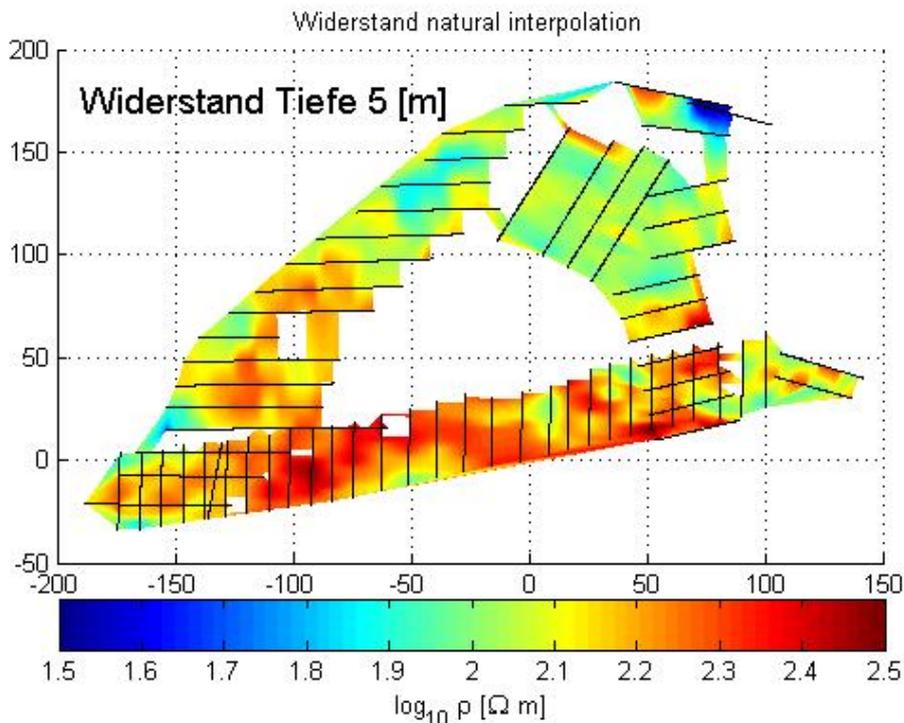


Abbildung 5.12.: Interpolationskarte der scheinbaren spezifischen Widerstandswerte in einer Tiefe von 5 m

6. Hydrogeologische Interpretation von elektrischen Darstellungen

Die Hydrogeophysik verbindet die beiden Teilgebiete der Geophysik und der Hydrologie, mittels petrophysikalischen Beziehungen. Genauer gesagt bedeutet das, dass die Geophysik, im speziellen Fall die Geoelektrik, Informationen über die Gesteins- oder Untergrundzusammensetzung liefert. Diese Informationen können dann herangezogen werden, um detaillierte Informationen über die Hydrologie zu gewinnen. Die Erklärungen in diesem Kapitel beziehen sich auf (Slater, 2006).

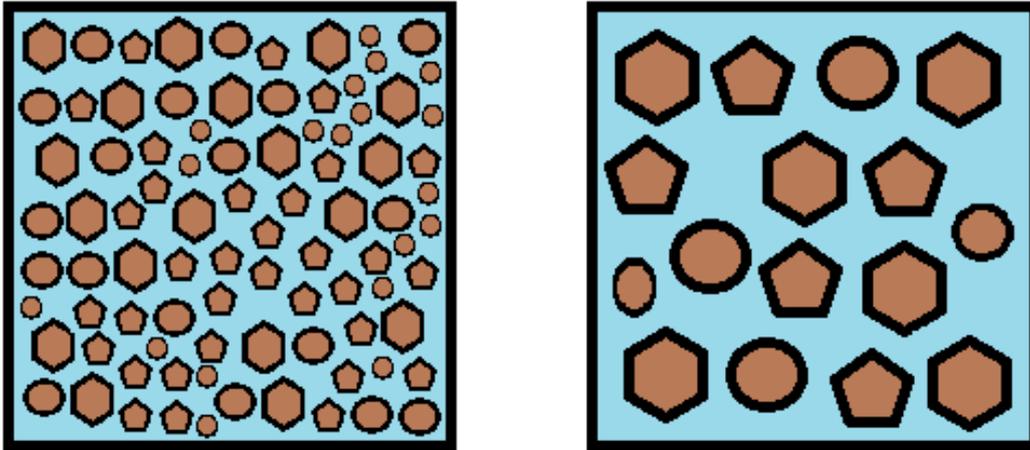
6.1. Parameter der Hydrogeologie

Die wichtigsten Parameter für die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit werden hier kurz vorgestellt.

Aus der Geophysik fließt neben der Phasenverzögerung ϕ auch der komplexe scheinbare spezifische Widerstand ρ^* in die Beziehung ein. Häufiger jedoch wird der Kehrwert, komplexe spezifische Leitfähigkeit σ^* , verwendet. Daraus lassen sich wie in Kapitel 3.5 erklärt, Real- und Imaginäranteil berechnen. Liegen nur Werte aus einer Widerstandsmessung vor, so entfällt der Term der Phasenverzögerung und in weiterer Folge die imaginären Anteile der Leitfähigkeit.

Aus dem Bereich der Petrophysik fließen S_{por} , die spezifische Oberfläche im Einheitsporenvolumen und die Porosität Φ (Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen eines Stoffgemisches) (siehe Abbildung 6.1), die Sättigung S_w (gibt an zu welchem Prozentsatz der Untergrund vom Fluid gesättigt ist) und die Leitfähigkeit des Fluids σ_w (unter Laborbedingungen getestet).

Mit Hilfe dieser Werte werden zunächst bekannte Gesetze befolgt und anschließend die hydraulische Leitfähigkeit berechnet.



*Abbildung 6.1.: Linkes Bild: Große spezifische Porenoberfläche (S_{por}) und geringe Porosität (ϕ);
Rechtes Bild: Kleine spezifische Porenoberfläche (S_{por}) und große Porosität (ϕ)*

6.2. Hydraulische Leitfähigkeit

Die hydraulische Leitfähigkeit „K“ beschreibt, wie der Name schon verrät, das Durchflussverhalten eines Fluids durch einen gesättigten Körper, in Bezug auf äußere Faktoren. Die hydraulische Leitfähigkeit ist schwer zu modellieren und nicht direkt messbar. Eine Abschätzung der durchschnittlichen hydraulischen Leitfähigkeit ist mittels Pumpversuchen möglich, jedoch aufgrund langer Messungen und der Notwendigkeit eines großen Arrays teuer. Die Auflösung ist folglich von der Ziehbrunnenanzahl abhängig, könnte aber mit Bohrkernen verbessert werden. Diese Methode ist ebenfalls zeitraubend, sowie teuer und liefert darüber hinaus nur an den wenigen Punkten, die zur Messung herangezogen wurden, vertrauenswürdige Ergebnisse, da der genaue Verlauf zwischen diesen Positionen nur geschätzt werden kann. Im Vergleich dazu sind geophysikalische Messungen günstiger, schneller und effizienter.

Die Tatsache der Begriffsanalogie von elektrischem Stromfluss, sowie Grundwasserfluss, eröffnet die Möglichkeit einer Berechnung von K mittels geophysikalischen Methoden. Strom und Grundwasser fließen durch den verbundenen, gesättigten Porenfreiraum. Es herrscht jedoch keine triviale Beziehung zwischen elektrischen Messungen und der hydraulischen Leitfähigkeit. Beide sind ihrerseits von petrophysikalischen Eigenschaften (zusammenhängender Porenfreiraum und Oberfläche der verbundenen Körner) abhängig.

Schon (Archie, 1942) hat Beziehungen in diesem Bereich hergeleitet. Dies bekannte Archie - Gleichung

$$|\sigma| = \frac{\Phi \cdot \sigma_w \cdot S_w}{a_g} \quad (6.1)$$

beschreibt die elektrische Leitfähigkeit σ mit der Porosität Φ , multipliziert mit σ_w (Leitfähigkeit des Fluids) und S_w (Sättigung; entspricht bei gesättigtem Boden 1), gebrochen durch den Geometriefaktor a_g . Umgeformt kann man mit bekannter Flüssigkeit und elektrischen Messwerten die Porosität bestimmen

$$\Phi = \frac{|\sigma| \cdot a_g}{\sigma_w} \quad (6.2)$$

Die Beziehung von Archie ist jedoch eingeschränkt. Archie hat sie unter der Annahme aufgestellt, dass die Leitung im Sättigungsmedium stattfindet. Hingegen haben die verschiedenen Füllmaterialien und Minerale unterschiedliche Eigenschaften. Als Beispiel sei hier Ton erwähnt, denn Tone leiten auf ihrer Oberfläche erstaunlich gut und die Archie - Gleichung darf in einem Fall, in dem Ton eine Rolle spielt, nicht als vertrauenswürdig betrachtet werden.

Wie schon in Kapitel 3.5 erwähnt, liegt bei jeder komplexen Messgröße ein Real- und Imaginärteil vor. Damit kann der Parameter K , sowohl für die reine Widerstandsmessung, wie auch für eine Widerstandsmessung mit induzierter Polarisation (Phase) berechnet werden.

6.2.1. Hydraulische Leitfähigkeit bei reiner Widerstandsmessung

Liegt keine Phase vor, so spiegelt der Realteil die gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstandswerte wieder. K ist von eben diesen Widerstandswerten abhängig. Die Widerstände werden von den zwei folgenden Termen beeinflusst:

- σ_{el} = Leitfähigkeit des Elektrolyts (abhängig vom Porenfreiraum)
- σ'_{int} = Oberflächenleitfähigkeit (abhängig von zusammenhängender Porenoberfläche)

Die Beziehung ($\sigma' = \sigma_{el} + \sigma'_{int}$) - $K(b)$ ist von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens und der Flüssigkeit abhängig. Die doppeltlogarithmische, lineare Beziehung $K(b)$ zu σ' kann sowohl positiv, als auch negativ sein. Bei gesättigten Böden mit geringer, spezifischer Oberfläche (z.B: Kies, Schotter) dominiert σ_{el} , die Beziehung, wie auch b sind positiv. Bei Böden mit großer spezifischer Oberfläche (z.B: Lehm, Ton) dominiert σ'_{int} und die Beziehung, sowie b werden negativ.

Mithilfe der veränderten Beziehungen

$$K = a \cdot (\sigma')^b \quad (6.3)$$

kann K mittels Widerstandsmessungen abgeschätzt werden, falls die doppeltlogarithmische Beziehung $\sigma' - K$ bekannt ist. Es ist dazu jedoch notwendig, die Parameter a und b ordentlich zu bestimmen (Vergleich von geoelektrischen Messungen mit K aus Pump- oder Darcytests). Die Abschätzung von K mittels Widerständen ist limitiert (σ' abhängig von σ_{el} oder σ'_{int} , jedoch müsste der jeweils andere Wert insignifikant sein).

In Abbildung 6.2 sind beispielhaft die Ergebnisse der hydraulischen Leitfähigkeit, in Abhängigkeit von b , dargestellt. Dabei wurden für a , sowie b durchschnittliche Werte gewählt. a , b und c (wird später benötigt) werden Anpassungsparameter genannt und dienen zur interdisziplinären Verknüpfung. Dieser Plot soll auf die schwierige Situation hinweisen, die bei der Abschätzung von K ohne IP vorliegt.

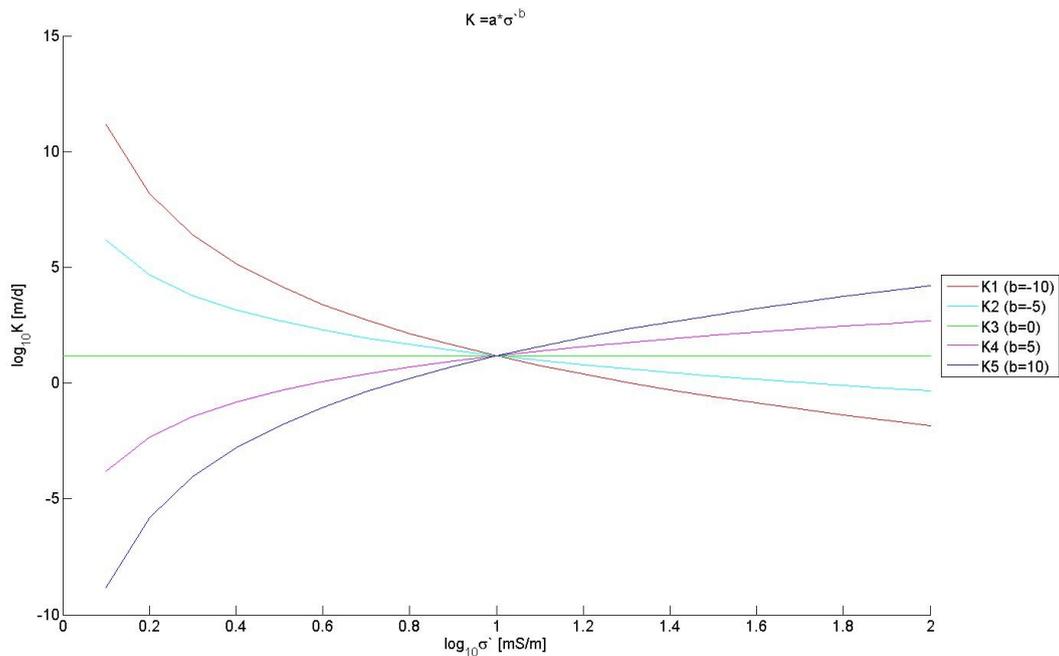


Abbildung 6.2.: Darstellung der hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von b ; $a = \text{const. } 15.2 \text{ []}$, b variiert von -10 bis 10 []

6.2.2. Hydraulische Leitfähigkeit bei Induzierter Polarisation

Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit mittels Induzierter Polarisation umgeht das zuvor genannte Problem. $|\sigma|$ und Ladungsspeicherung per Polarisation werden gemessen. Letzteres ist entweder die Phasenverzögerung (ϕ), oder das Integral

der Spannungsabklingkurve (m) (registriert nach abruptem Abschalten des eingespeisten Stroms). Im Zuge dieses Projekts wurde die Phasenverzögerung, oder kurz Phase, gemessen. Bei Verwendung von ϕ und $|\sigma|$ können die korrekten Beträge für σ' und σ'' ermittelt werden.

σ'' ist eine Funktion der zusammenhängenden Porenoberfläche ($\sigma'' \sim \sigma''_{int}$) und laut (Weller et al., 2010) von S_{por} abhängig

$$\sigma'' = a \cdot (S_{por})^b \quad (6.4a)$$

oder

$$\sigma'' = c \cdot S_{por} \quad (6.4b)$$

zu sehen in Abbildung 6.3 und in Abbildung 6.4 welche, die für Rife typischen Werte von σ'' im Bereich von $10^1 \mu\text{S/m}$ bis $10^2 \mu\text{S/m}$ wiedergibt.

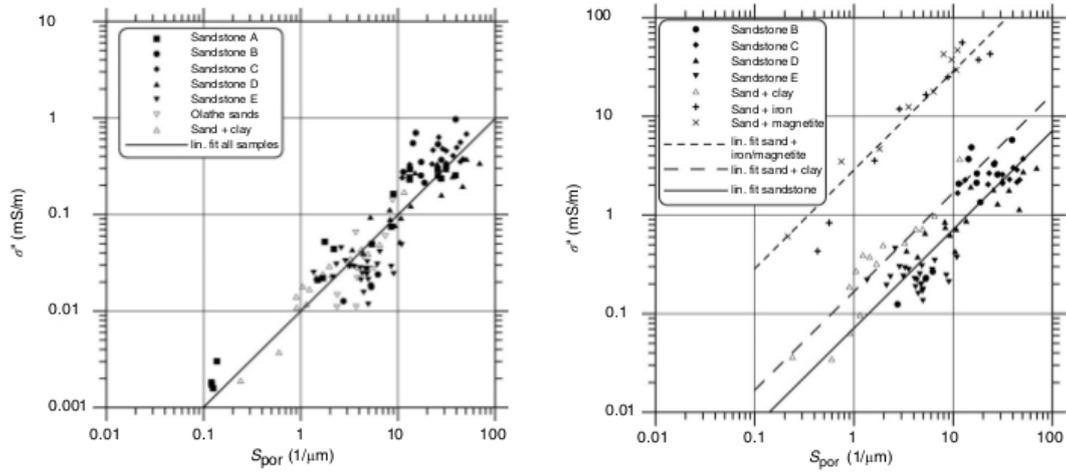


Abbildung 6.3.: Linkes Bild: Beziehung $S_{por} - \sigma''$ bei Sandstein, Sand und Lehm;
Rechtes Bild: Beziehung $S_{por} - \sigma''$ bei Sandstein, Sand und
Lehm, sowie Sand, Magnetit- und Eisenmineralen

Eine umgeformte Version der Kozeny-Carman Gleichung (Kozeny, 1927; Carman, 1939) für die hydraulische Leitfähigkeit liefert

$$K = \frac{0.00475}{F \cdot S_{por}^{3.1}} \quad (6.5)$$

Diese Gleichung basiert nun auf den zwei Unbekannten der Kozeny-Carman Gleichung (F und Spor). Der Formationsfaktor F findet bereits in der zuvor erwähnten Archie - Gleichung Anwendung.

$$|\sigma| = \frac{1}{F} \cdot \sigma_w \quad (6.6)$$

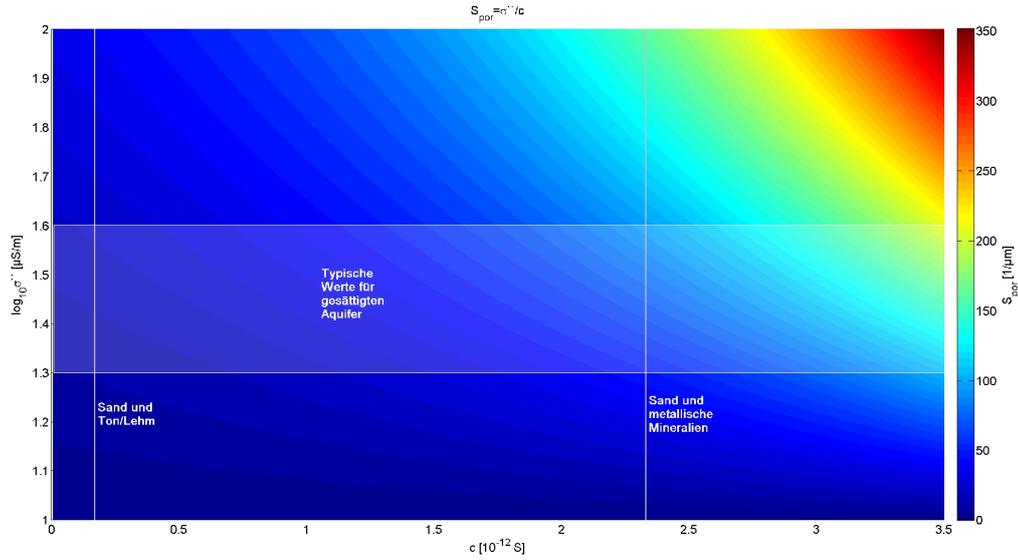


Abbildung 6.4.: Beziehung $S_{por} - \sigma''$ für die typischen Werte die in Rifle beobachtet wurden

Somit berechnet sich F entweder zu

$$F = \frac{1}{\Phi \cdot S_w} \quad (6.7a)$$

oder falls keine Information zur Porosität Φ vorliegt zu

$$F = \frac{\sigma_w}{\sigma'} \quad (6.7b)$$

F wird, aufgrund der Tatsache der geoelektrischen Messungen, mittels σ_w (Leitfähigkeit des Fluids) und σ' (Realteil der komplexen Leitfähigkeit) berechnet. σ_w wurde im Zuge der Auswertung dieses Projekts mit einem Mittelwert von $10^{2,44} \mu\text{S/m}$ beobachtet ((Flores-Orozco et al., 2013)). Die Abbildung 6.5 zeigt die typischen Werte für den Formationsfaktor bei den in Rifle üblichen Werten für σ' .

Anschließend findet sich in Abbildung 6.6 ein Flußdiagramm für besseres Verständnis.

6.3. Ergebnisse und Darstellung

Ähnlich zu den Abbildungen für die Widerstandsmessungen und den Phasenverzögerungswerten, gibt es auch für die hydraulische Leitfähigkeit Darstellungen. Diese liegen nur in horizontalen Plänen vor. Auch hier liegen Tiefenschnitte mit 1 m Abstand vor. In Abbildung 6.7 ist die hydraulische Leitfähigkeit im Areal der Messung nahe Rifle,

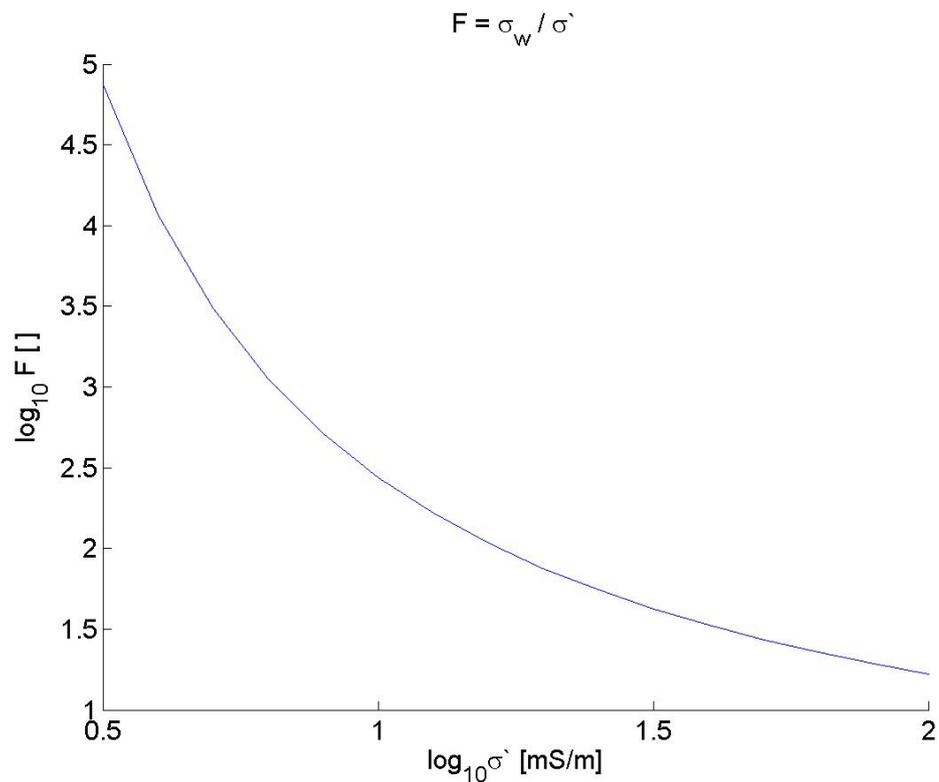


Abbildung 6.5.: Typische Werte für den Formationsfaktor F in Rifle, ermittelt mit den örtlichen Leitfähigkeitswerten

in 5 m Tiefe, mit einer natürlichen Interpolation zu sehen.

Anhand dieser und weitere Darstellungen der hydraulischen Leitfähigkeit, können Maßnahmen geplant werden, um mögliche Austragung kontaminierter Materialien zu unterbinden, oder die geeigneten Stellen für weitere Messungen und Bohrungen auf dem Areal gekennzeichnet werden. Die Darstellungen der weiteren Tiefenschnitte finden sich im Anhang.

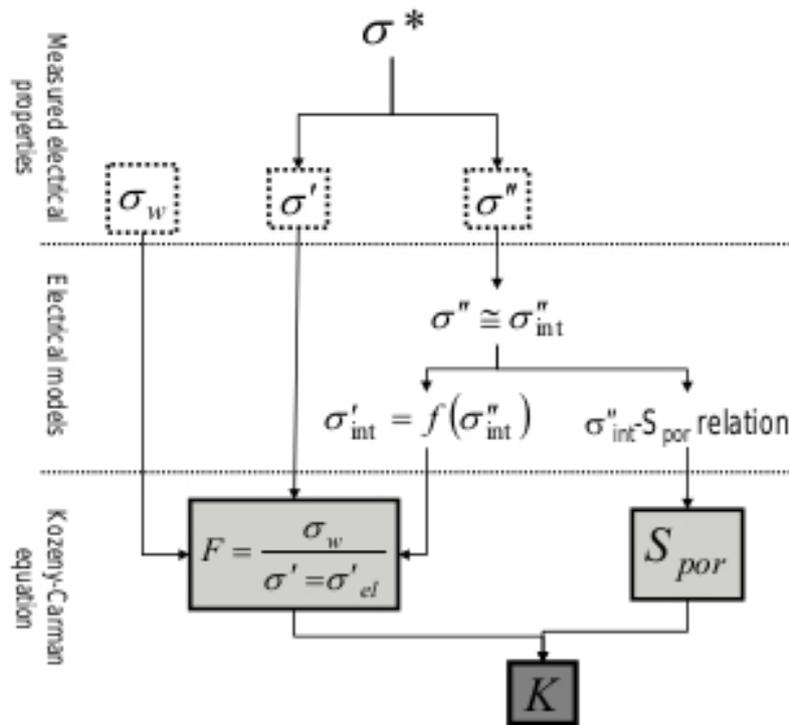


Abbildung 6.6.: Flussdiagramm für die Berechnung von K in Abhängigkeit von F und S_{por}

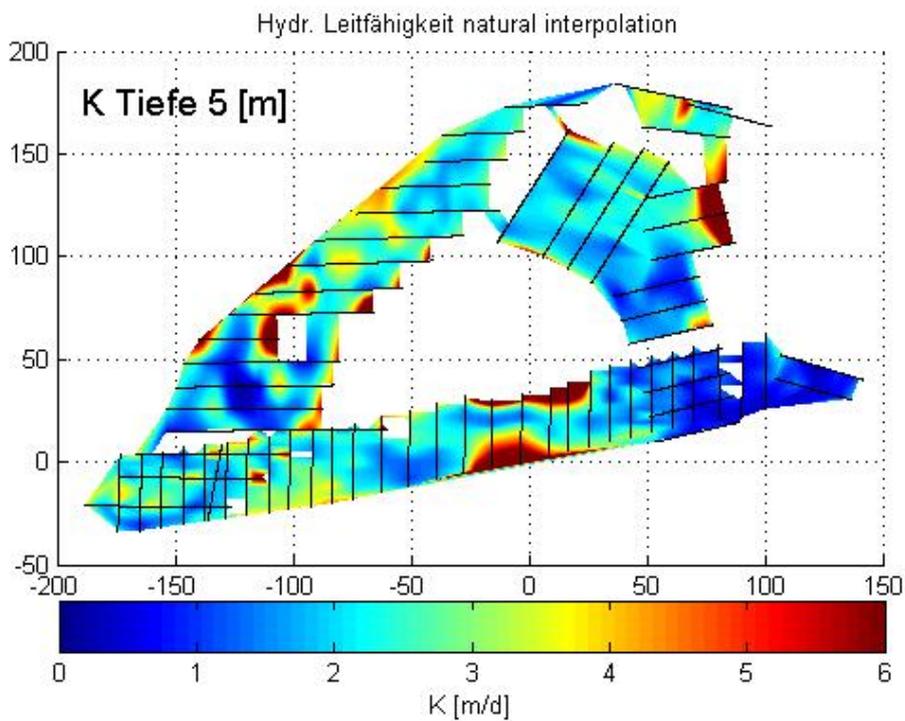


Abbildung 6.7.: Interpolationskarte der hydraulischen Leitfähigkeit in einer Tiefe von 5 m

7. Schlussfolgerung

Im Kapitel „Schlussfolgerung“ werden die Erkenntnisse zu den einzelnen Ergebnissen angeführt und darüber hinaus eine Interpretation zur tatsächlichen Situation abgegeben, die als mögliche Grundlage für zu treffende Maßnahmen herangezogen werden kann.

7.1. Modellierung und Vergleich von CRTomo zu Res2DInv

Wie schon im Kapitel 4.1 über die Modellierung angeführt wurde, sind bei der Berechnung der Modelle mittels CRTomo und Res2DInv vergleichbare Ergebnisse entstanden. Es ist daher anzunehmen, dass auch die Berechnung von realen Datensätzen zu analogen Ergebnissen führen würden. Da nun beide Algorithmen vertrauenswürdige Ergebnisse liefern und eine Auswertung der Messdaten mittels CRTomo bereits vorliegt, war es ein naheliegender Schluss, die weiteren Auswertungen mit Res2DInv durchzuführen, um die Ergebnisse von CRTomo und Res2DInv bezüglich realer Daten vergleichen zu können.

7.2. Inversionsergebnisse

Die mit Res2DInv berechneten Ergebnisse für scheinbaren spezifischen Widerstand und Phasenverzögerung, für die Messkampagne von Rifle, weichen wie erhofft von den bereits vorliegenden, in CRTomo berechneten, nicht stark ab. Der Informationsgehalt ist bei beiden Methoden in etwa gleich. Einzig die Randbedingungen unterscheiden sich bei den einzelnen Algorithmen stark. Res2DInv schneidet schon während der Inversion die wenig abgedeckten und somit unsicheren Bereiche weg. Beim CRTomo - Ergebnis wird dies erst nachträglich in Matlab, anhand der Coverage erledigt. Die Coverage gibt die Überdeckung und damit jene Bereiche, denen mehr Vertrauen geschenkt werden darf, an. Es sind somit identische Arten, jedoch

leicht variierende Ergebnisse. Mögliche Anomalien in den Profilen sind mit beiden Algorithmen zu detektieren.

Auf dem gemessenen Areal ist mit der geoelektrischen Messung und Auswertung, in etwa 6 m bis 7 m Tiefe, die Felsoberkante detektiert worden. Die geologischen Kernbohrungen bestätigen diese Annahme. Darüber befindet sich eine Sedimentdeckschicht, die vom Grundwasser stark gesättigt ist und teilweise von diesem durchflossen wird.

Betrachten man nur die Ergebnisse der Phasenberechnung, so heben sich fünf Profile deutlich von den anderen ab. Dies sind #7, #8, #60 und #63 (siehe Abbildung 7.1). Die Profile #7 und #8 fallen durch eine schmale, senkrecht liegende Anomalie auf, die aufgrund eines Metallmasten dort auftritt. Profil #63 liegt am östlichen Rand des Areals, direkt neben der Einfriedung des Nachbargrundstücks.

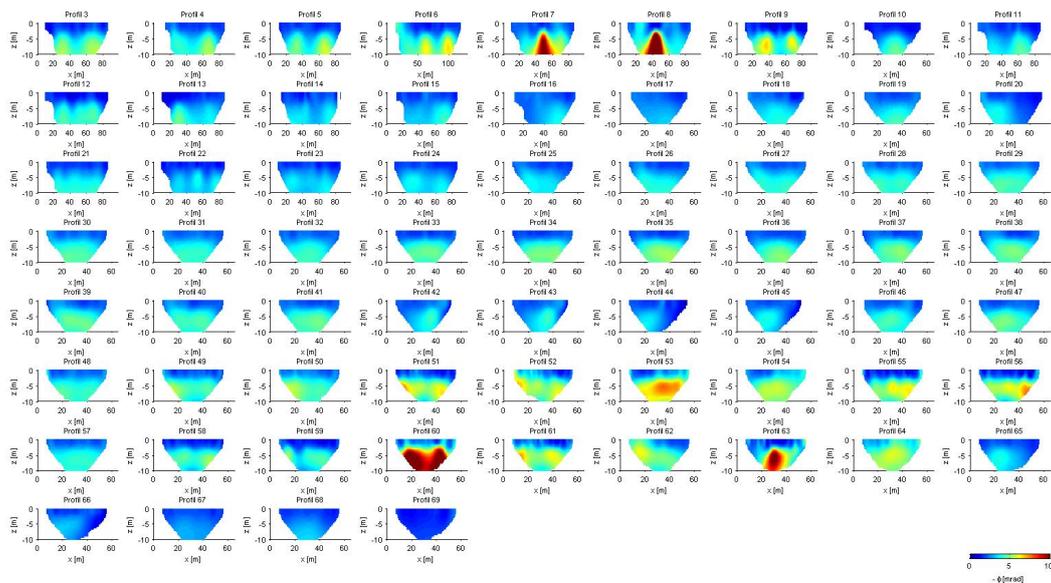


Abbildung 7.1.: Übersicht der Profile (Phasenverzögerung)

Das Profil #60 liegt am südlichen Ende des Areals. Es verläuft parallel zur Bahnstrecke und dem, diese abgrenzenden, Zaun. Die Zaunpfähle, sowie die Bahnstrecke haben über die gesamte Länge die Werte beeinflusst. Dieses Profil ist für die Tiefenschnitte nicht herangezogen worden.

Die Ergebnisse der scheinbaren spezifischen Widerstandswerte sind im Großen und Ganzen konsistent. Betrachtet man auch hier die Übersicht der Profile, in Abbildung 7.2, so fallen speziell die Profile #20 und #69 auf. Beide liegen am nördlichen Rand des Messgebiets und sehr knapp nebeneinander. Hier könnte Anomalie vorliegen, oder der Fels der Wasatch Formation noch sehr dominant vorhanden sein (direkt

unter Deckschicht).

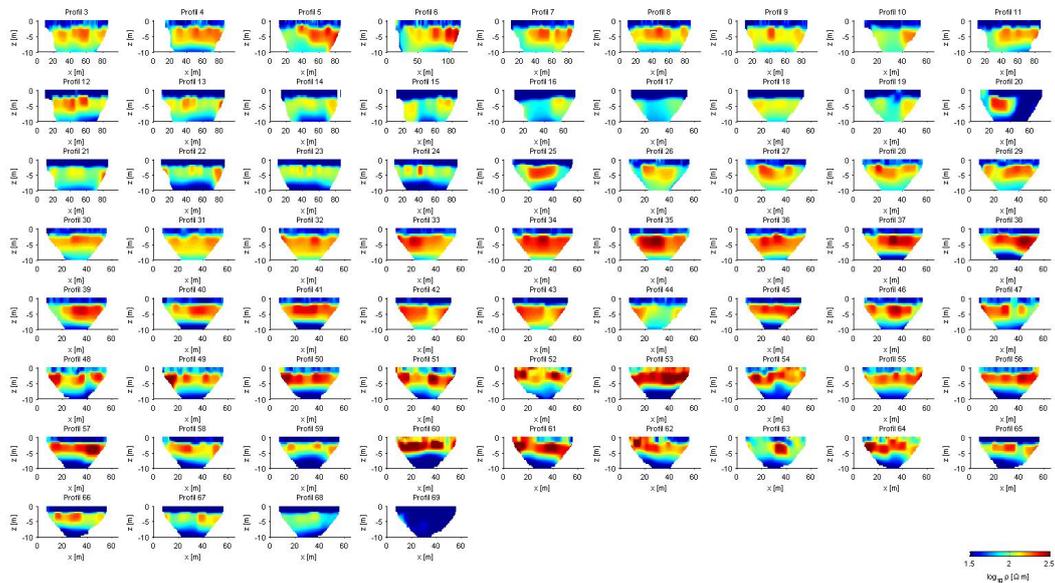


Abbildung 7.2.: Übersicht der Profile (scheinbare spezifische Widerstände)

7.3. Hydrogeophysikalische Ergebnisse

Die hydrogeophysikalische Situation lässt sich aus den Tiefenschnitten der Widerstands-/ Phasenverzögerungsergebnisse berechnen. Anhand dieser Karten kann man erkennen, welche Teile des Areals gesättigt, beziehungsweise ungesättigt sind und an welchen Stellen der Grundwasserfluss besonders hoch, im Vergleich zu anderen Stellen ist.

Eine Sättigung ist erst ab einer Tiefe von 3 m bis 5 m zu erkennen. Die darüber liegenden Bereiche sind ungesättigt und es liegen daher charakteristisch hohe Werte vor. Betrachtet man den Untergrund unterhalb 8 m Tiefe, ist ebenfalls mit einer komplizierten Situation zu rechnen, da hier bereits der impermeable Fels hervortritt und somit kein Fließen von Grundwasser stattfinden kann. Daher wurden keine weiteren Schnitte erzeugt, die eine Tiefe von 8 m unterschreiten.

Vorwegnehmen muss man an dieser Stelle, dass das Gelände von Norden nach Süden, in Richtung des Colorado Rivers leicht abfällt. Somit ist eine Sättigung im südlichen Teil des Areals weitaus logischer.

Auch der Grundwasserfluss ist aufgrund dieser Tatsache leichter zu erklären. Grundsätzlich fließt das Grundwasser von Norden nach Süden. Im Bereich des angrenzenden Flusses überwiegt eine sehr angeregte Grundwasserflusssituation. Um

dies jedoch besser erklären zu können, sind hydrologische Karten notwendig.

Feststellen lässt sich jedoch, dass etwaige Verunreinigungen im Boden über den Grundwasserfluss in den Colorado River gelangen können. Um dies verhindern zu können, müssten entweder Ziehbrunnen installiert, oder bauliche Maßnahmen ergriffen werden.

Die blau eingefärbten Bereiche weisen auf eine sehr geringe, die gelben und orangefarbenen Bereiche auf eine sehr hohe Flussrate hin. Rote Bereiche sind aller Wahrscheinlichkeit nach Artefakte, die auf der Tatsache basieren, dass der Untergrund in diesen Bereichen stark inhomogen ist und die Konstanten für die hydrogeologischen Gleichungen hier nicht mehr zulässig sind (müssten angepasst werden). Um dies genauer zu untersuchen, ist es notwendig, an diesen Stellen Bodenproben zu nehmen und weitere Messungen durchzuführen, beziehungsweise die vorhandenen Daten anzupassen.

Des Weiteren können solche Artefakte aufgrund gut leitender Materialien, in der Nähe der Messungen, entstehen (Masten, Zaun, Container etc.), oder wegen Mikroorganismen, die im Zuge des natürlichen Uranabbaus metallische Ausscheidungen im Boden hinterlassen. Artefakte aufgrund von gut leitenden Bauteilen können bei den nächsten Messungen verhindert werden, indem diese entfernt werden.

Literatur

- Archie, G. E. (1942). "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics." In: *Transactions of American Institute of Mineralogists Metallurgists and Petroleum Engineers* 146, S. 54–62.
- Berckhemer, Hans (2005). *Grundlagen der Geophysik*. 2. Fachbereich Geowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe Universität, Institut für Meteorologie und Geophysik, Frankfurt, S. 166–168.
- Binley, Andrew und Andreas Kemna (2005). "Hydrogeophysics". In: Hrsg. von Yoram RUBIN und Susan S. HUBBARD. Springer Netherlands. Kap. 5 DC resistivity and induced polarization methods, S. 129–156.
- Carman, Philip C. (1939). "Permeability of saturated sands, soils and clays." In: *Journal of Agricultural Science* 29, S. 263–273.
- Flores-Orozca, Adrián, Andreas Kemna und Egon Zimmermann (2012). "Data error quantification in spectral induced polarization imaging". In: *GEOPHYSICS* 77, S. 227–237.
- Flores-Orozco, Adrián, Kenneth H. Williams und Andreas Kemna (2013). "Time-lapse spectral induced polarization imaging of stimulated uranium bioremediation". In: *Near Surface Geophysics* 11, S. 531–544.
- Kemna, Andreas et al. (2000). "Complex resistivity tomography for environmental applications". In: *Chem. Eng. J.* 77, S. 11–18.
- Kozeny, Josef (1927). "Über kapillare Leitung des Wassers im Boden." In: *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien. Math. Naturwiss. Kl. Abt. 1*, S. 271–306.
- Milsom, John (2003). *Field Geophysics - The Geological Field Guide Series*. Wiley.
- Slater, Lee D. (2006). "Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: from petrophysical properties to aquifer geometries - a review". In: *Surveys in Geophysics* Vol. 28, Issue 2-3, S. 169–197.
- Tikhonov, Andrey N. und Vasilij Y. Arsenin (1978). "Solutions of Ill-Posed Problems". In: *Mathematics of Computation* 32.144, S. 1320–1322.
- U.S. Department of Energy (1999). "Final Site Observational Work Plan for the UMTRA Project Old Rifle Site". In: Project Number UGW-511-0017-06-000 Document Number U0042501. Grand Junction Office, S. 1–122.
- Weller, Andreas et al. (2010). "On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple data sets". In: *GEOPHYSICS* 75.4, WA105–WA112.

- Williams, Kenneth H. et al. (2005). “Geophysical Imaging of Stimulated Microbial Biomineralization”. In: *Environmental Science Technology* 39, S. 7592–7600.
- Williams, Kenneth H. et al. (2011). “Acetate Availability and its Influence on Sustainable Bioremediation of Uranium-Contaminated Groundwater”. In: *Geomicrobiology Journal* 28, S. 519–539.

Appendices

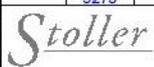
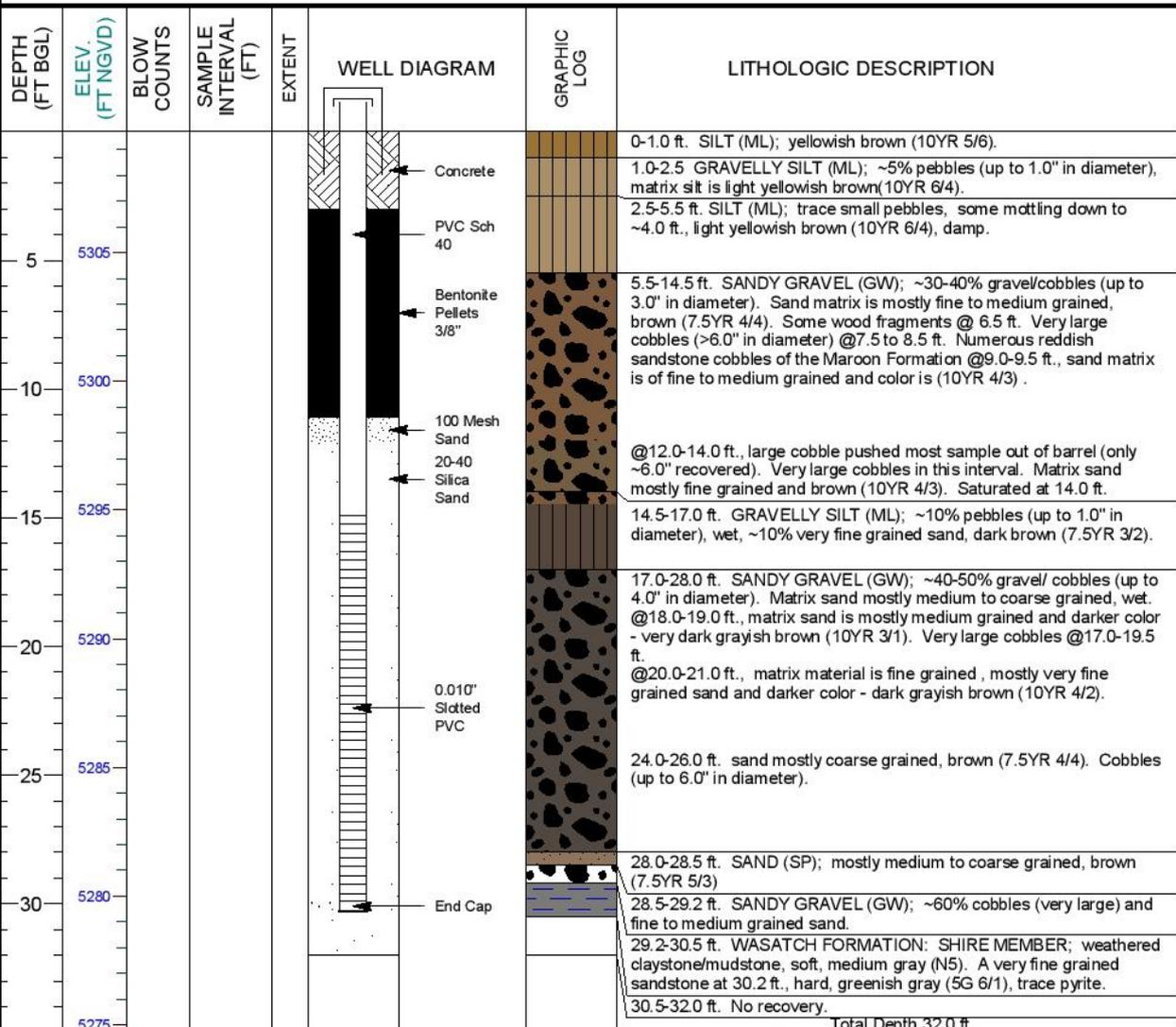
A. Bohrprotokolle

Folgender Anhang beinhaltet die vier erwähnten Bohrprotokolle. In jedem von Ihnen sind sowohl Bohrdaten (Ort, Datum, Koordinaten und Besonderheiten) wie auch die Beschreibung der Lithologie und ein Schichtenplan angeführt. Die Protokolle liegen allesamt in englischer Ausführung vor.

MONITORING WELL COMPLETION LOG RFO01-SY-06

PROJECT IFRC	WELL NUMBER RFO01-SY-06	DATE STARTED 3/31/2013
LOCATION RIFLE, CO	NORTH COORD. (FT) 625363.30	WELL ESTABLISHED 3/31/2013
SITE Rifle Old Processing Site	EAST COORD. (FT) 1358877.50	SURFACE ELEV. (FT NGVD) 5309.70
DRILLING METHOD Rotasonic	HOLE DEPTH (FT BGS) 32.00	TOP OF CASING (FT) 5311.50
DRILL COMPANY Boart Longyear	WELL DEPTH (FT BGS) 30.30	MEAS. PT. ELEV. (FT) 5311.50
RIG TYPE SONIC	WATER LEVEL (FT BGS)	SLOT SIZE (IN) 0.010
	WATER LEVEL DATE	BIT SIZE(S) (IN) 8.0

WELL INSTALLATION	INTERVAL (FT BGS)	DRILLER
SURFACE CASING:		Cain, R
BLANK CASING: 4 in.dia. PVC Sch 40	-1.8 to 14.9	LOGGED BY Goodknight, C.
WELL SCREEN: 4 in.dia. 0.01" Slotted PVC	14.9 to 29.9	SAMPLING METHOD Hand/Grab
SUMP/END CAP: 4 in.dia. PVC Sch 40	29.9 to 30.3	DATE DEVELOPED
GROUT: Concrete	0.0 to 3.0	REMARKS
SEAL: Bentonite Pellets 3/8"	3.0 to 11.1	
UPPER PACK: 100 Mesh Silica Sand	11.1 to 12.1	
LOWER PACK: 20-40 Silica Sand	12.1 to 32.0	

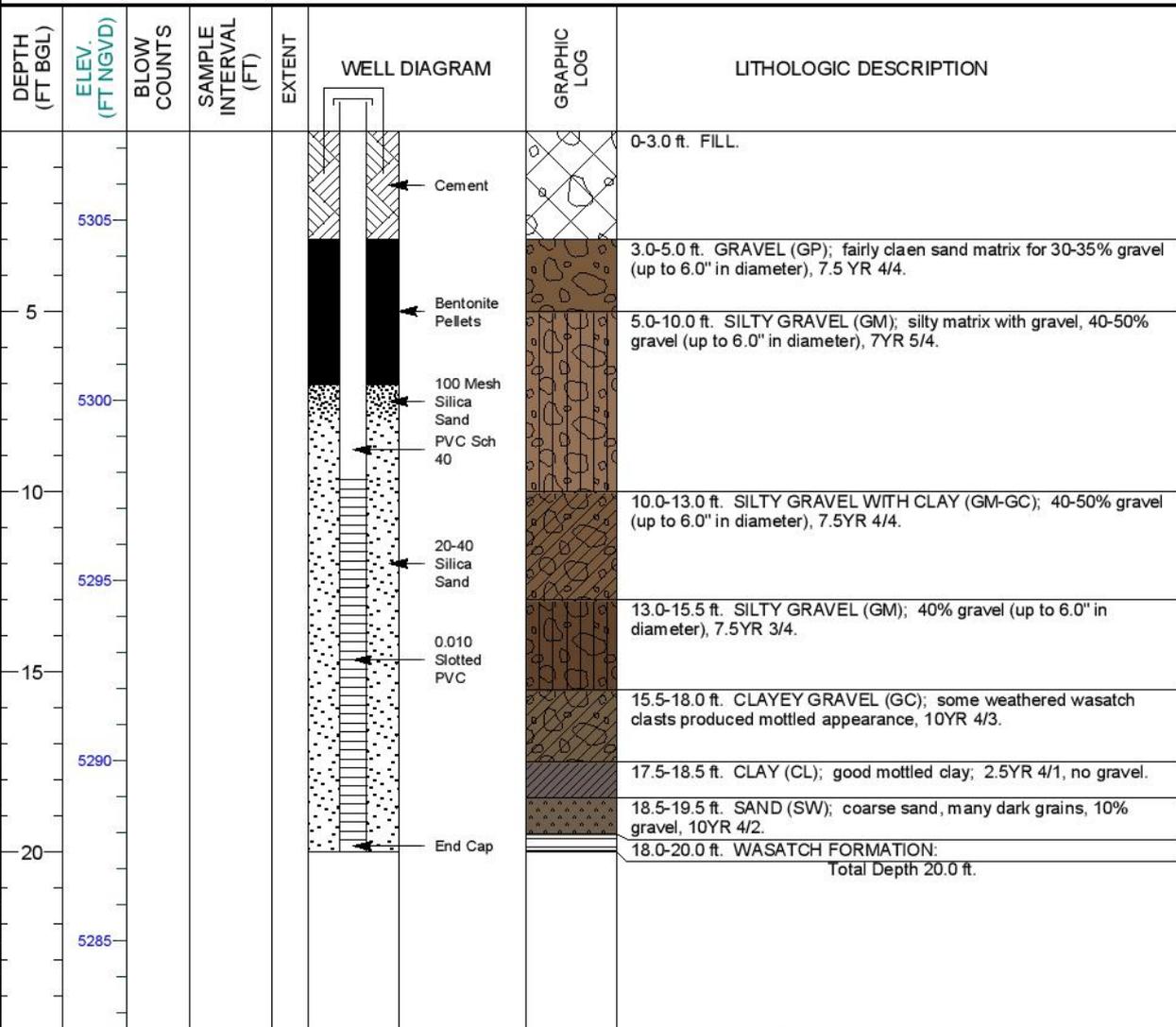


U.S. DEPARTMENT OF ENERGY
GRAND JUNCTION, COLORADO

MONITORING WELL COMPLETION LOG RFO01-LQ-107

PROJECT <u>ERSP</u>	WELL NUMBER <u>RFO01-LQ-107</u>	DATE DRILLED <u>11/13/2008</u>
LOCATION <u>Rifle, CO</u>	NORTH COORD. (FT) <u>625482.54</u>	SURFACE ELEV. (FT NGVD) <u>5307.45</u>
SITE <u>Old Rifle</u>	EAST COORD. (FT) <u>1359549.22</u>	TOP OF CASING (FT) <u>5307.95</u>
DRILLING METHOD <u>SONIC</u>	HOLE DEPTH (FT BGS) <u>20.00</u>	MEAS. PT. ELEV. (FT) <u>5307.95</u>
DRILL COMPANY <u>Boart Longyear</u>	WELL DEPTH (FT BGS) <u>20.00</u>	SLOT SIZE (IN) <u>0.010</u>
RIG TYPE <u>ROTOSONIC</u>	WATER LEVEL (FT BGS) _____	BIT SIZE(S) (IN) <u>6.0</u>

WELL INSTALLATION	INTERVAL (FT BGS)	WATER LEVEL DATE
SURFACE CASING:		DRILLER <u>Mallott, R.</u>
BLANK CASING: 4 in.dia. PVC Sch 40	-0.5 to 9.67	LOGGED BY <u>Dayvault, R.</u>
WELL SCREEN: 4 in.dia. Slotted PVC	9.67 to 19.67	SAMPLING METHOD _____
SUMP/END CAP: 4 in.dia. PVC Sch 40	19.67 to 20.0	DATE DEVELOPED _____
GROUT: Cement	0.0 to 3.0	REMARKS _____
SEAL: Bentonite Pellets	3.0 to 7.0	
UPPER PACK: 100 Mesh Silica Sand	7.0 to 8.0	
LOWER PACK: 20-40 Silica Sand	8.0 to 20.0	

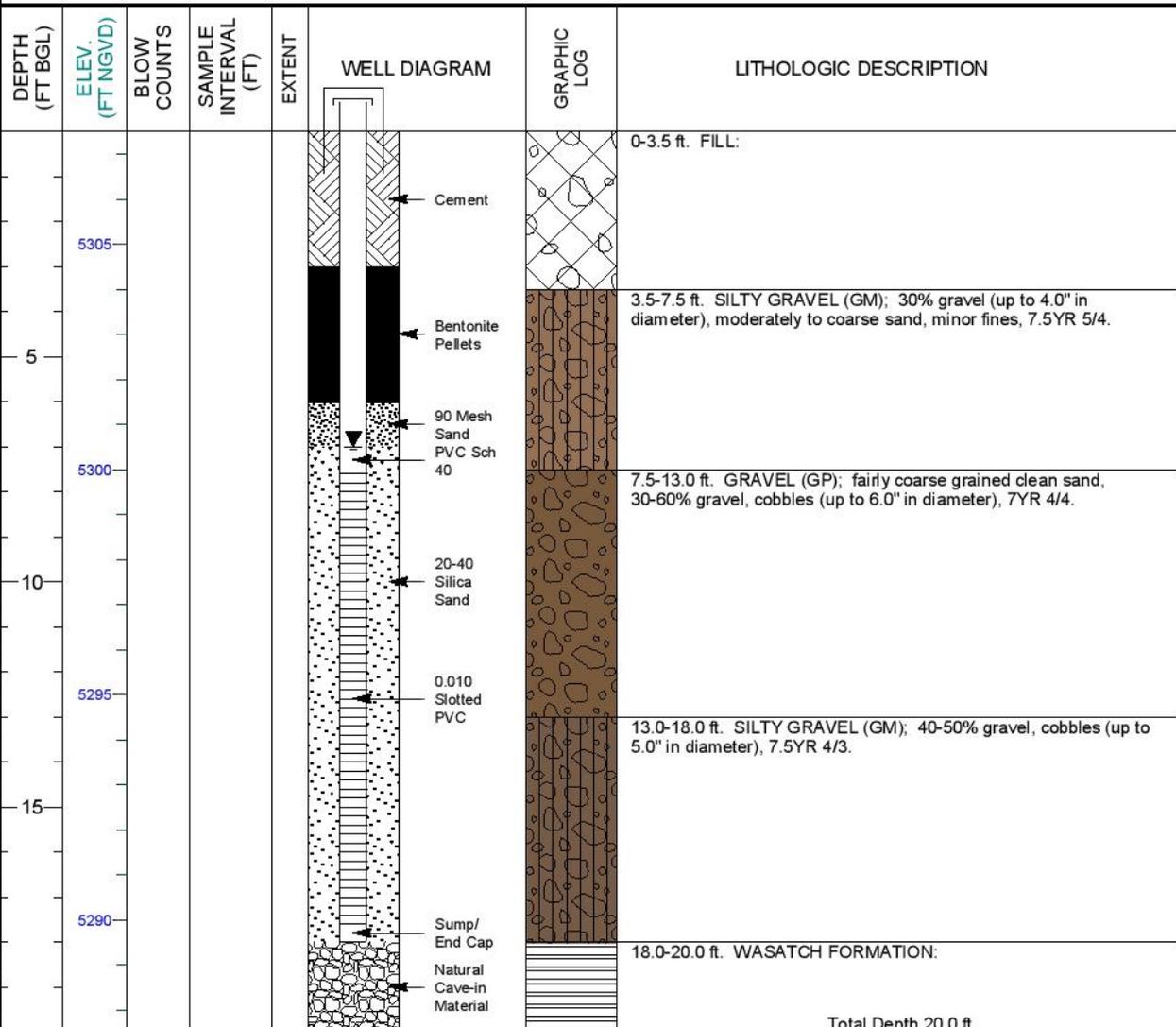


M:\MON_WELL_WITH_COLOR_REF_5749.GPJ_SHP.GDT_3/16/10

Bohrprofil für RFO01-CD-02

MONITORING WELL COMPLETION LOG RFO01-LQ-114

PROJECT ERSP	WELL NUMBER RFO01-LQ-114	DATE DRILLED 5/15/2009
LOCATION Rifle, CO	NORTH COORD. (FT) 625483.01	SURFACE ELEV. (FT NGVD) 5307.51
SITE Old Rifle	EAST COORD. (FT) 1359545.78	TOP OF CASING (FT) 5308.01
DRILLING METHOD ROTOSONIC	HOLE DEPTH (FT BGS) 20.00	MEAS. PT. ELEV. (FT) 5308.01
DRILL COMPANY Boart Longyear	WELL DEPTH (FT BGS) 18.00	SLOT SIZE (IN) 0.010
RIG TYPE SONIC	WATER LEVEL (FT BTOC) 7.5	BIT SIZE(S) (IN) 6.0 8.0
WELL INSTALLATION INTERVAL (FT BGS)		WATER LEVEL DATE 5/15/2009
SURFACE CASING: 4 in. dia. PVC Sch 40 -0.5 to 7.6		DRILLER Gastaneda, J.
BLANK CASING: 4 in. dia. Slotted PVC 7.6 to 17.6		LOGGED BY Dayvault, R.
WELL SCREEN: 4 in. dia. Slotted PVC 17.6 to 18.0		SAMPLING METHOD CONTINUOUS CORE (4")
SUMP/END CAP: 4 in. dia. PVC Sch 40 0.0 to 3.0		DATE DEVELOPED 5/15/2009
GROUT: Cement 3.0 to 3.0		REMARKS
SEAL: Bentonite Pellets 3.0 to 6.0		
UPPER PACK: 90 Mesh Sand 6.0 to 7.0		
LOWER PACK: 20-40 Silica Sand 7.0 to 18.0		



M:\MON_WELL_WITH_COLOR_ERSP_4281_SINGLE_CASING_WELLS.GPJ_SHIP.GDT_3/8/10

Stoller

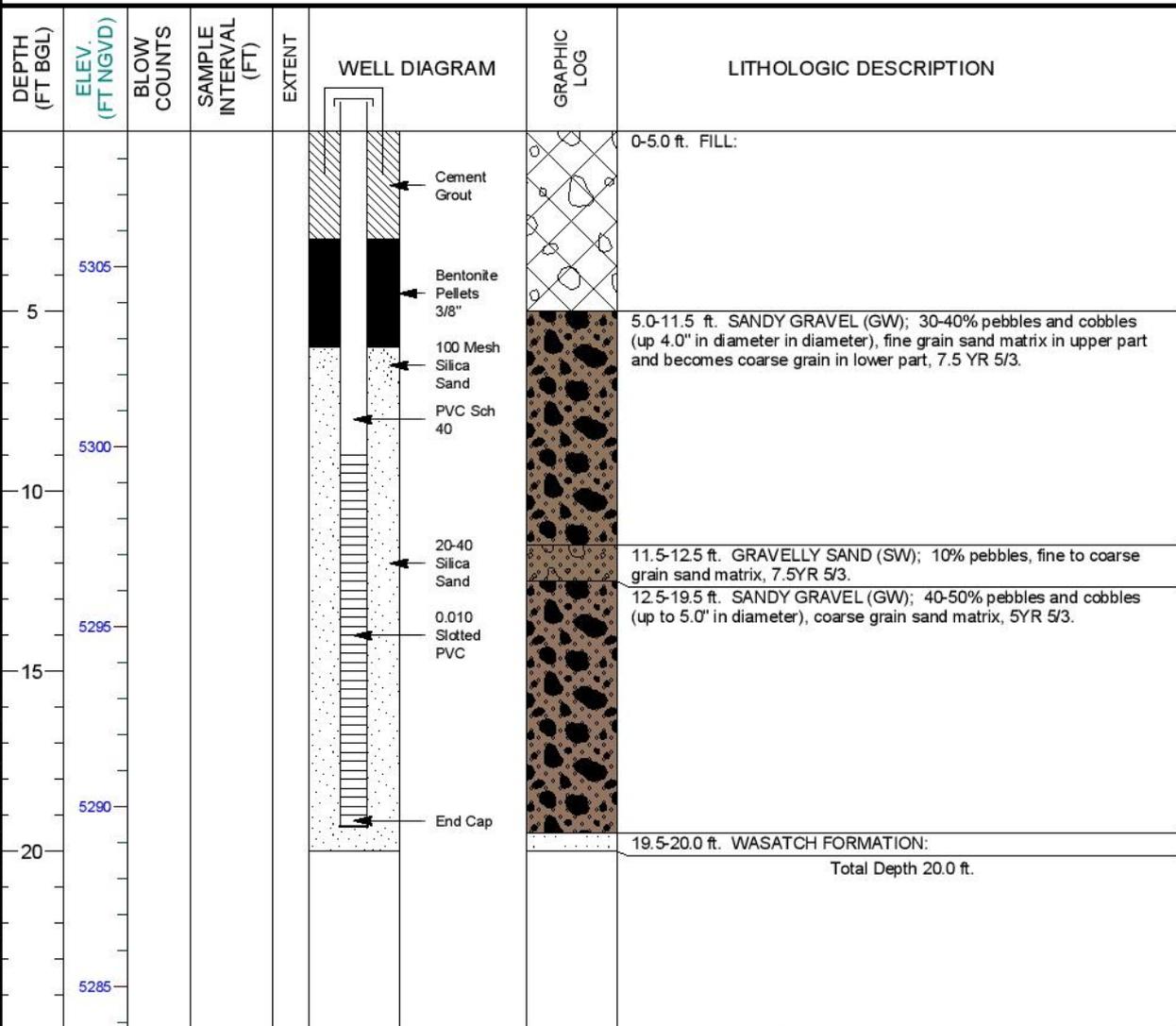
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY
GRAND JUNCTION, COLORADO

PAGE 1 OF 1 3/8/2010

Bohrprofil für RFO01-CD-02

MONITORING WELL COMPLETION LOG RFO01-CD-02

PROJECT IFRC	WELL NUMBER RFO01-CD-02	DATE STARTED 6/23/2010
LOCATION RIFLE, CO	NORTH COORD. (FT) 625528.97	WELL ESTABLISHED 6/23/2010
SITE Rifle Old Processing Site	EAST COORD. (FT) 1359428.53	SURFACE ELEV. (FT NGVD) 5308.77
DRILLING METHOD ROTASONIC CORE	HOLE DEPTH (FT BGS) 20.00	TOP OF CASING (FT) 5309.43
DRILL COMPANY Boart Longyear	WELL DEPTH (FT BGS) 19.30	MEAS. PT. ELEV. (FT) 5309.43
RIG TYPE ROTASONIC	WATER LEVEL (FT BGS)	SLOT SIZE (IN) 0.010
	WATER LEVEL DATE	BIT SIZE(S) (IN) 8.0
WELL INSTALLATION INTERVAL (FT BGS)		DRILLER Cain, R
SURFACE CASING:		LOGGED BY Goodknight, C.
BLANK CASING: 4 in.dia. PVC Sch 40	-0.66 to 9.0	SAMPLING METHOD CORE
WELL SCREEN: 4 in.dia. 0.01 Slotted PVC	9.0 to 19.0	DATE DEVELOPED 7/10/2010
SUMP/END CAP: 4 in.dia. PVC Sch 40	19.0 to 19.3	REMARKS Samplers: K. Williams; P. Long. A
GROUT: Cement	0.0 to 3.0	proteogenomics well
SEAL: Bentonite Pellets	3.0 to 6.0	
UPPER PACK: 100 Mesh Silica Sand	6.0 to 7.0	
LOWER PACK: 20-40 Silica Sand	7.0 to 20.0	



M:\MON_WELL\WITH\COLOR_ERSP_6723_C\WELLS_GPJ_SHIP_GDT_101111

Stoller

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY
GRAND JUNCTION, COLORADO

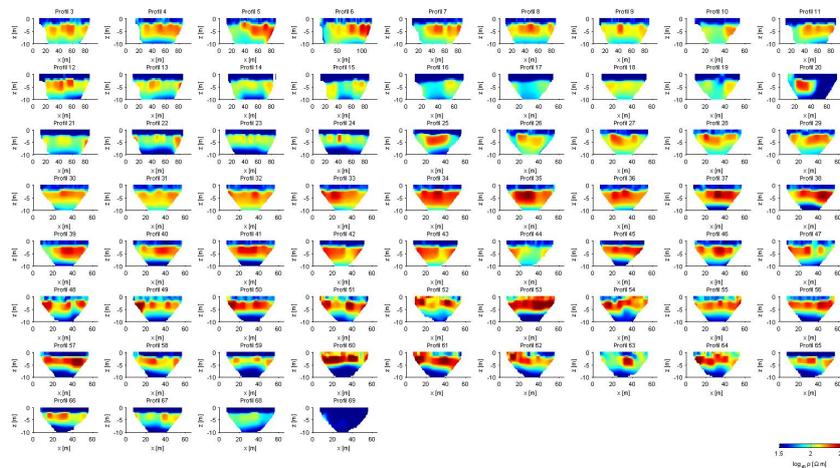
PAGE 1 OF 1 10/11/2011

Bohrprofil für RFO01-CD-02

B. Ergebnisse der Inversionen

B.1. Übersichten aller Profile für scheinbaren spezifischen Widerstand und Phasenverzögerung berechnet mit Res2DInv

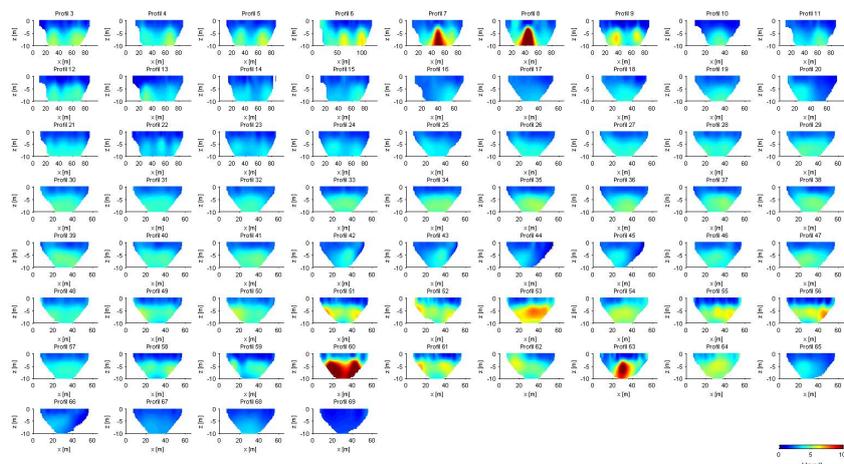
Dieser Part des Anhangs zeigt die Übersichten aller Profile, sowohl für scheinbare spezifische Widerstände, als auch für Phasenverzögerungen. Folgende Ergebnisse wurden mittels Res2DInv berechnet.



Übersicht der Profile, die scheinbaren spezifischen Widerstände betreffend
Mit Res2DInv berechnet

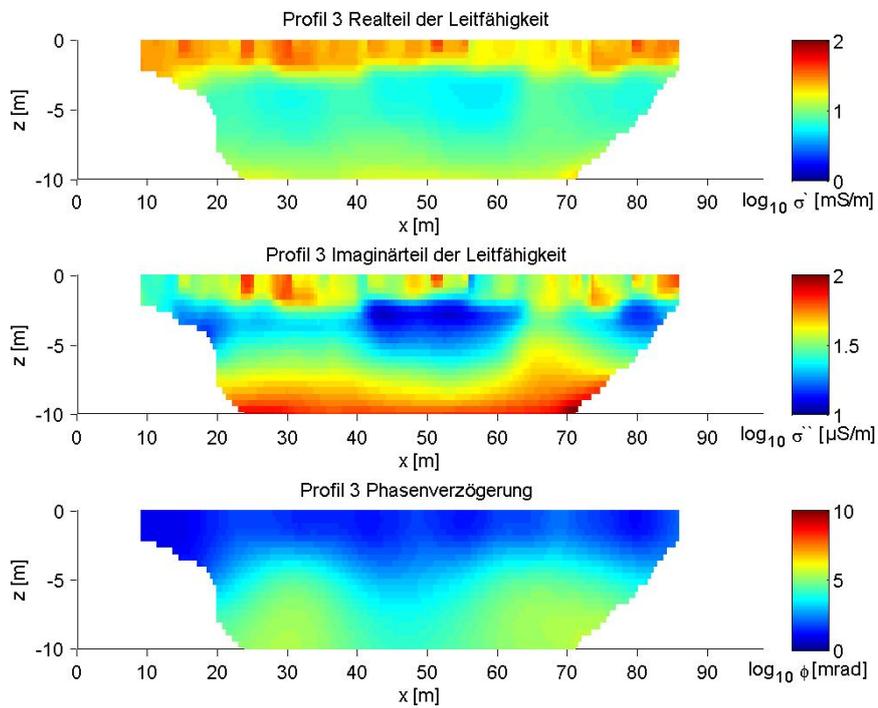
B.2. Ergebnisse der einzelnen Profile für Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit, sowie Phasenverzögerung berechnet mit Res2DInv

In diesem Teil des Anhangs finden sich für sämtliche Profile die Ergebnisse der Inversion, sowohl für Leitfähigkeit (Realteil und Imaginärteil), als auch für Phasen-

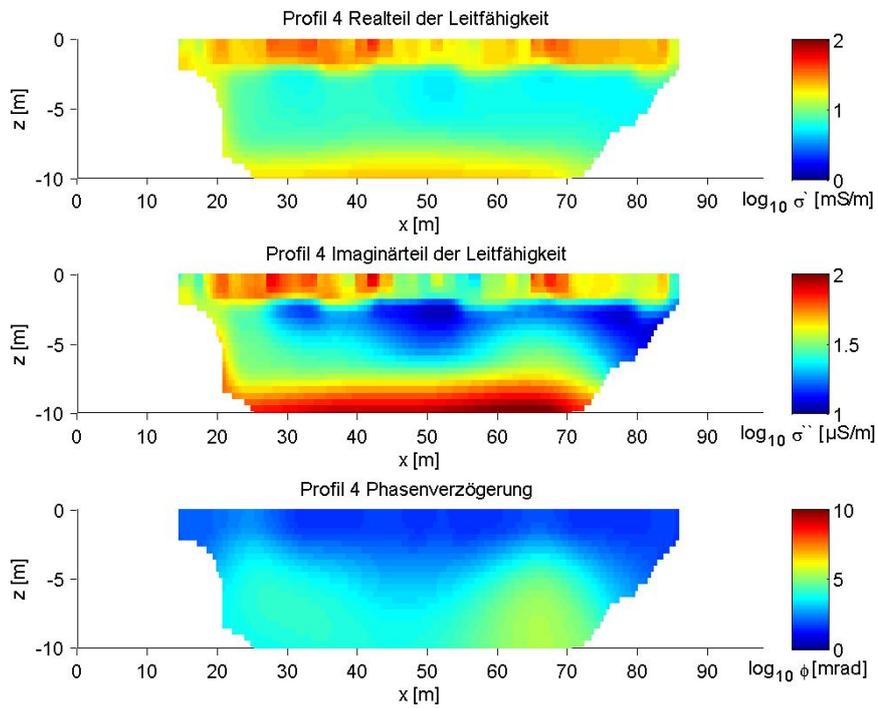


Übersicht der Profile, die Phasenverzögerung betreffend
Mit Res2DInv berechnet

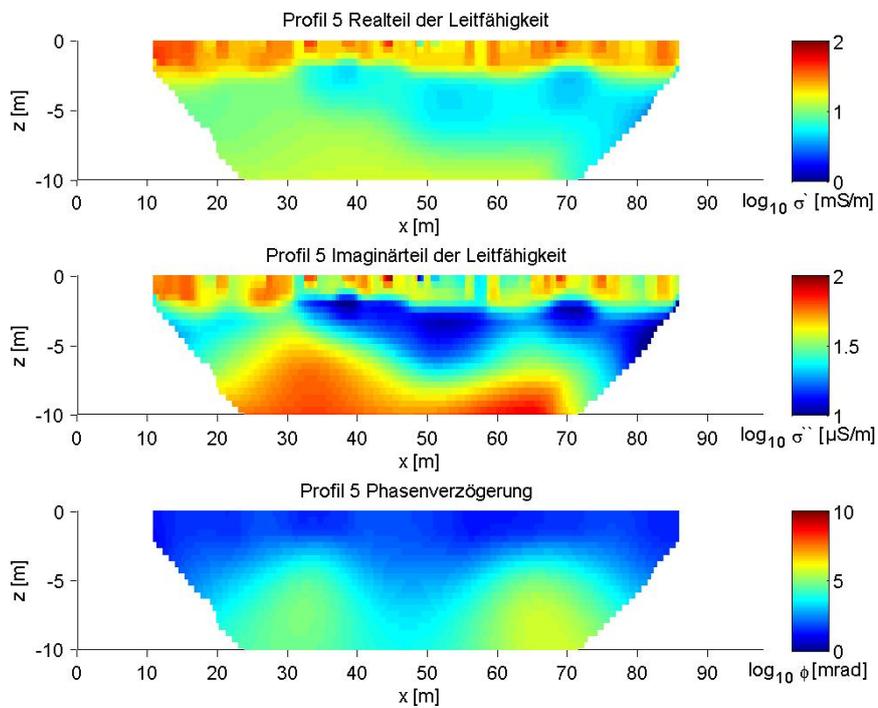
verzögerung, die mit Res2DInv berechnet wurden.



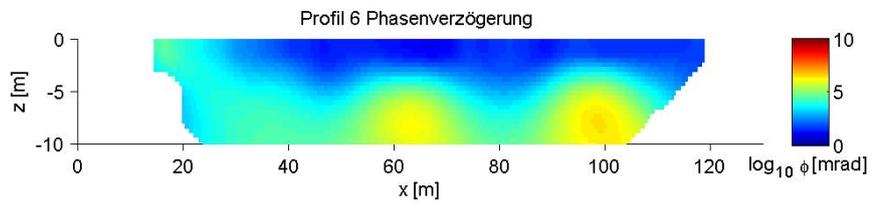
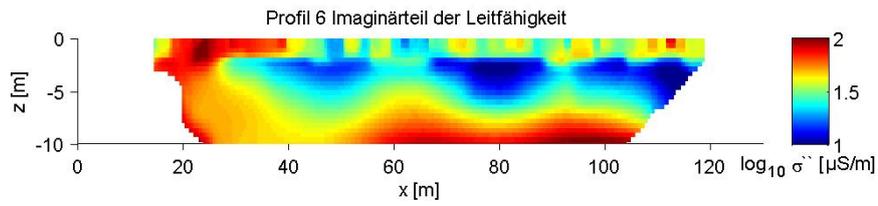
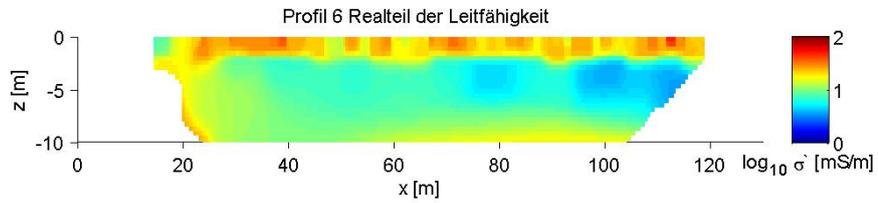
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 3



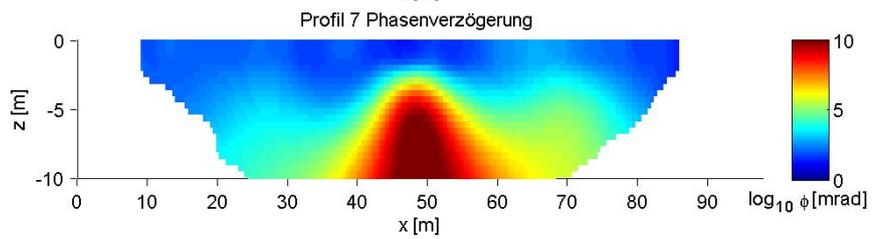
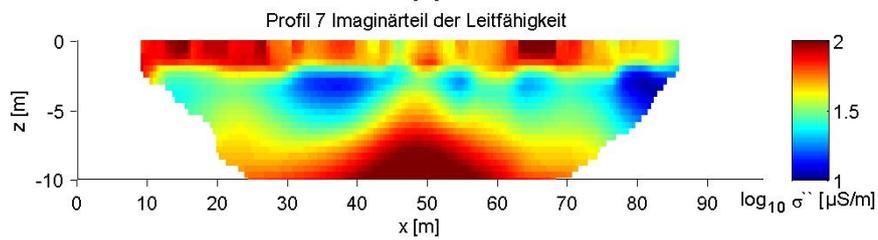
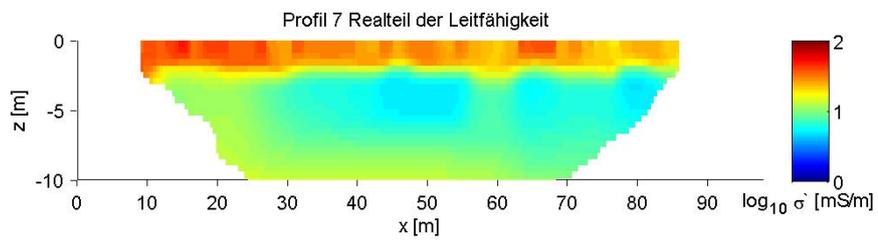
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 4



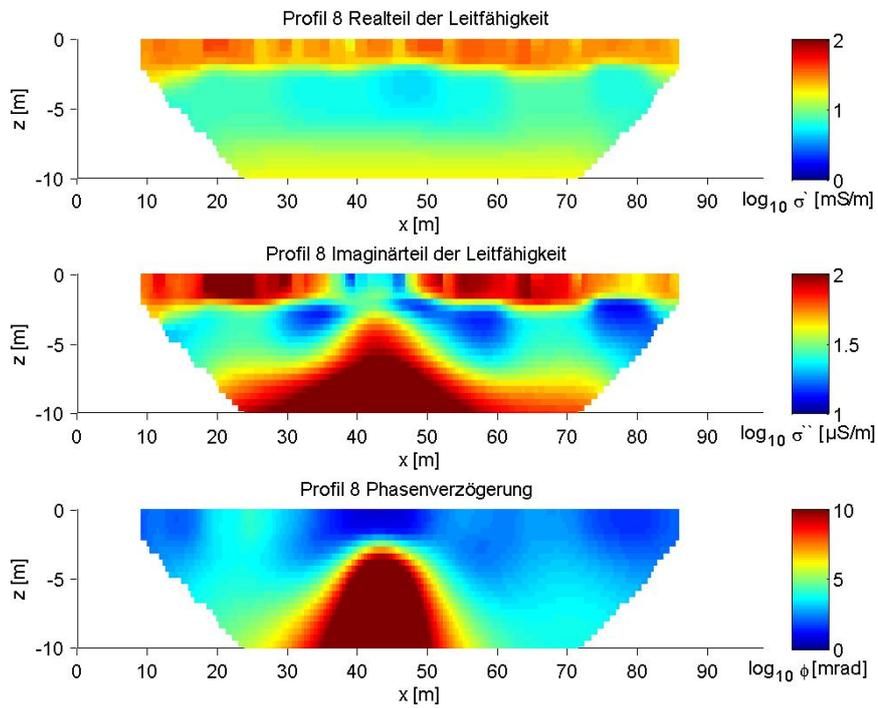
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 5



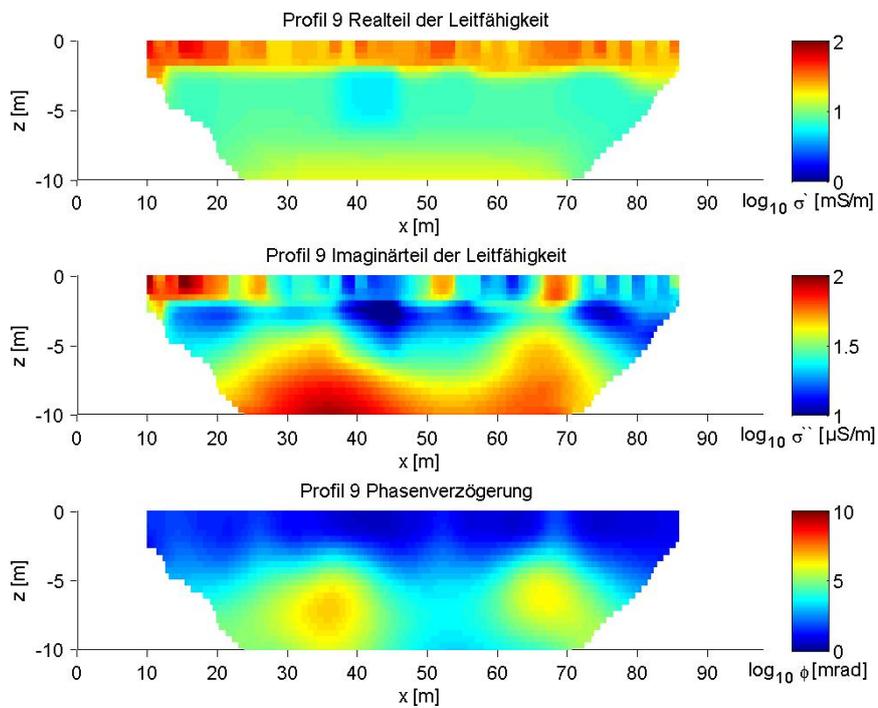
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 6



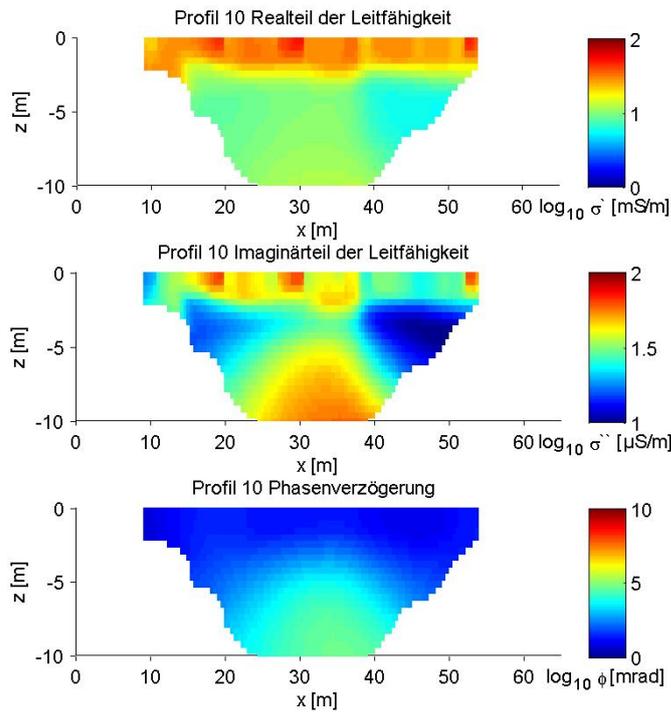
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 7



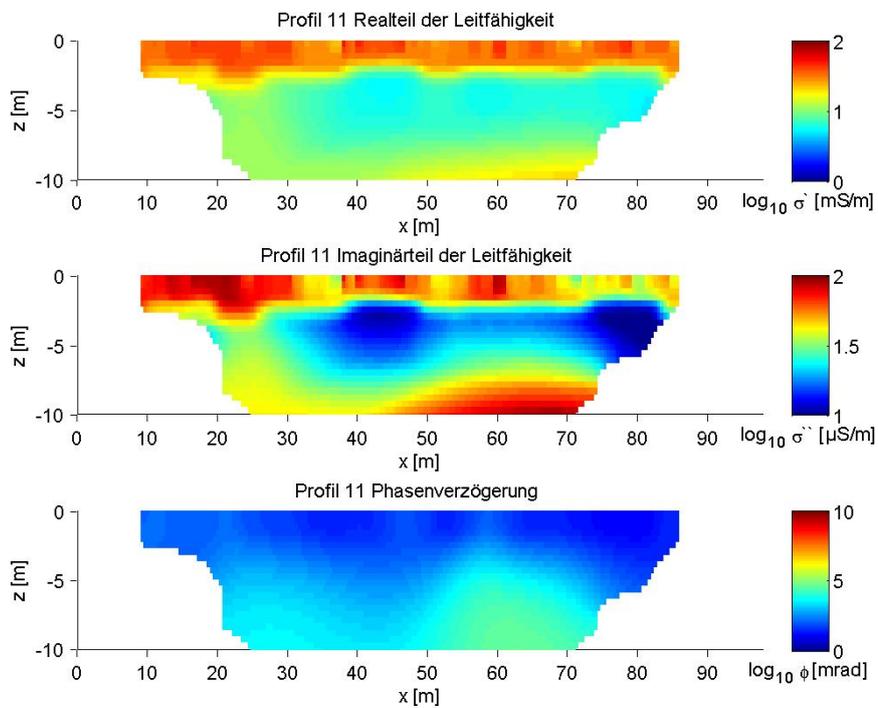
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 8



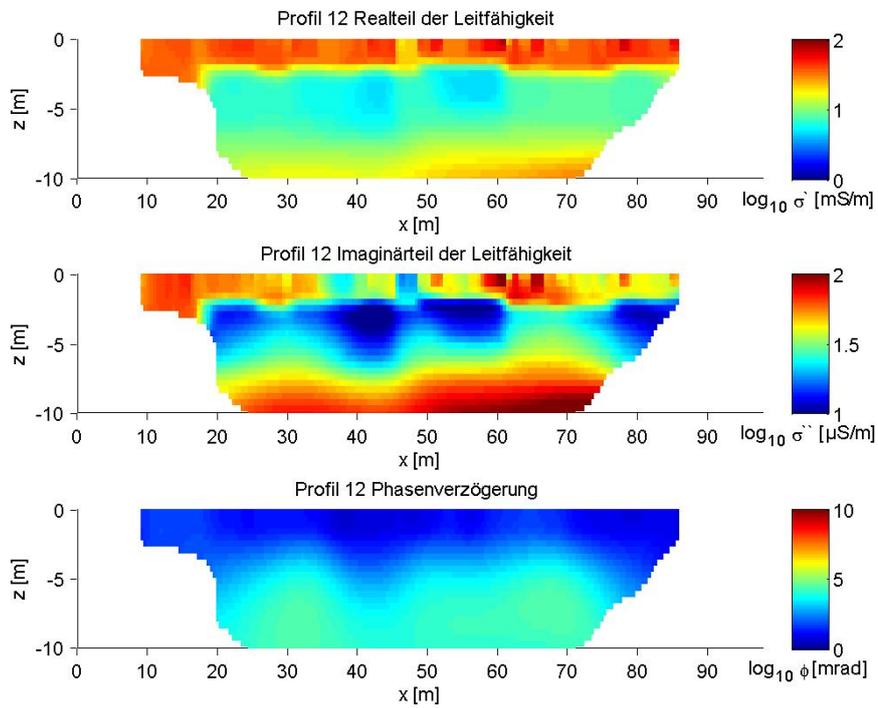
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 9



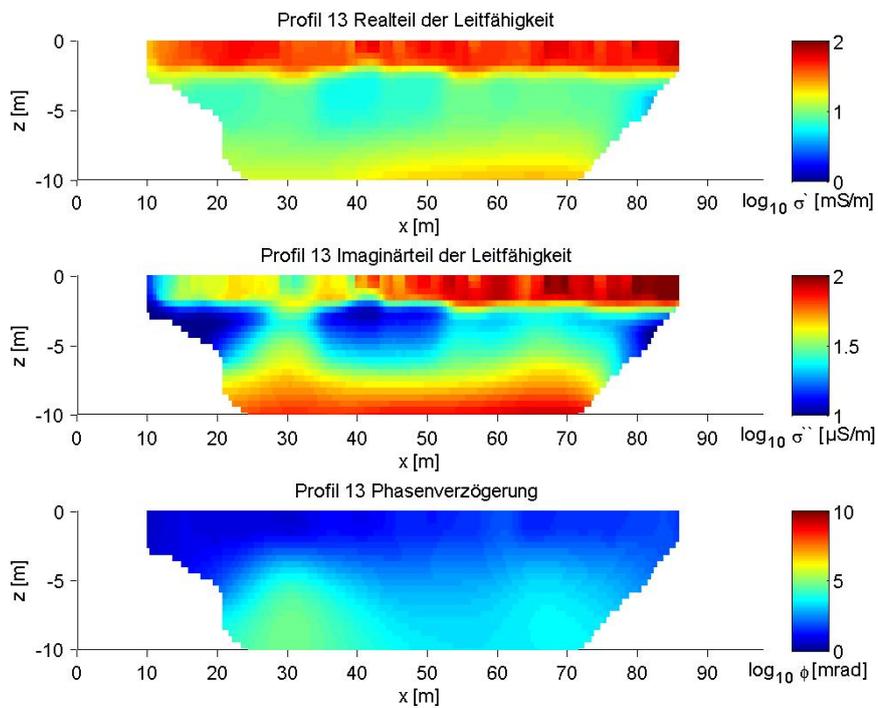
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 10



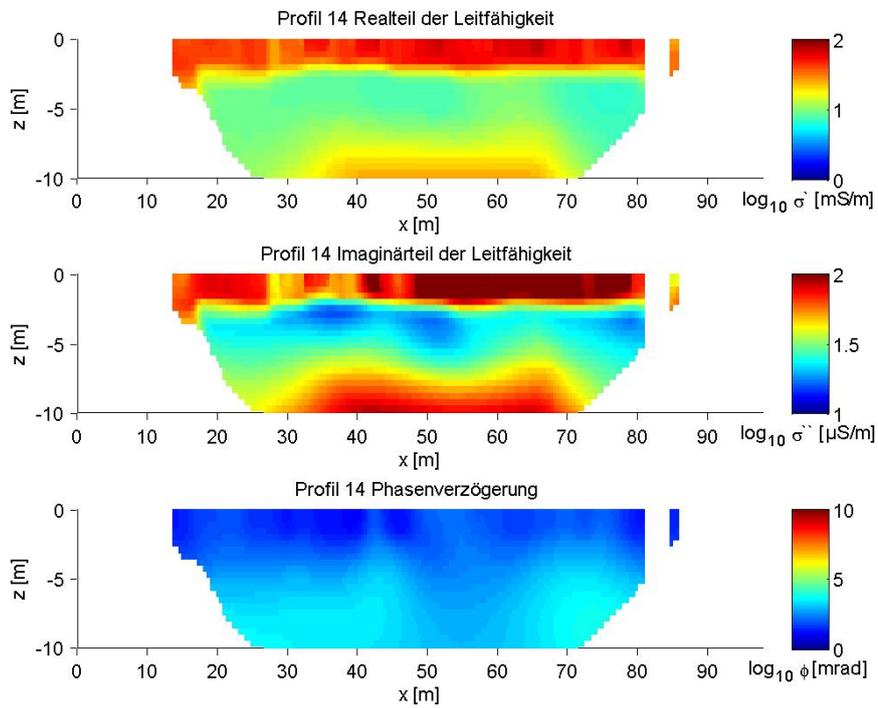
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 11



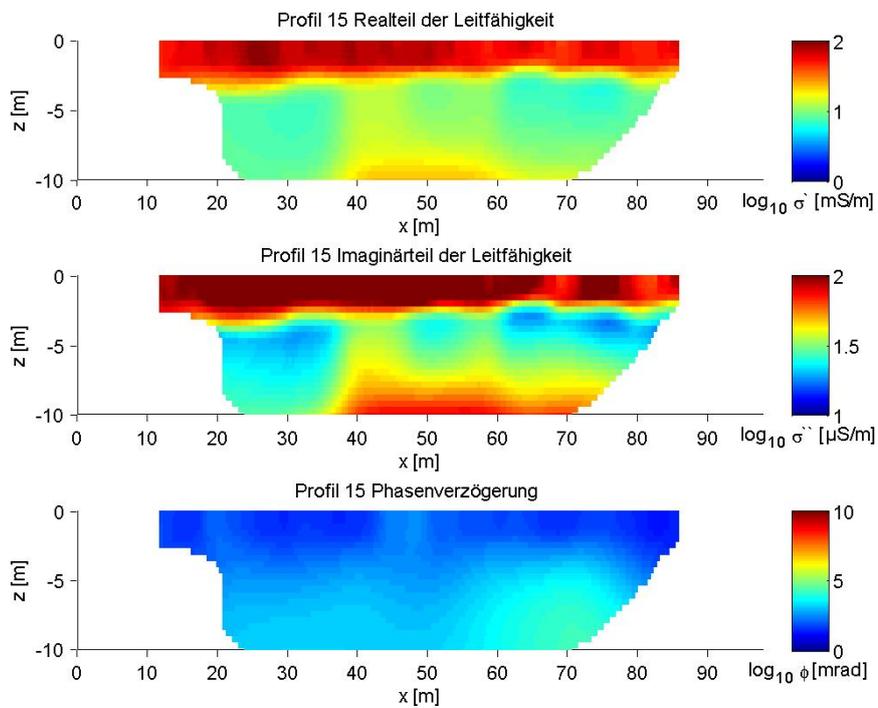
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 12



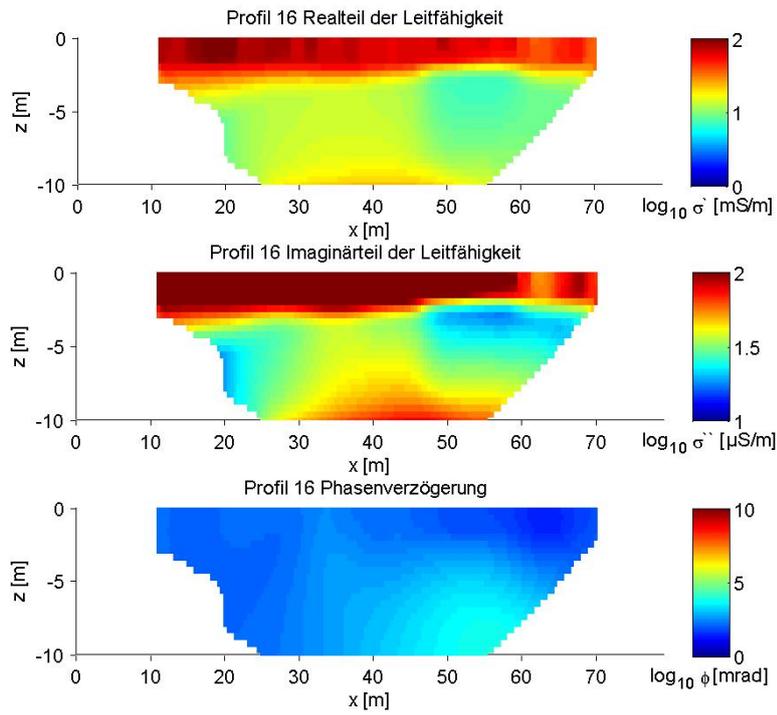
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 13



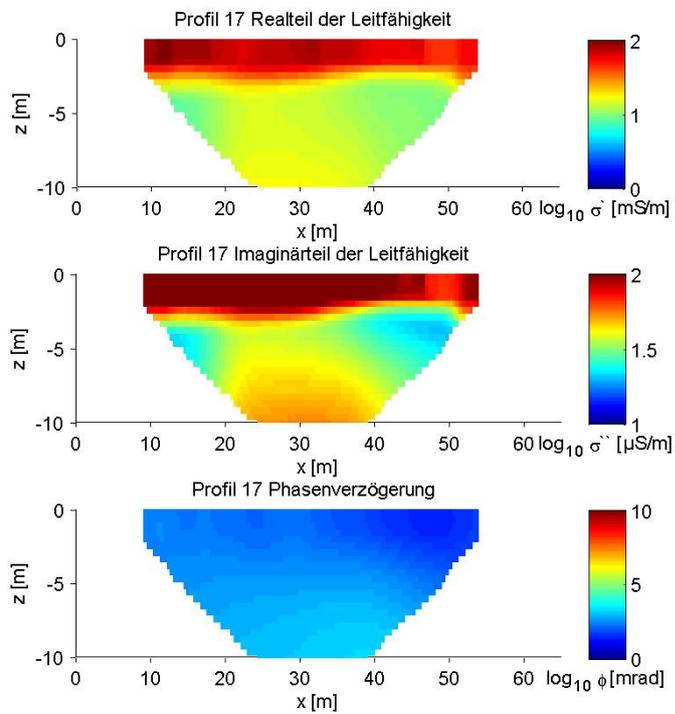
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 14



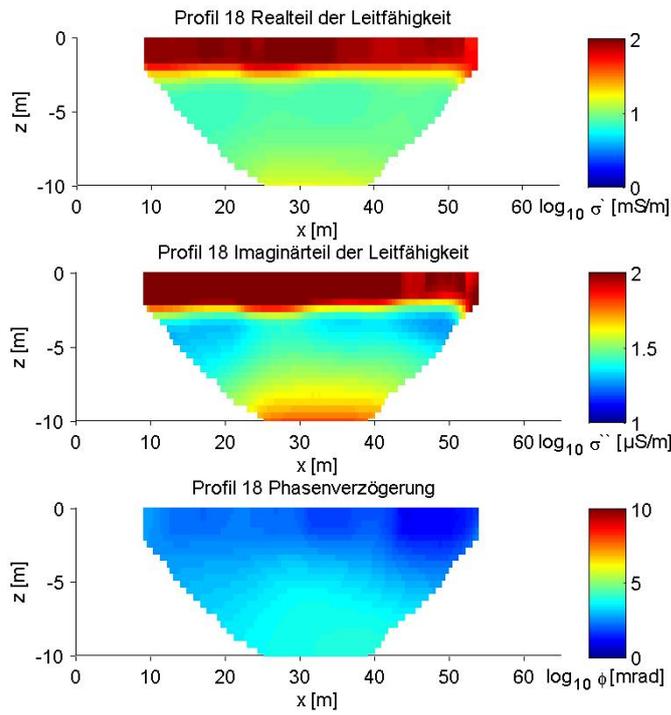
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 15



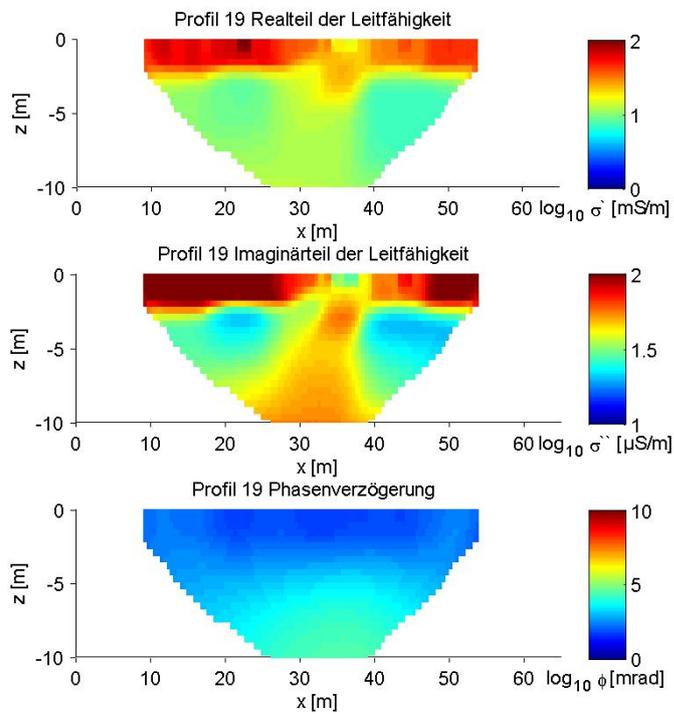
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 16



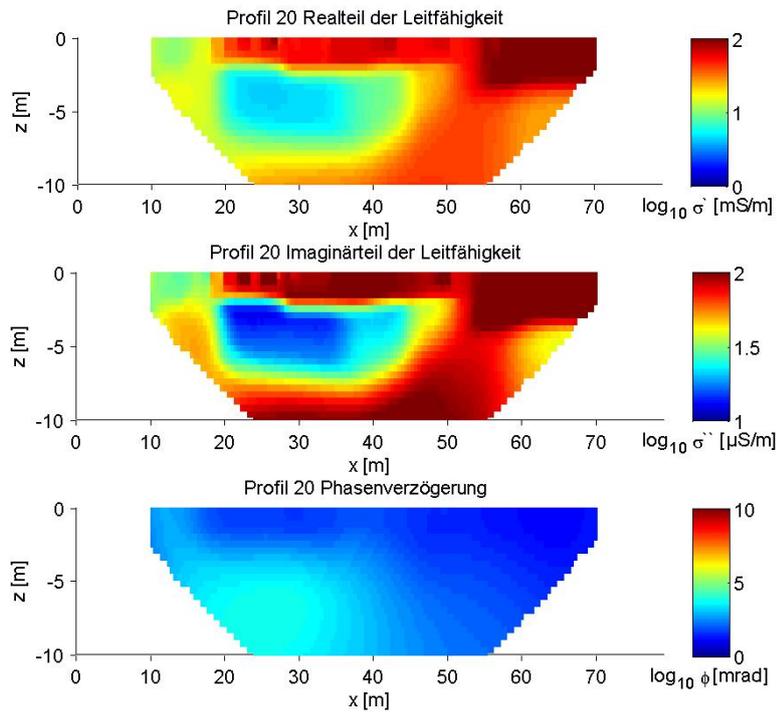
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 17



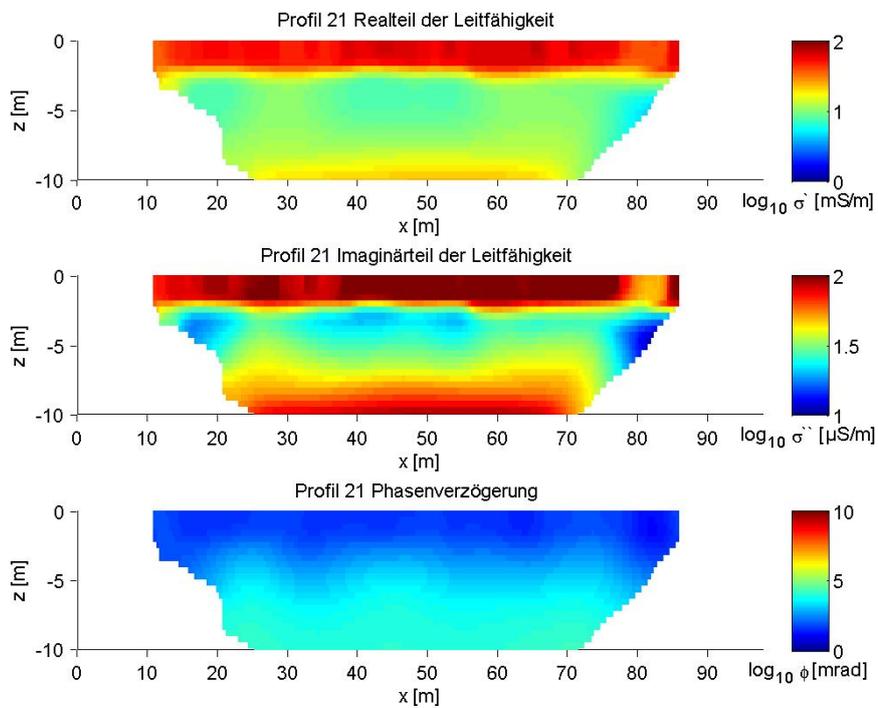
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 18



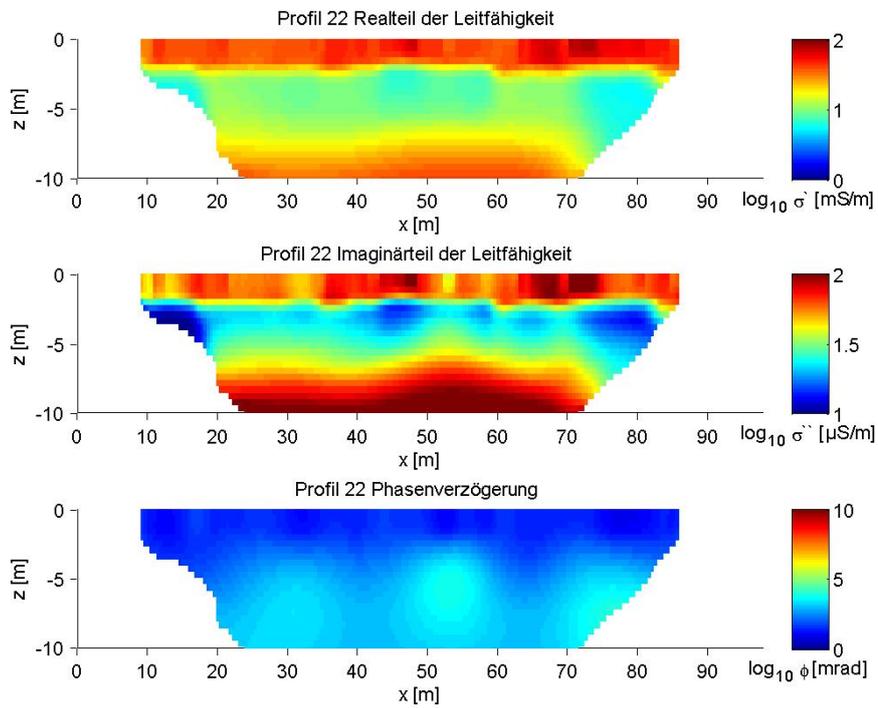
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 19



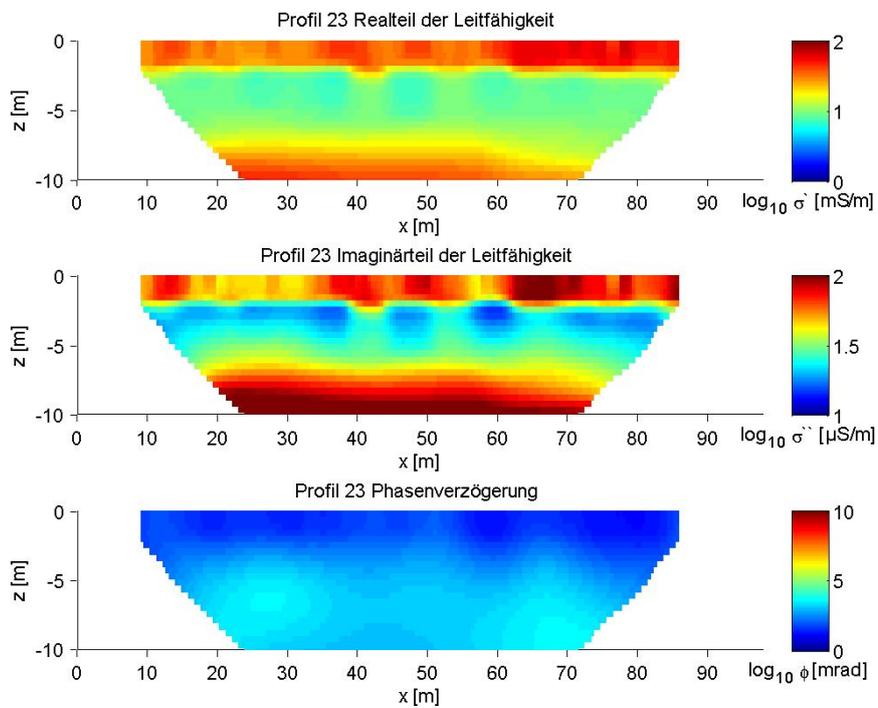
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 20



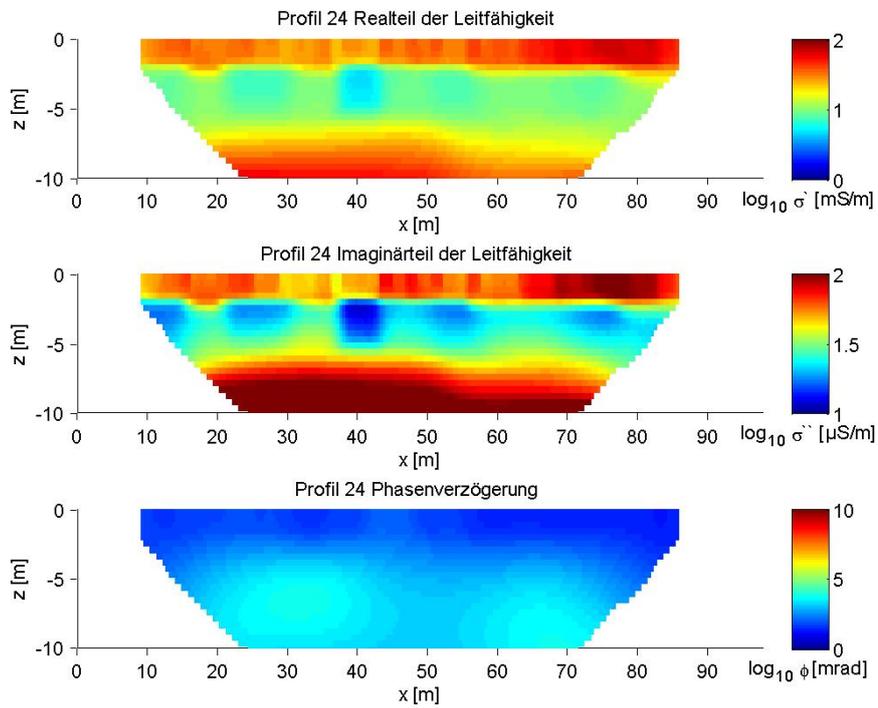
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 21



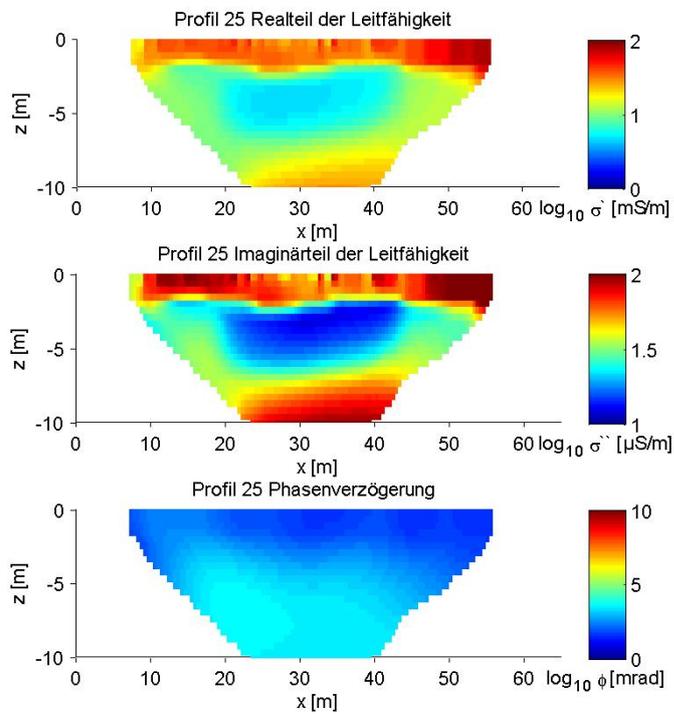
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 22



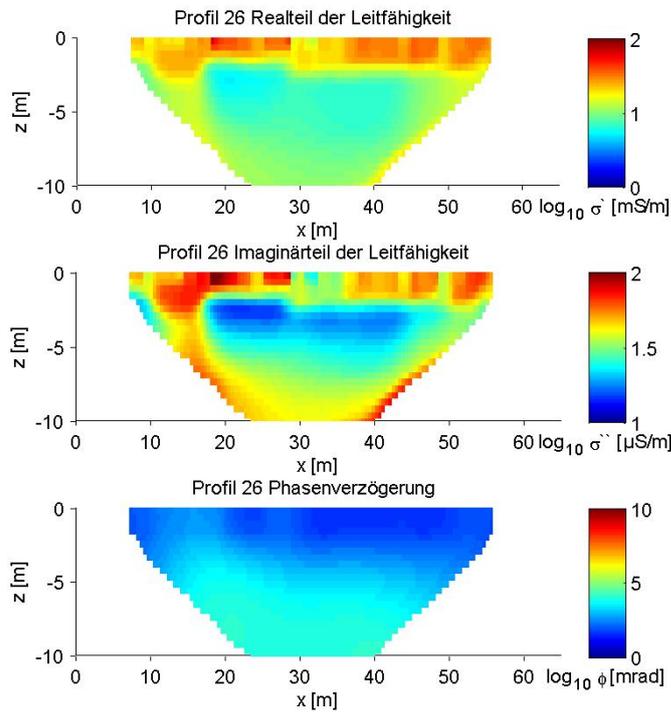
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 23



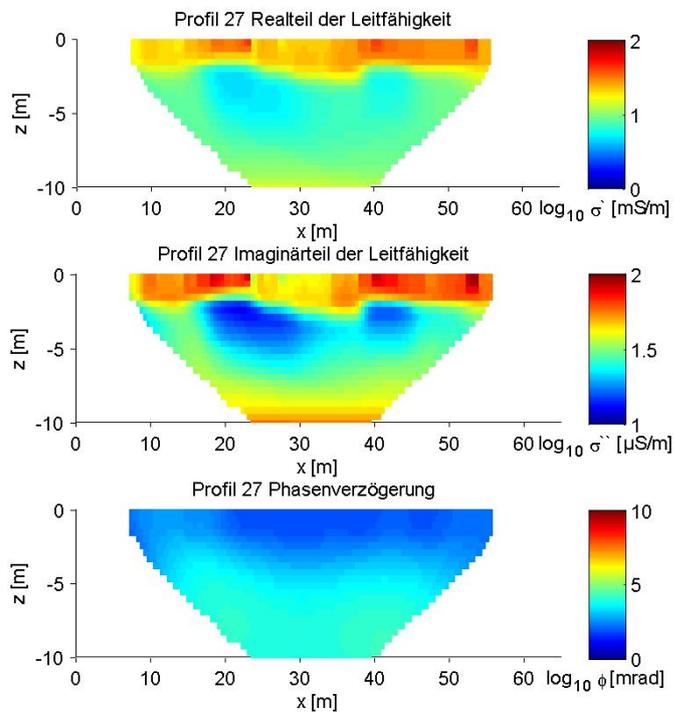
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 24



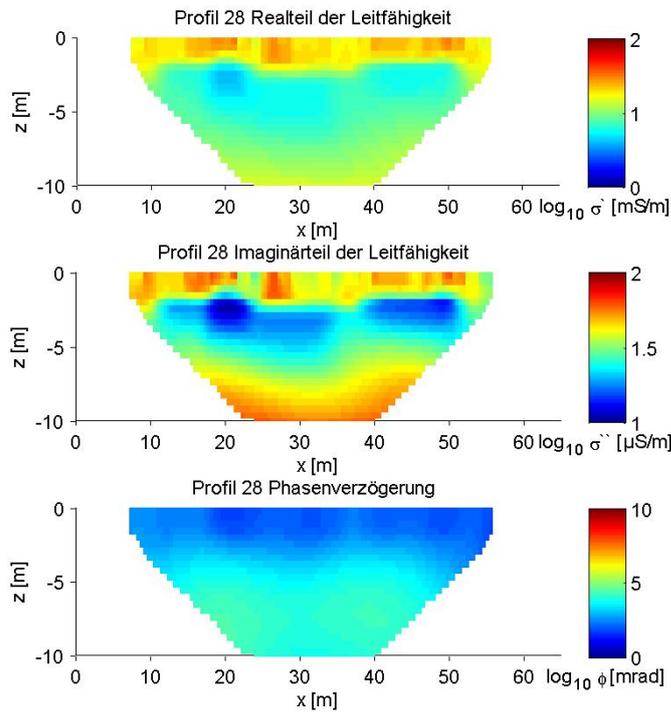
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 25



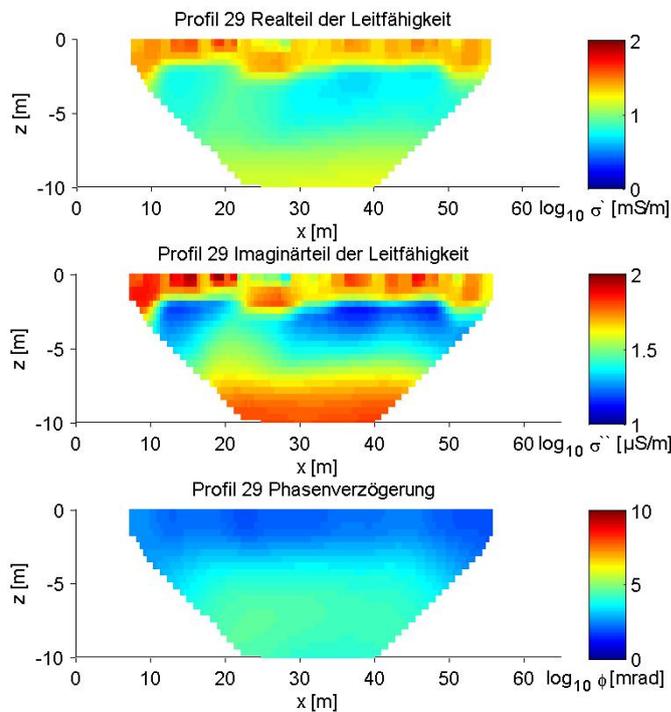
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 26



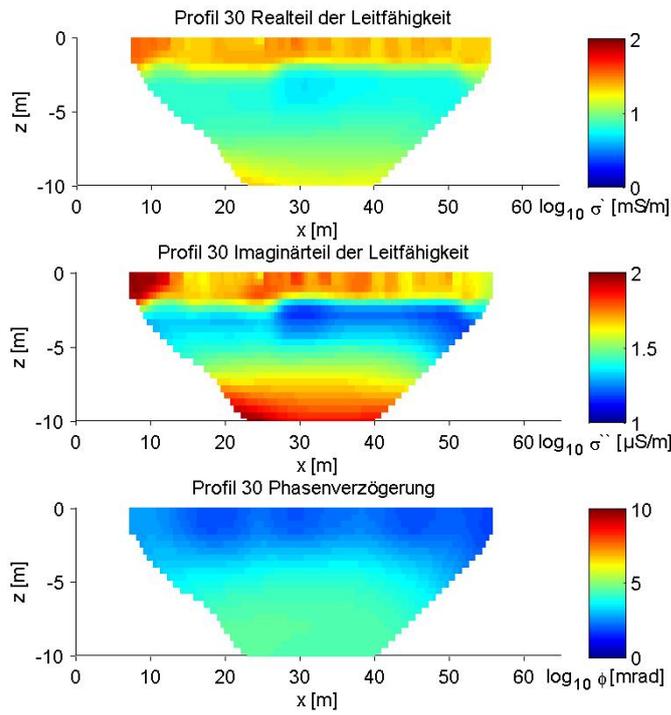
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 27



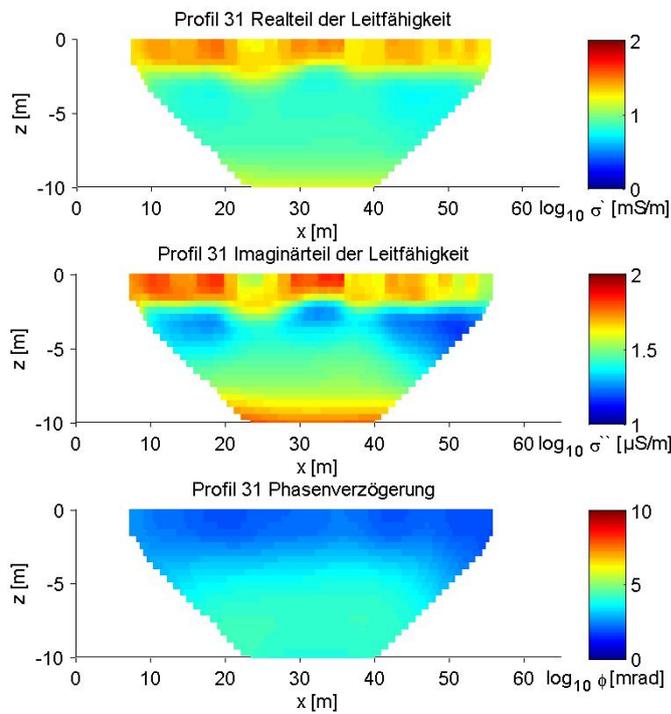
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 28



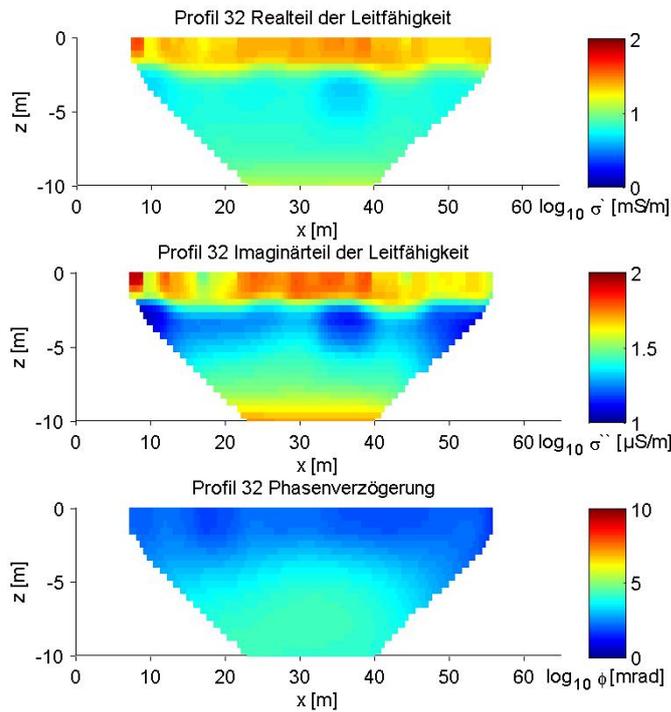
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 29



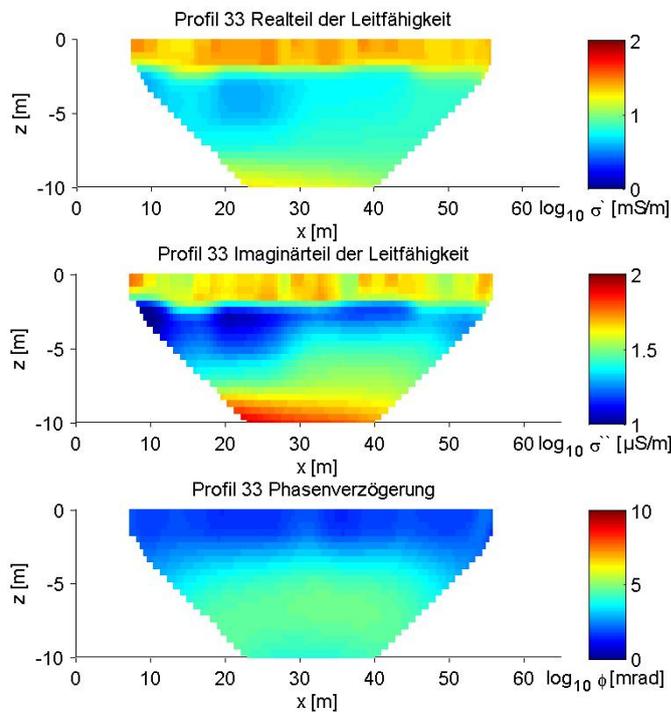
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 30



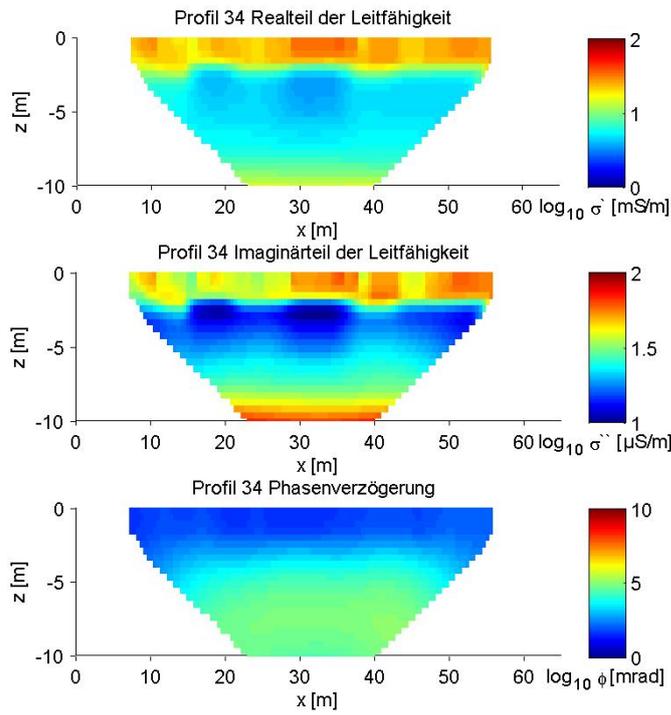
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 31



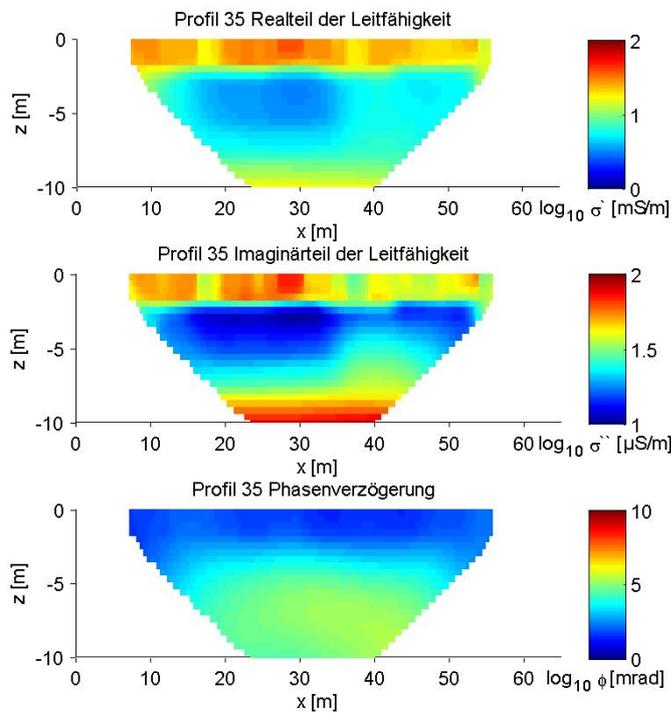
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 32



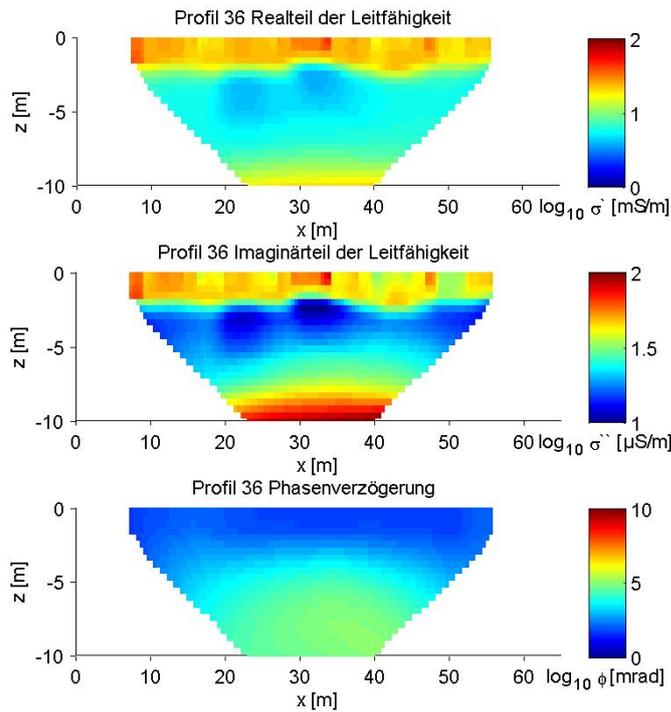
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 33



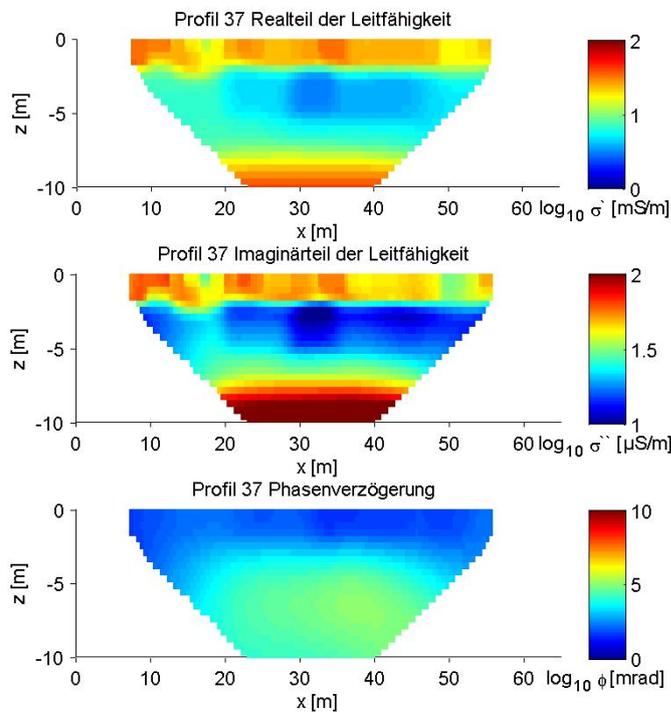
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 34



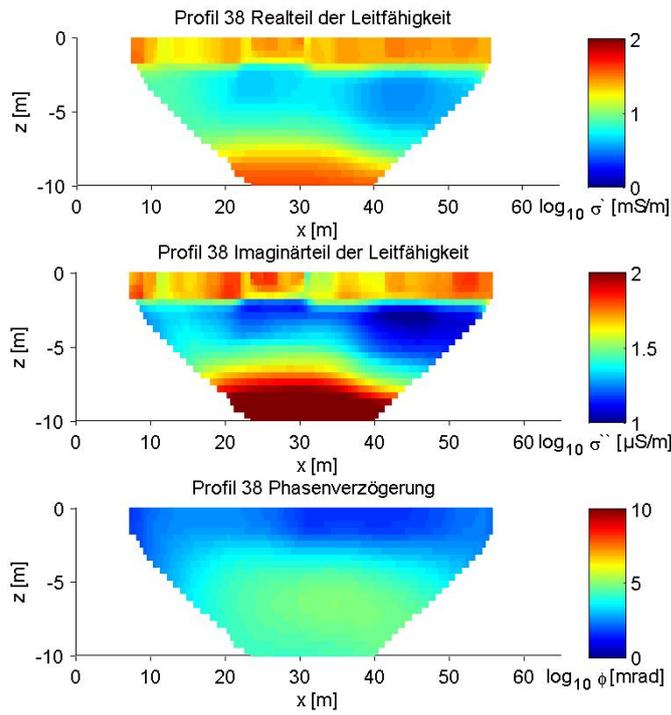
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 35



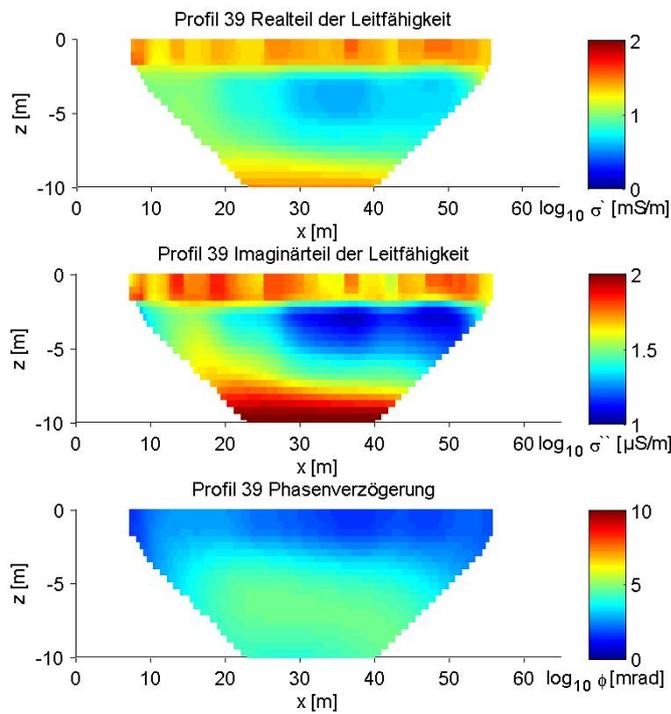
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 36



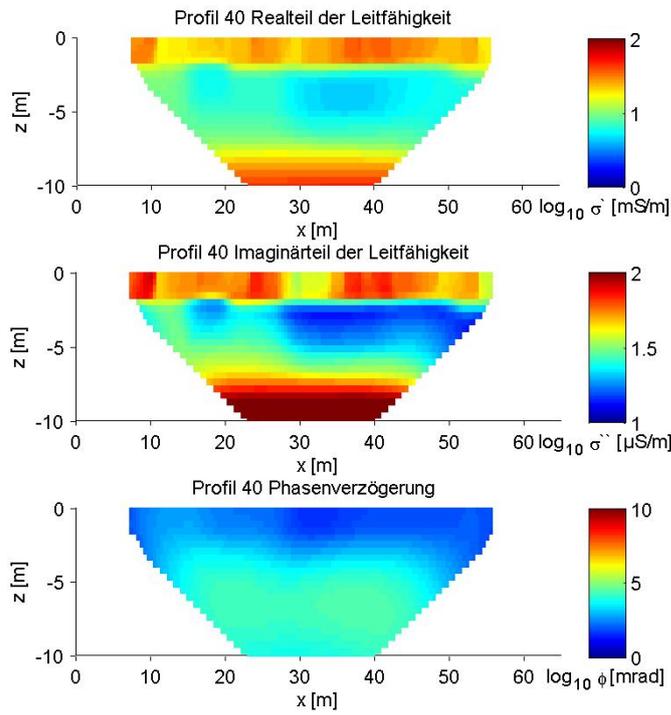
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 37



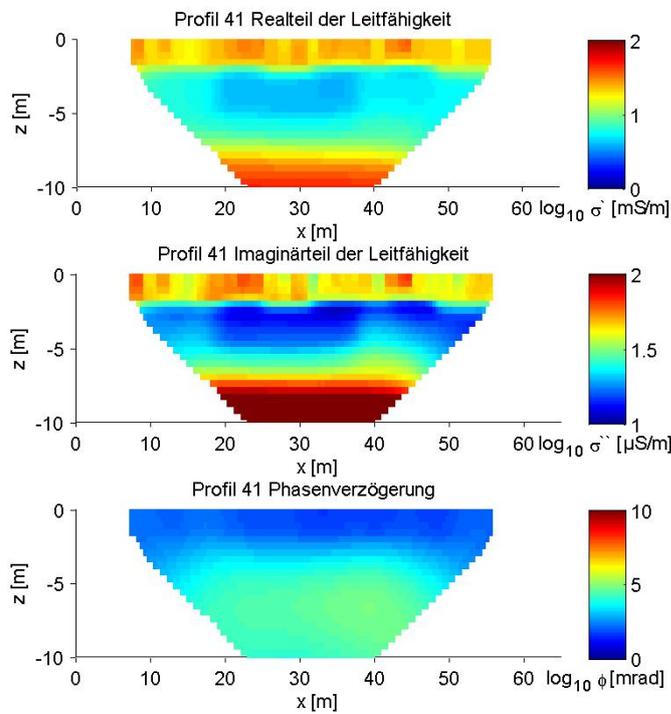
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 38



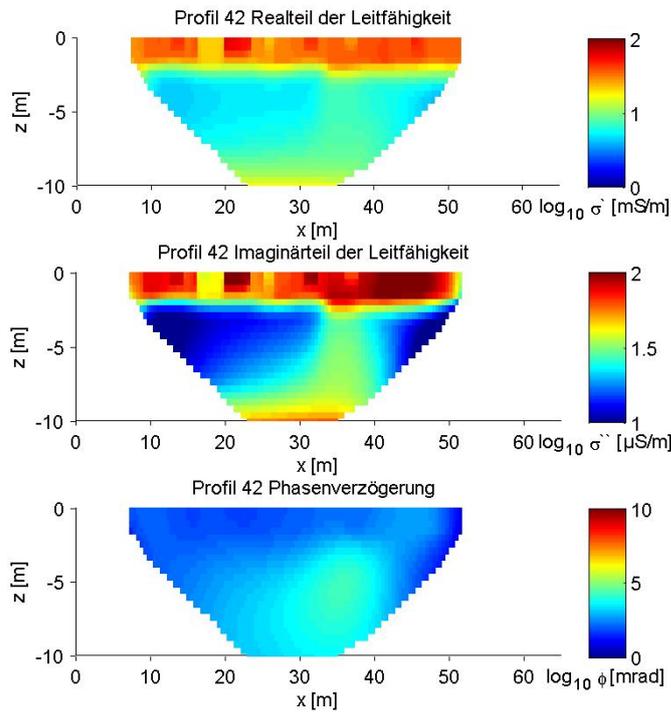
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 39



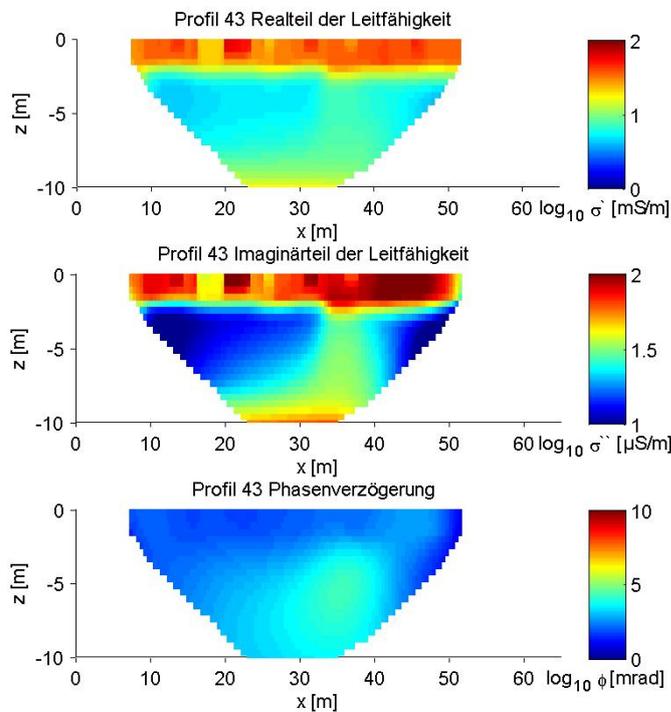
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 40



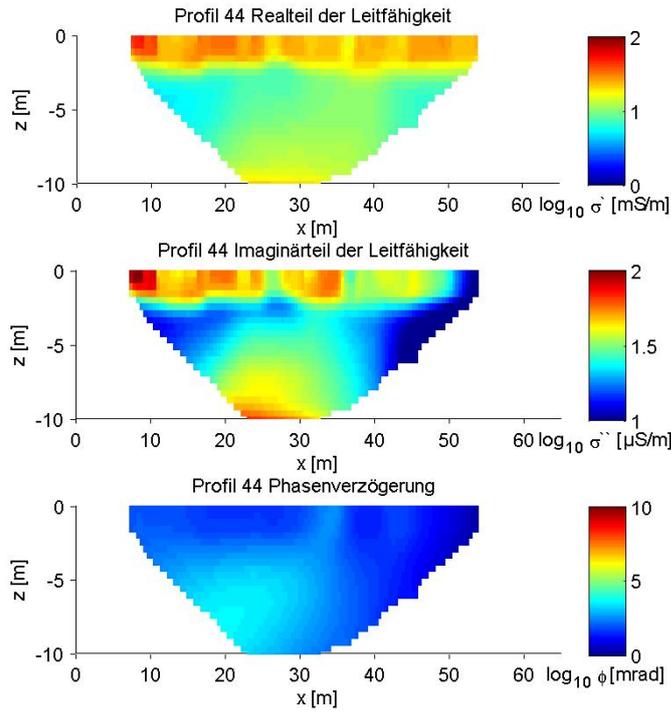
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 41



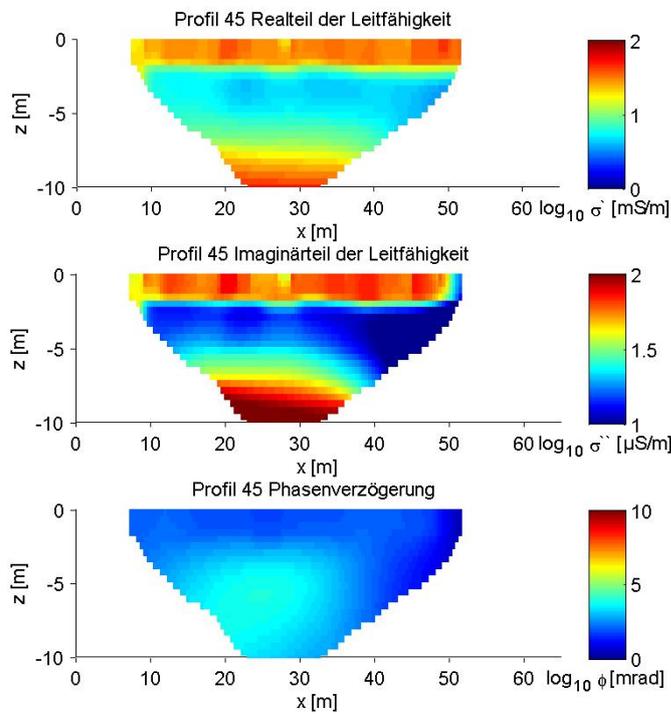
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 42



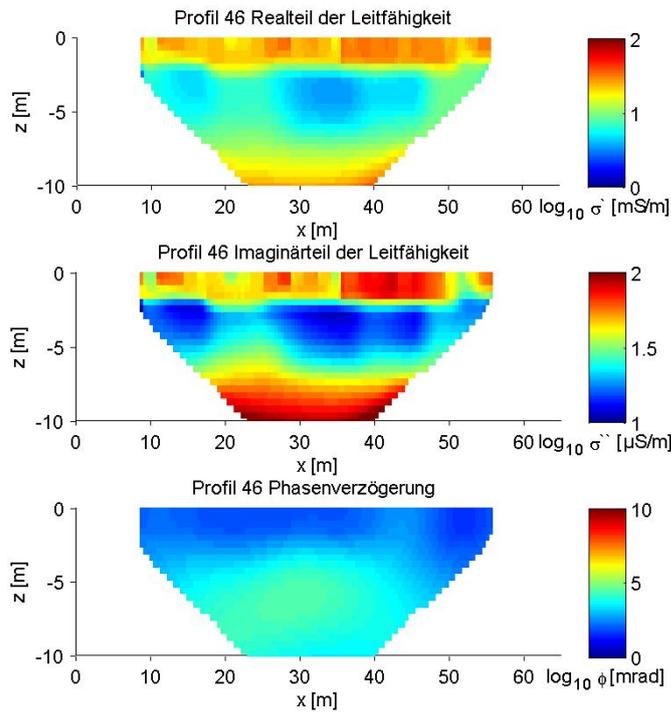
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 43



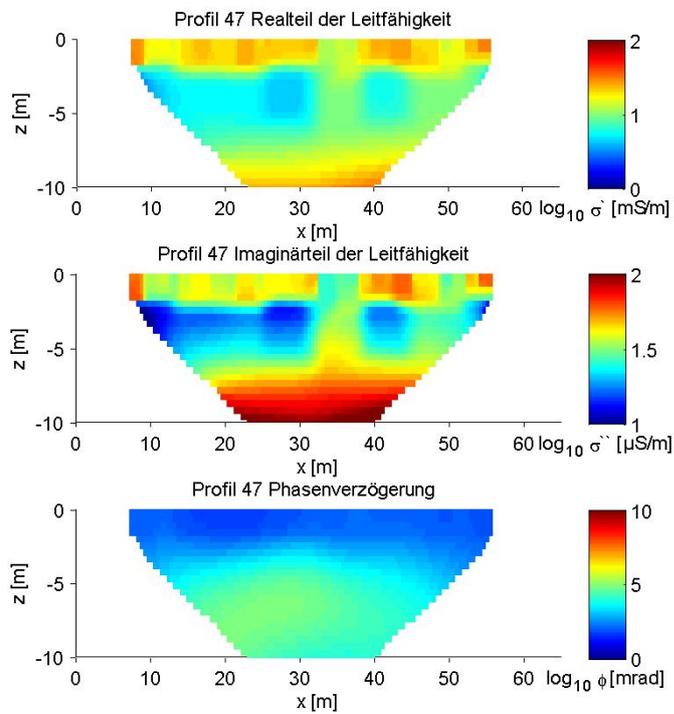
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 44



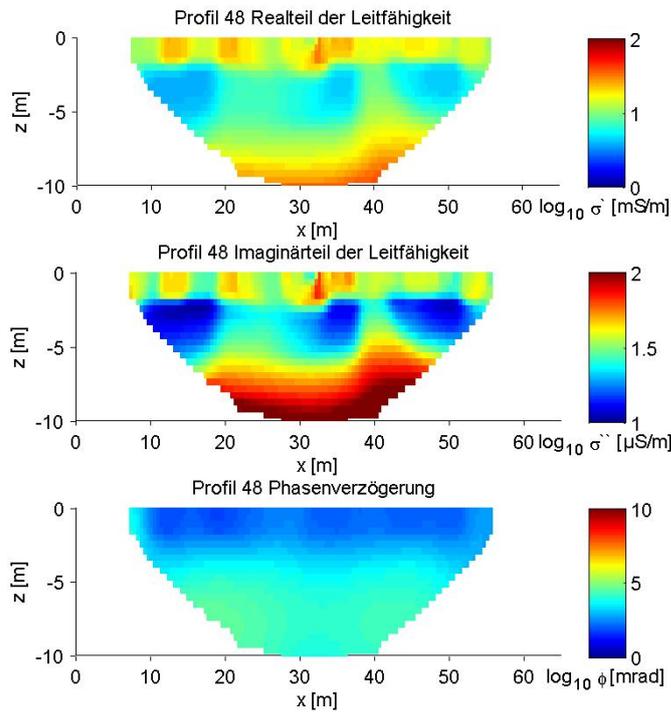
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 45



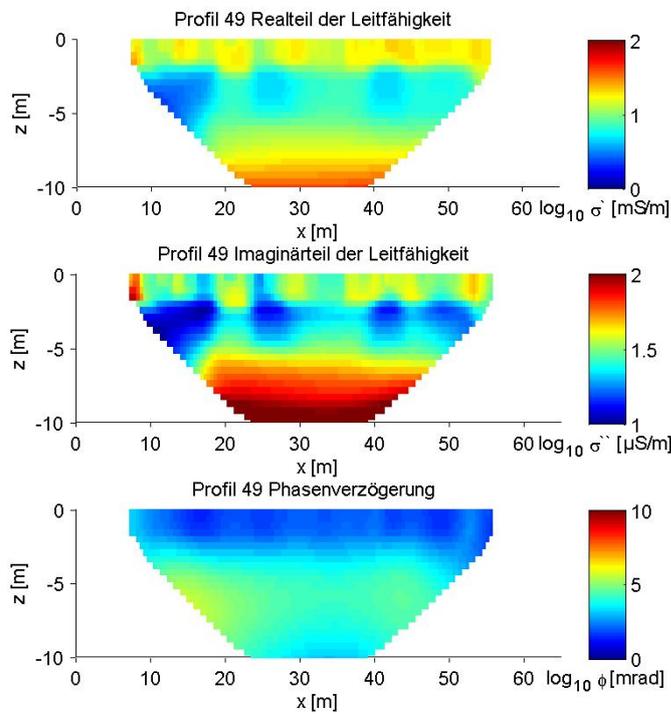
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 46



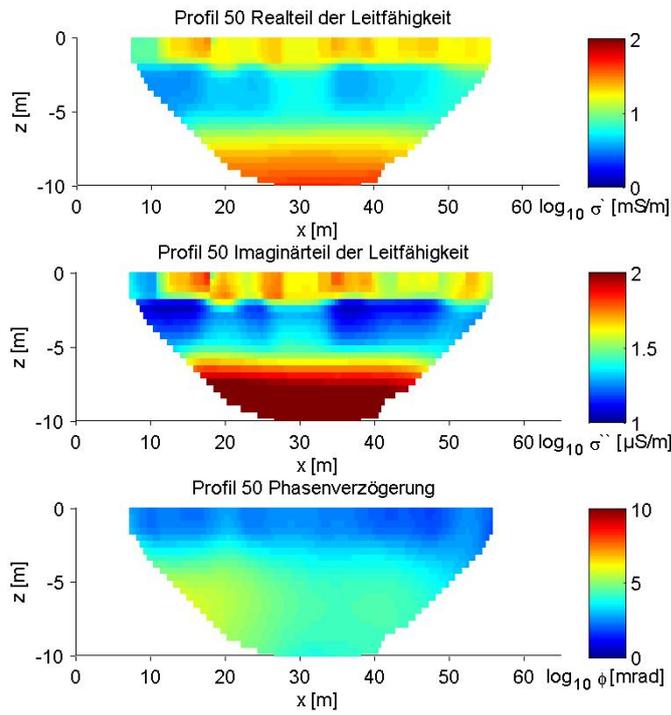
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 47



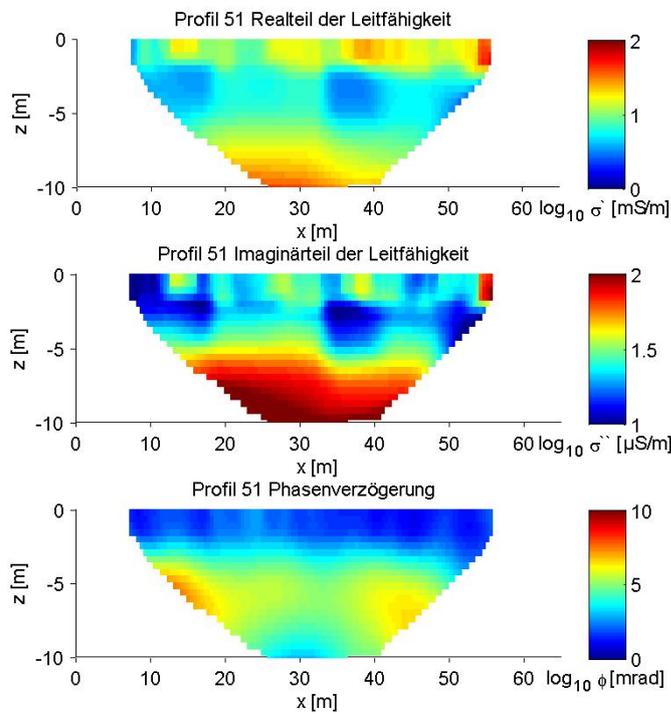
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 48



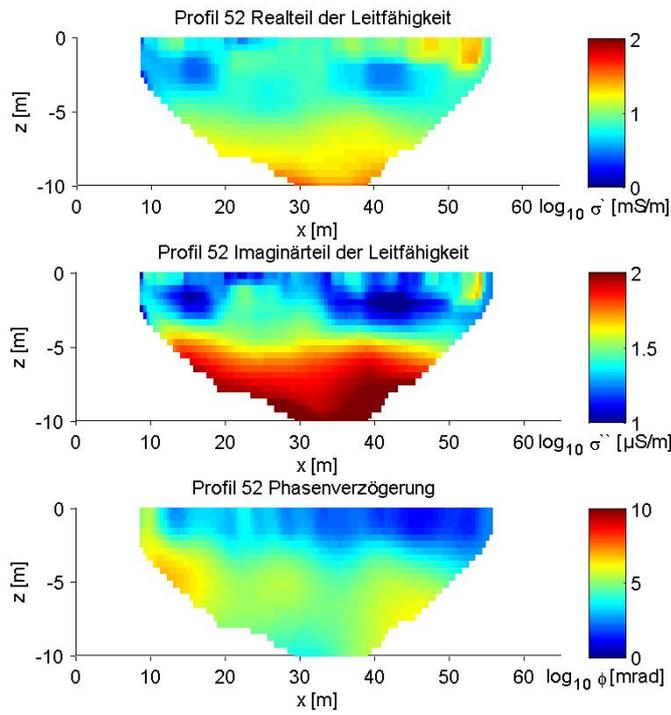
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 49



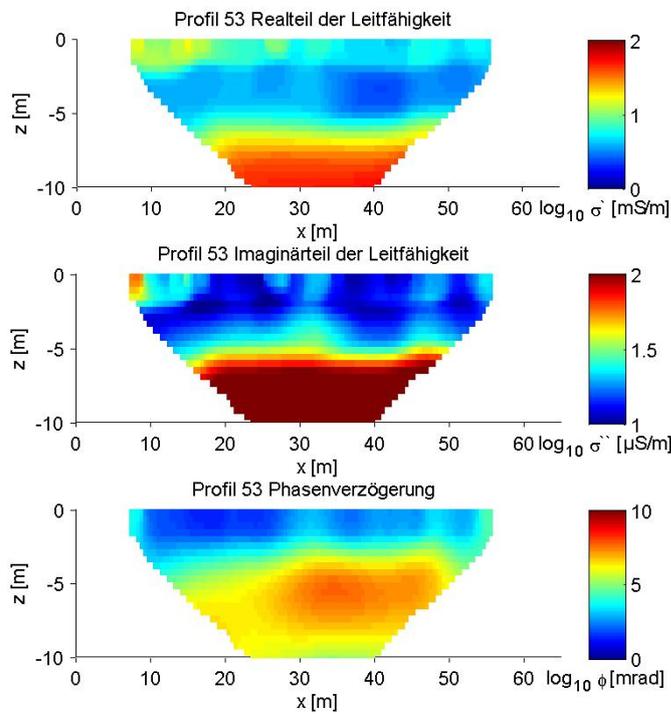
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 50



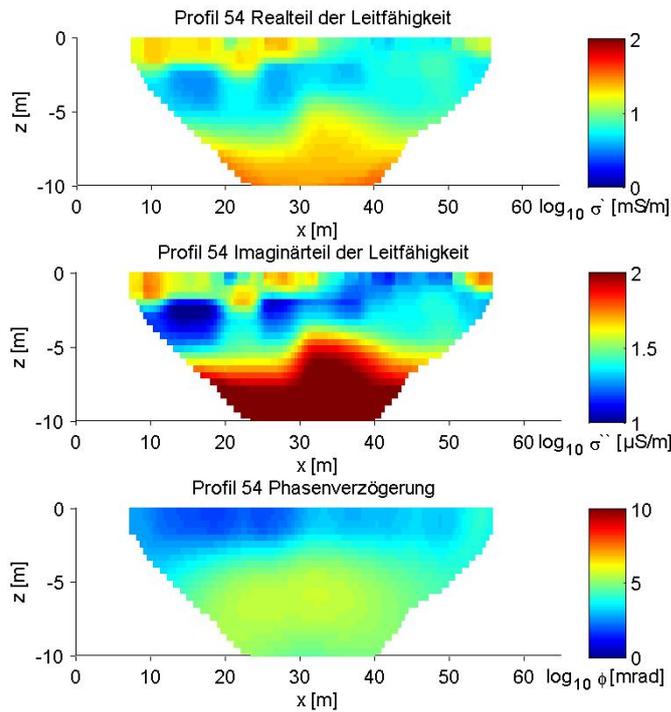
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 51



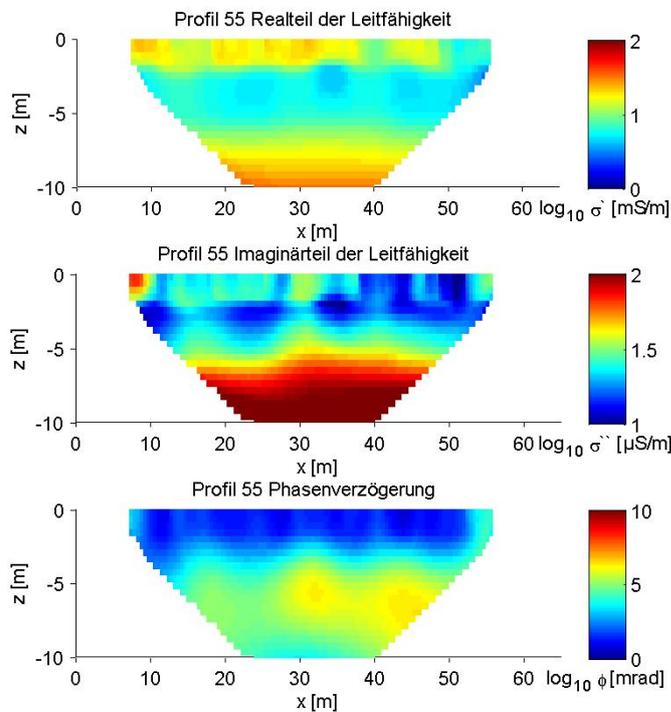
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 52



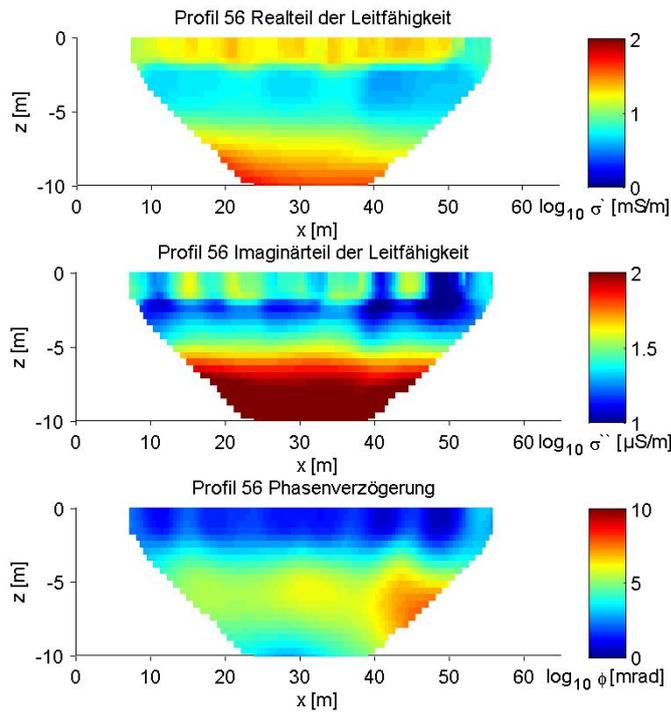
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 53



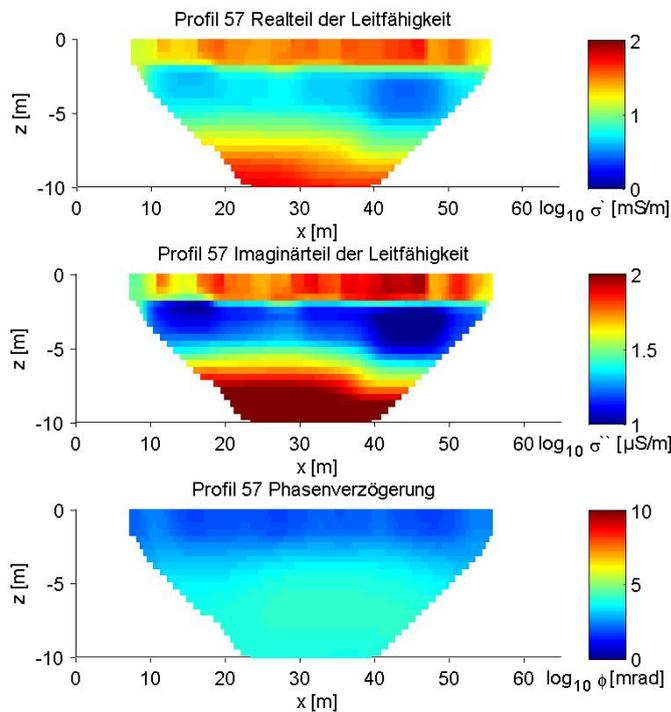
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 54



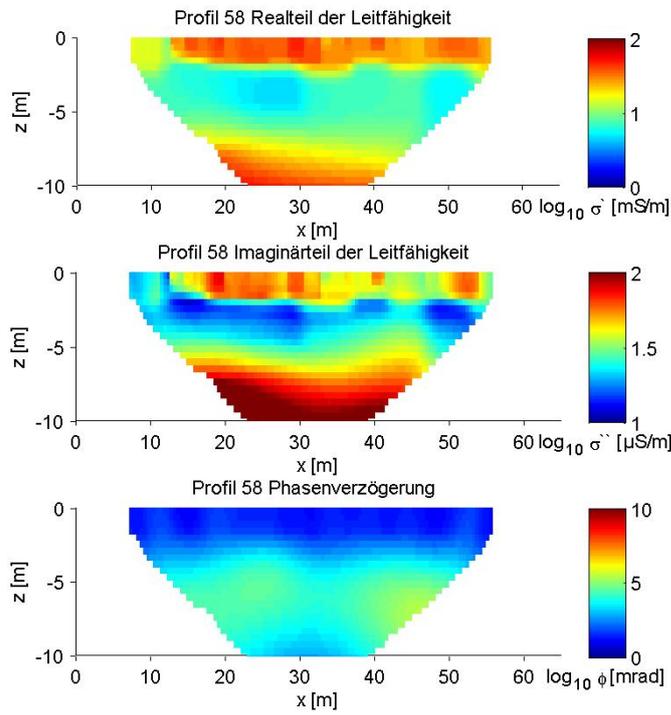
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 55



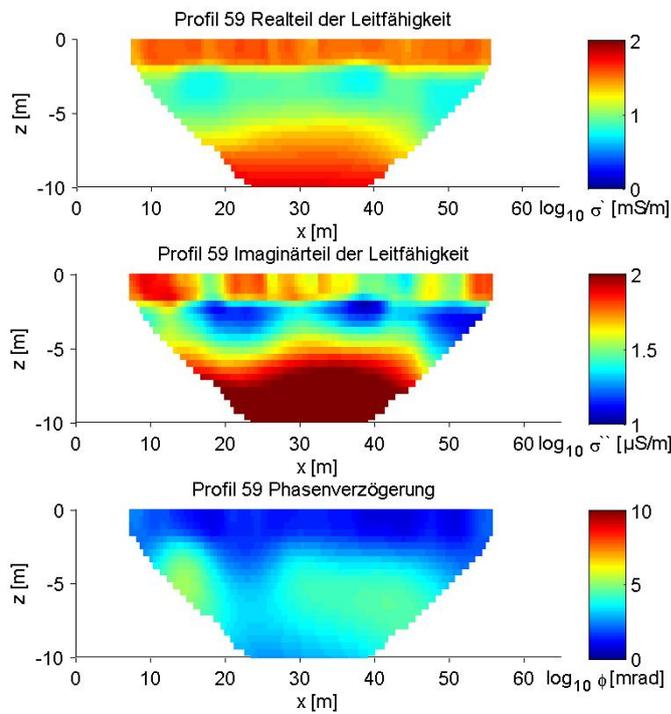
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 56



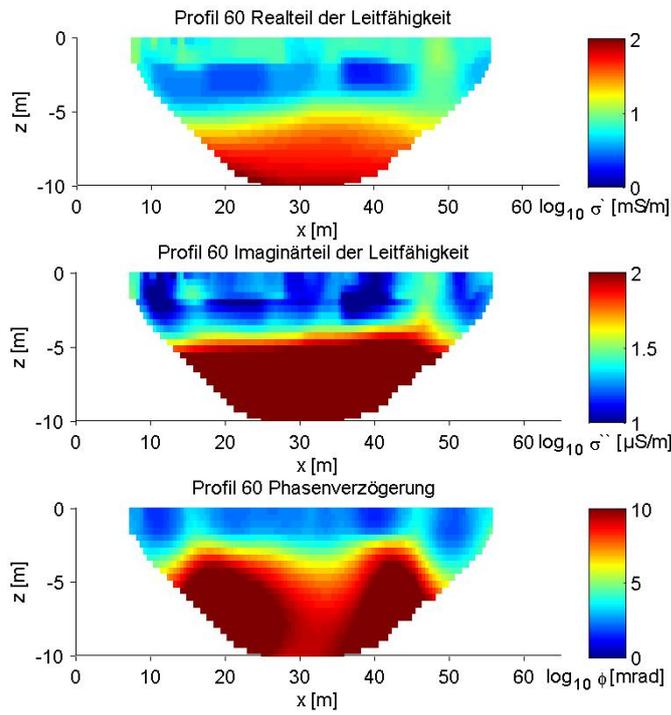
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 57



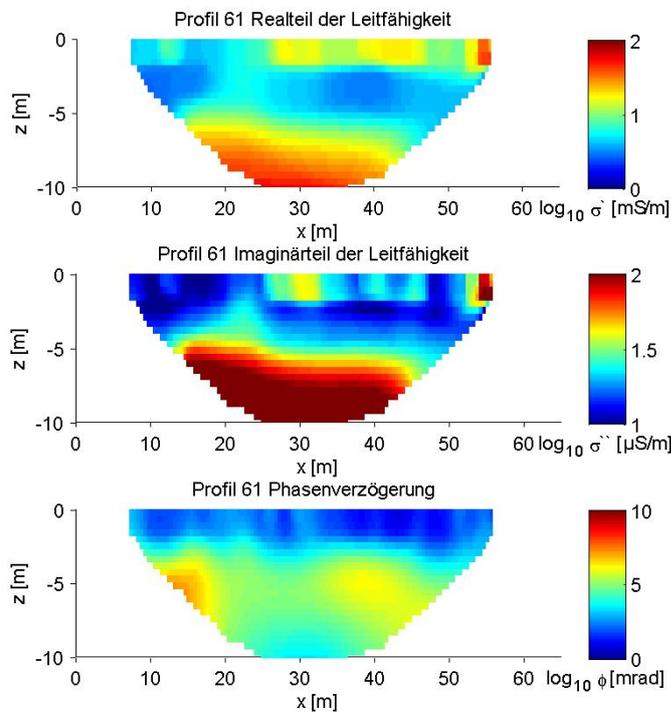
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 58



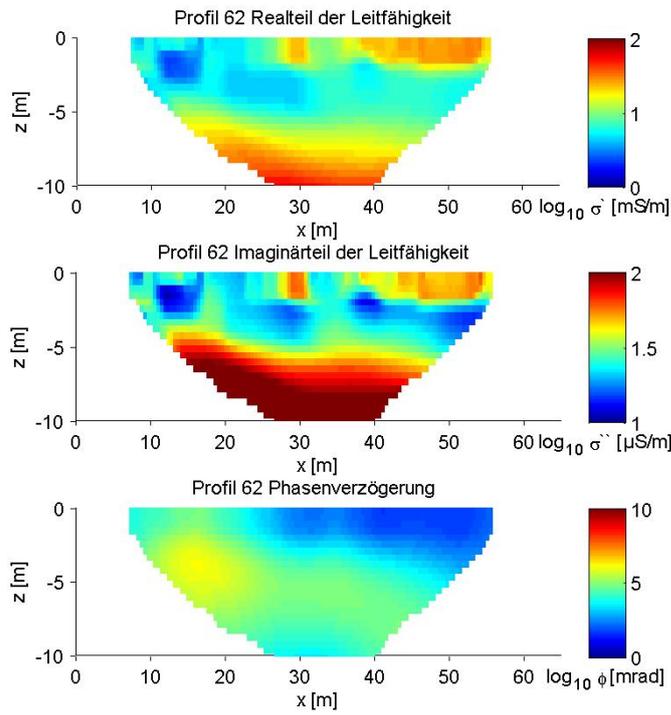
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 59



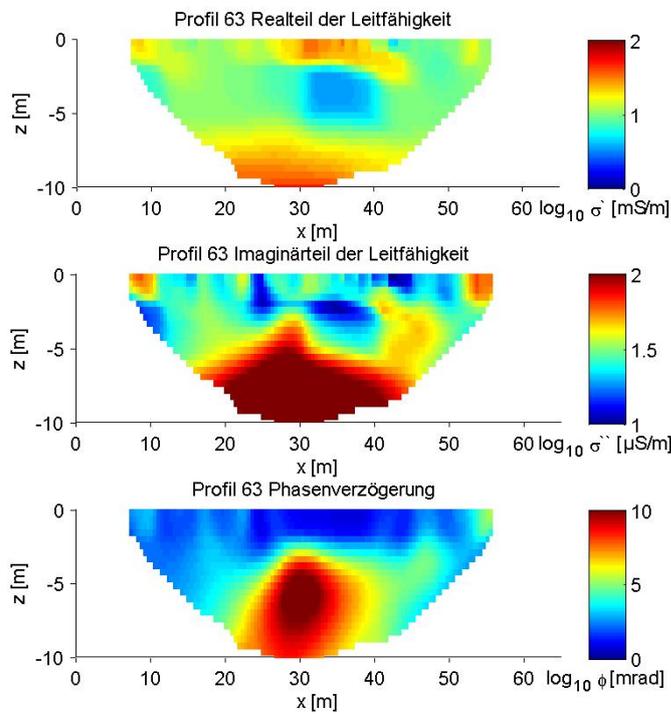
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 60



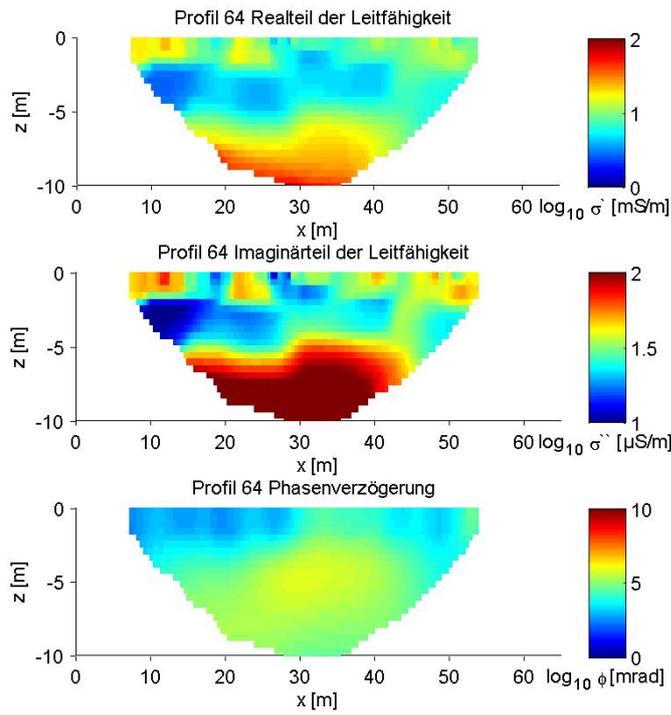
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 61



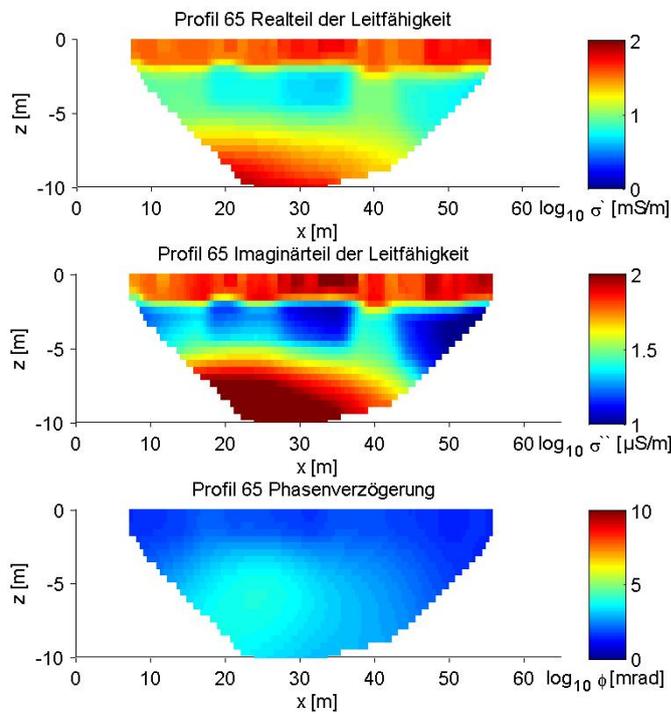
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 62



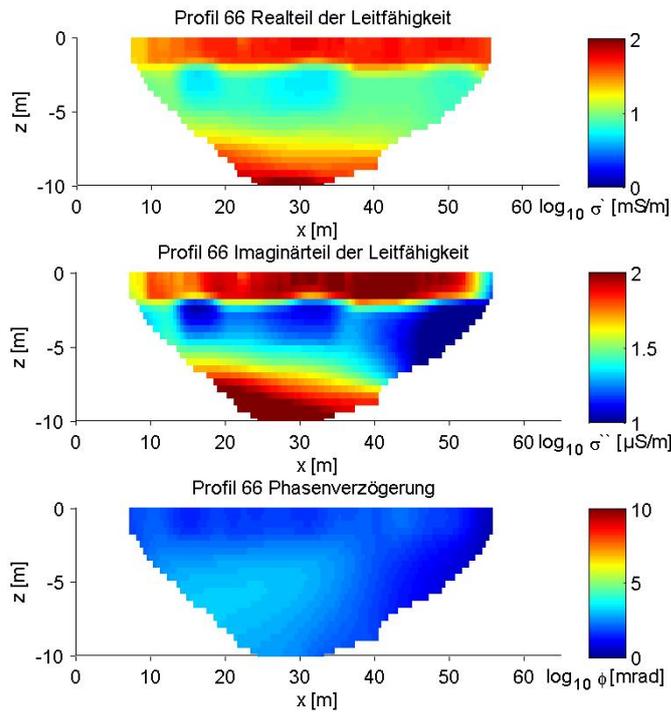
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 63



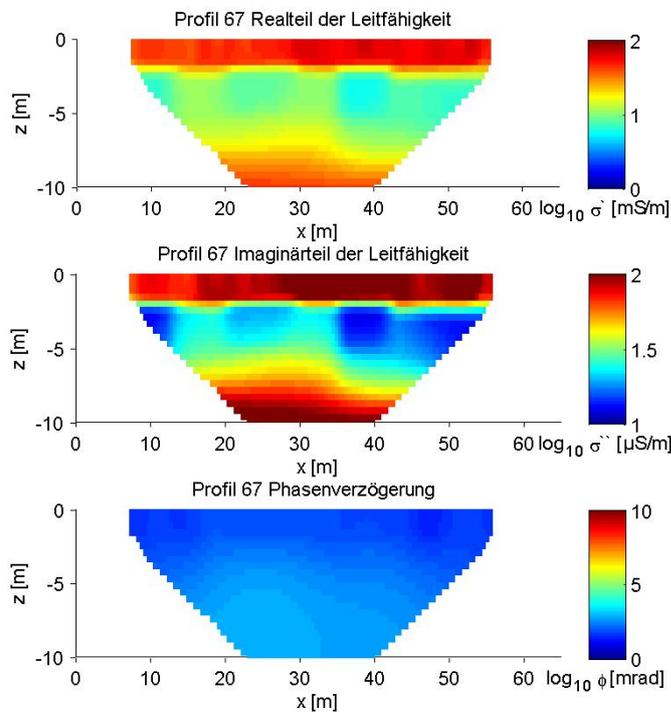
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 64



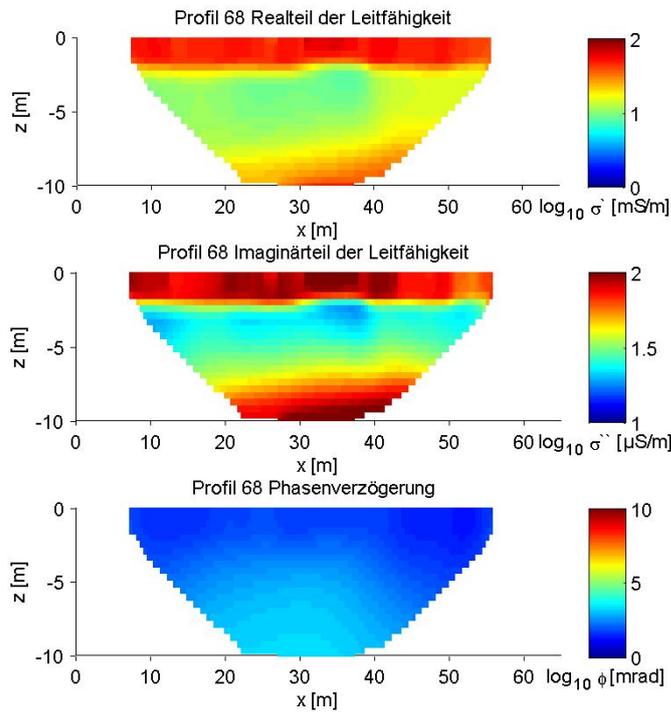
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 65



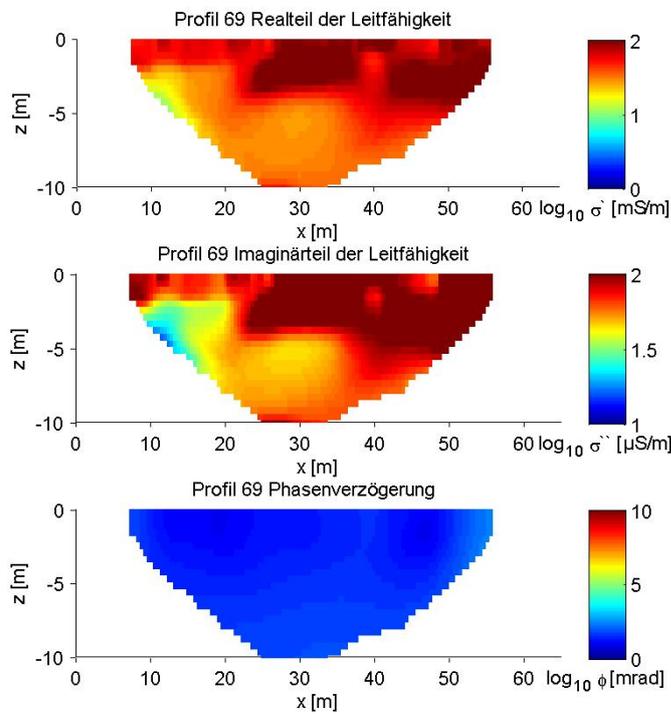
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 66



Res2DInv - Ergebnisse für Profil 67



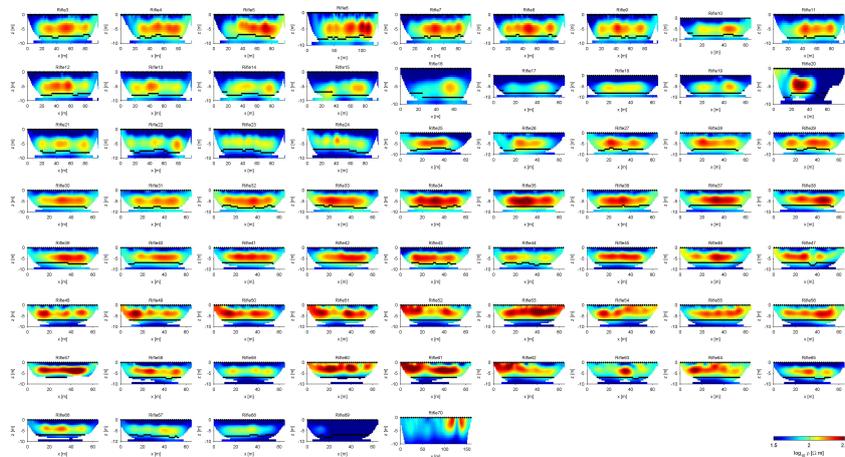
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 68



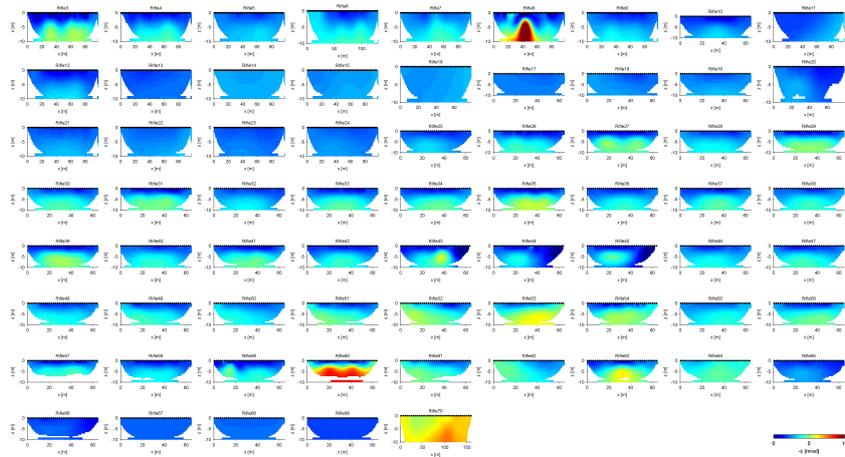
Res2DInv - Ergebnisse für Profil 69

B.3. Übersichten aller Profile für scheinbaren spezifischen Widerstand und Phasenverzögerung berechnet mit CRTomo

Dieser Anhang stellt die Übersichten aller Profile, sowohl für scheinbare spezifische Widerstände, als auch für Phasenverzögerungen, dar. Diese Ergebnisse wurden mittels CRTomo berechnet.



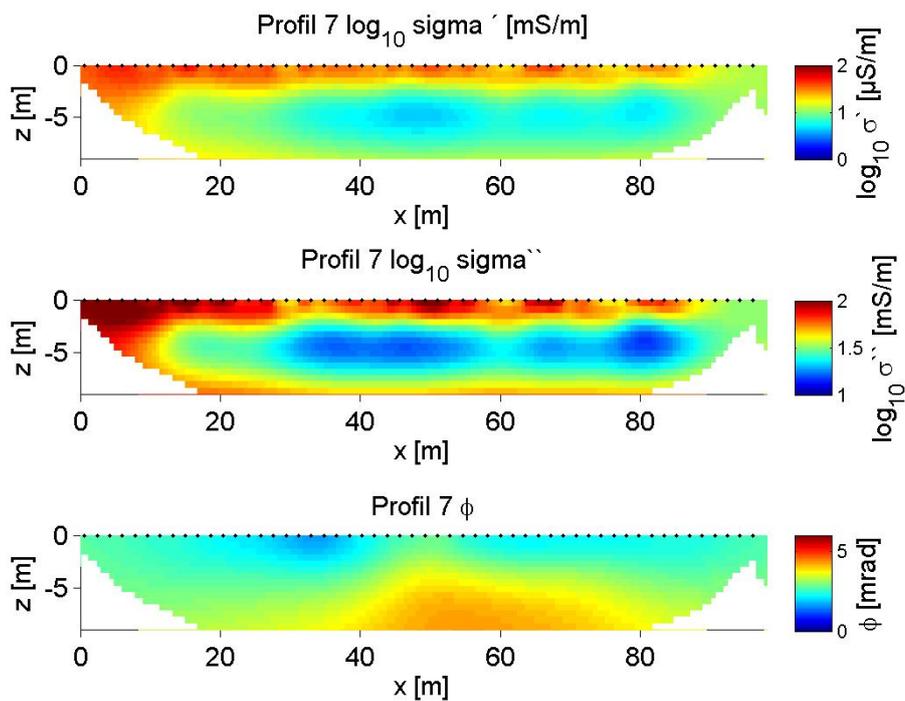
Übersicht der Profile, die scheinbaren spezifischen Widerstände betreffend Mit CRTomo berechnet



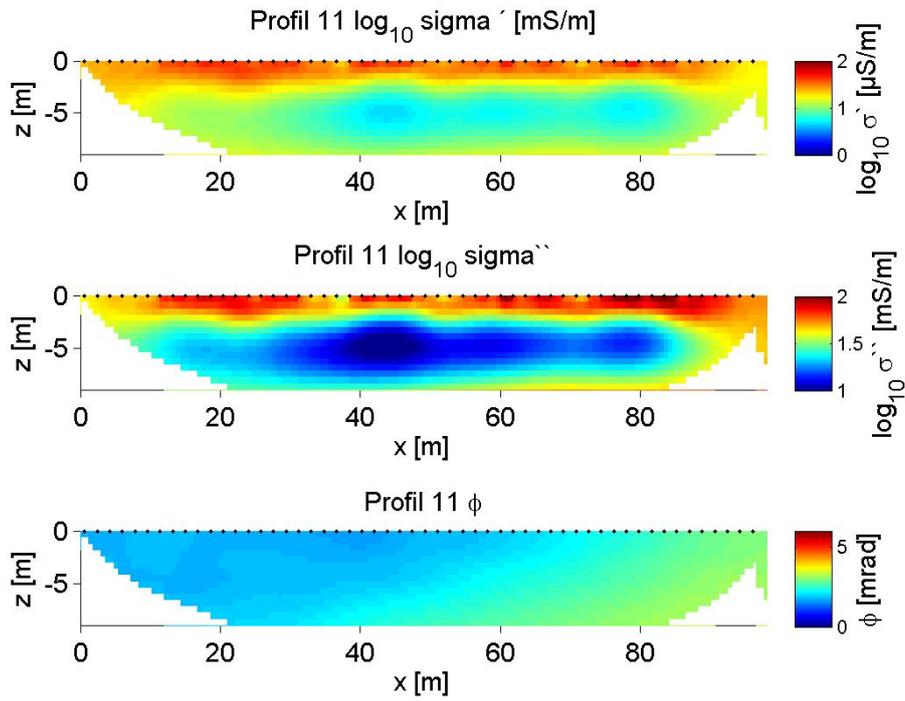
Übersicht der Profile, die Phasenverzögerung betreffend Mit CRTomo berechnet

B.4. Ergebnisse von gewählten Profilen für Real- und Imaginärteil der Leitfähigkeit, sowie Phasenverzögerung berechnet mit CRTomo

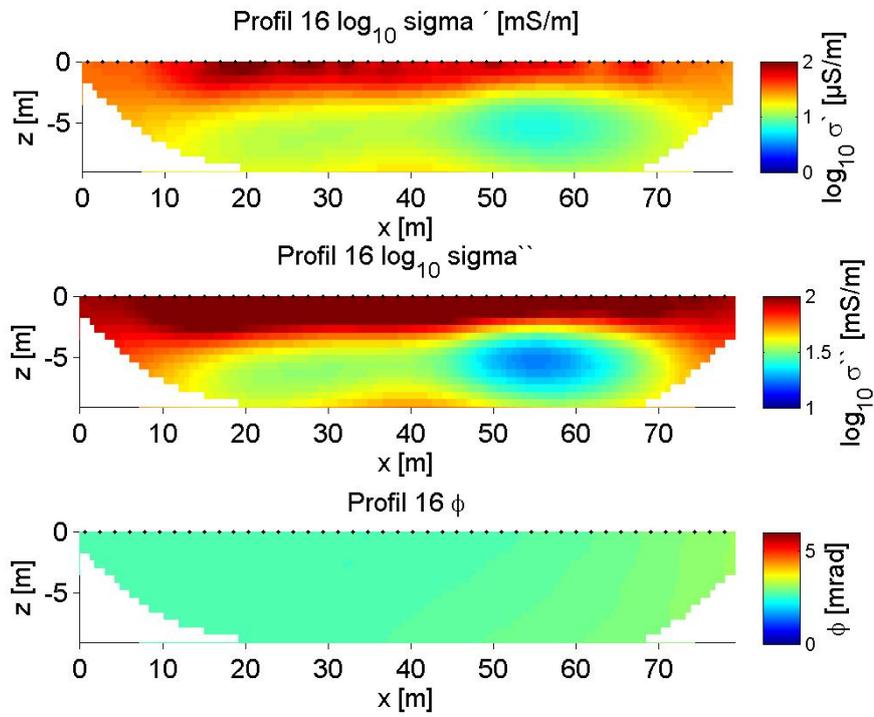
Dieser Abschnitt des Anhangs zeigt von gewählten Profilen die Ergebnisse der Inversion, sowohl für Leitfähigkeit (Realteil und Imaginärteil), als auch für Phasenverzögerung, aus der Berechnung mittels CRTomo. Sie wurden aufgrund von speziellen Merkmalen, wie Anomalien oder fehlender Schichtausprägung, gewählt. Diese Merkmale sollen helfen einen Vergleich mit den Res2DInv-Ergebnissen ziehen zu können. Zusätzlich zu den Profilen mit speziellen Merkmalen, wurden einige gewählt, die den typischen Schichtverlauf wiedergeben, um auch diese Situation beurteilen zu können.



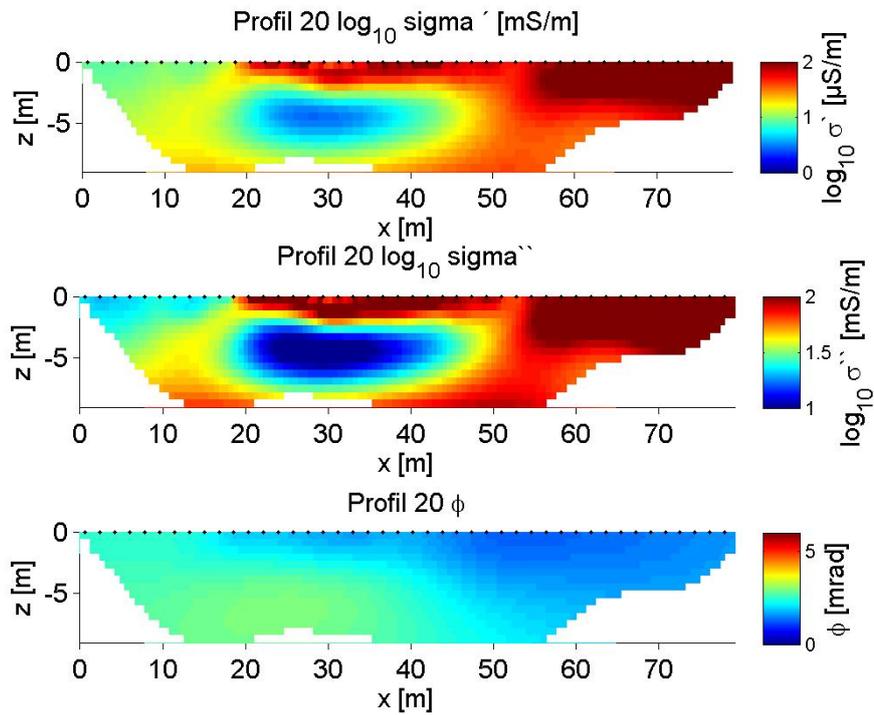
CRTomo - Ergebnisse für Profil 7



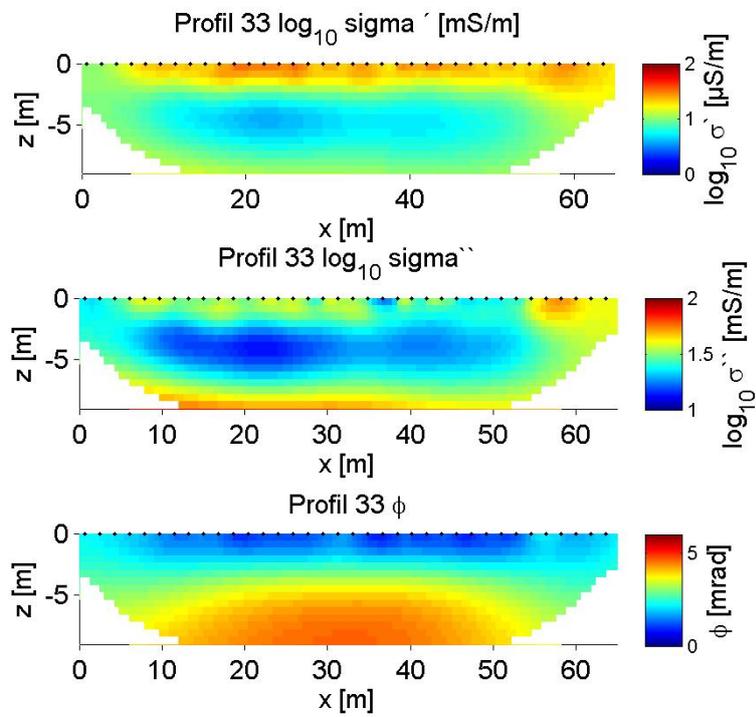
CRTomo - Ergebnisse für Profil 11



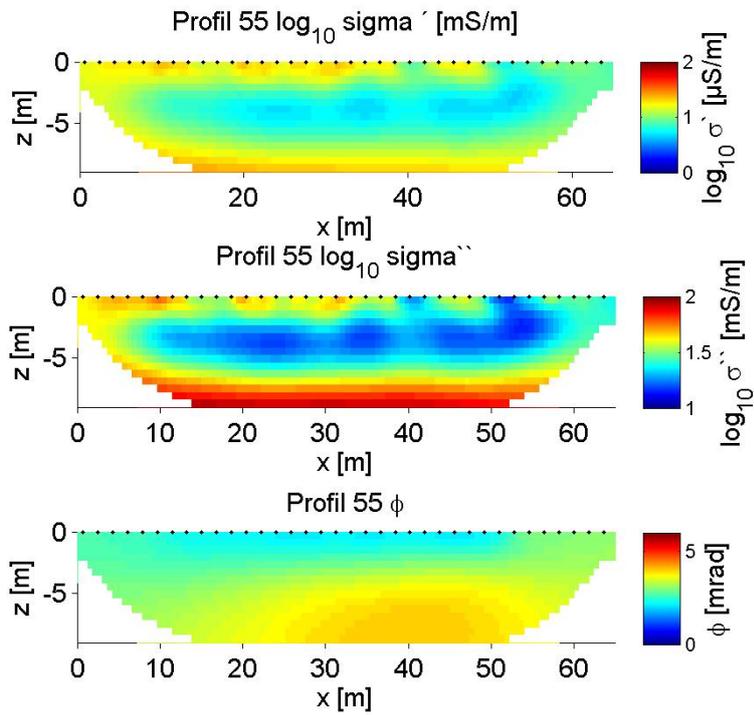
CRTomo - Ergebnisse für Profil 16



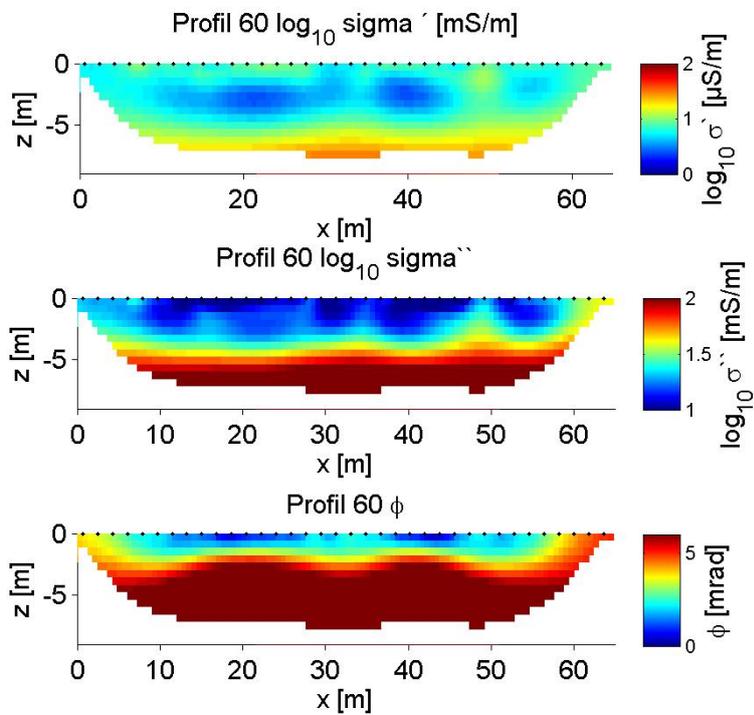
CRTomo - Ergebnisse für Profil 20



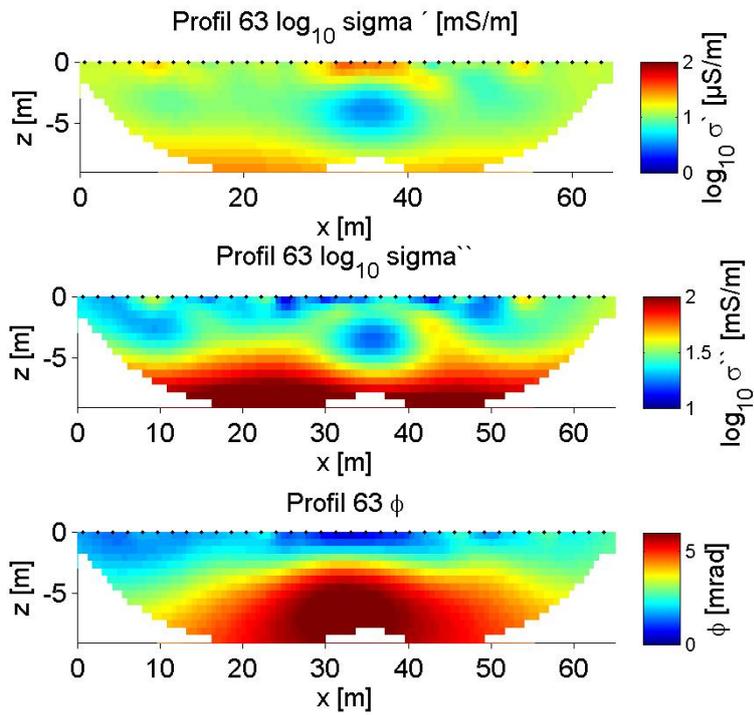
CRTomo - Ergebnisse für Profil 33



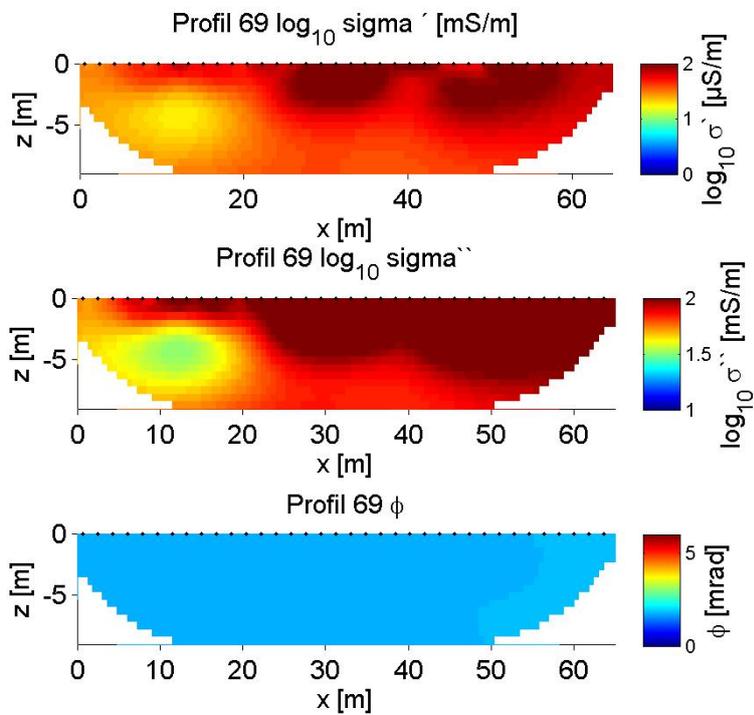
CRTomo - Ergebnisse für Profil 55



CRTomo - Ergebnisse für Profil 60



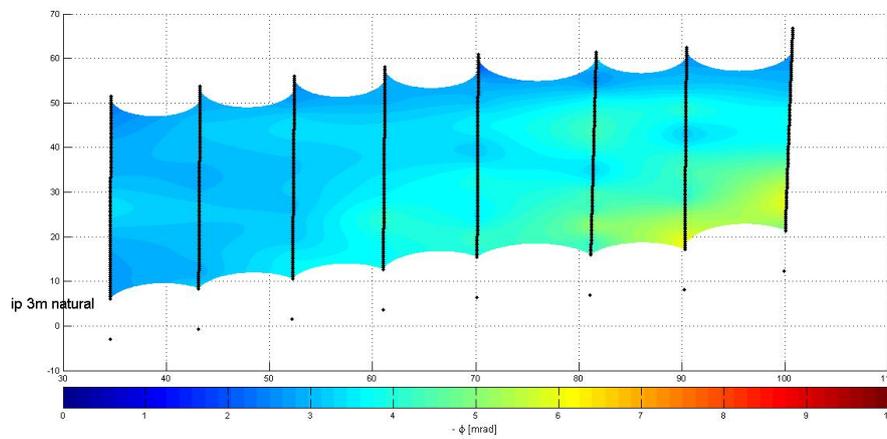
CRTomo - Ergebnisse für Profil 63



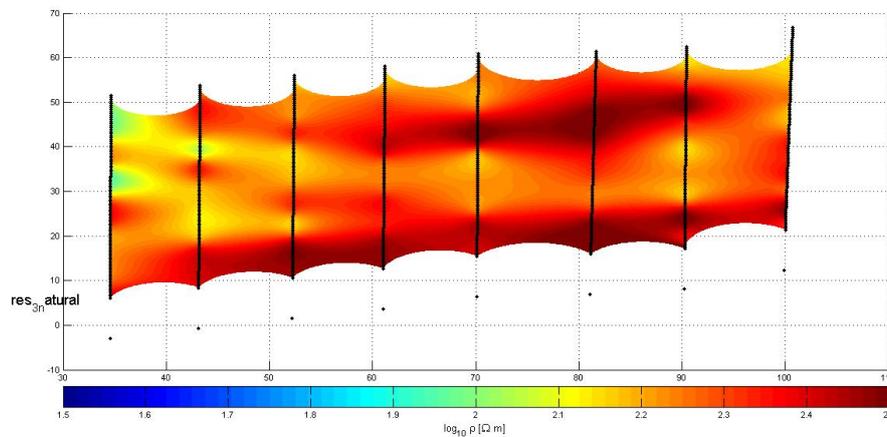
CRTomo - Ergebnisse für Profil 69

C. Abbildungen zu Interpolationen

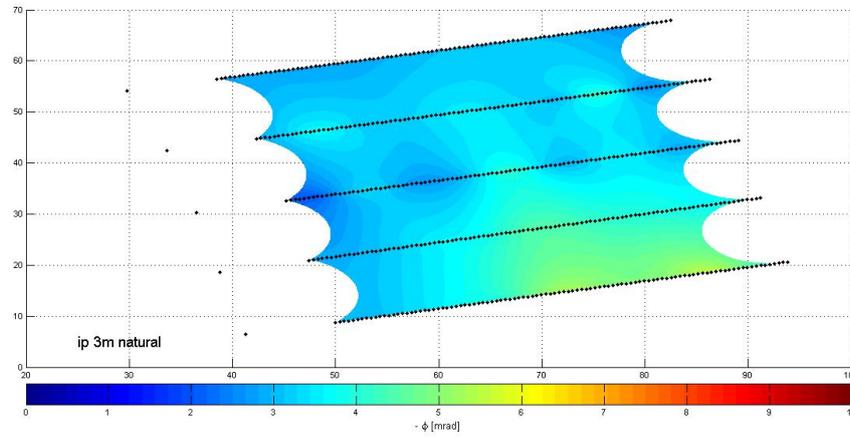
Dieser Anhang präsentiert die einzelnen Ergebnisse der unterschiedlichen Interpolationsmethoden.



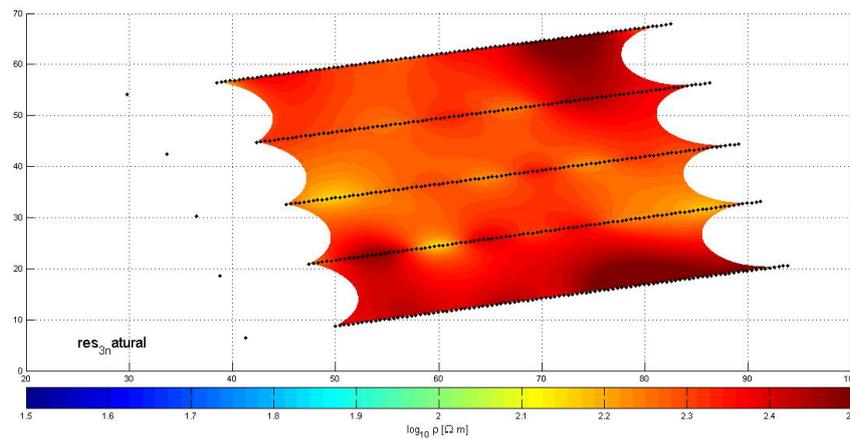
Karte der Profile #47 bis #62 (Nord - Süd Ausrichtung) mit natural Interpolation der Phasenverzögerungswerte



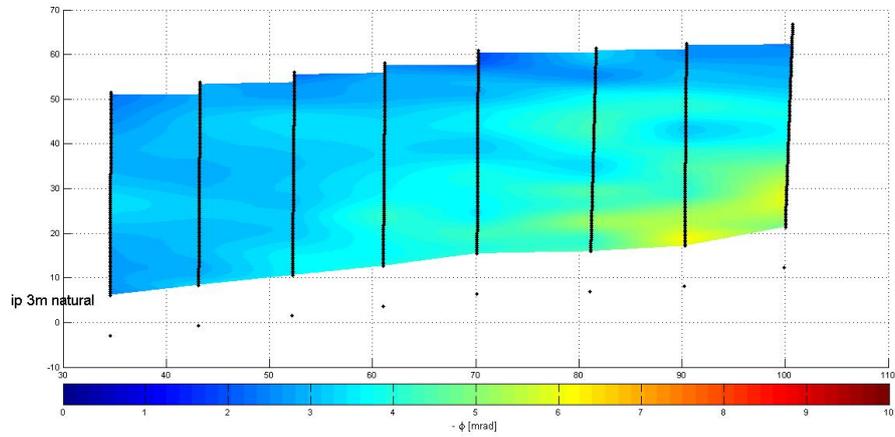
Karte der Profile #47 bis #62 (Nord - Süd Ausrichtung) mit natural Interpolation der spezifischen Widerstandswerte



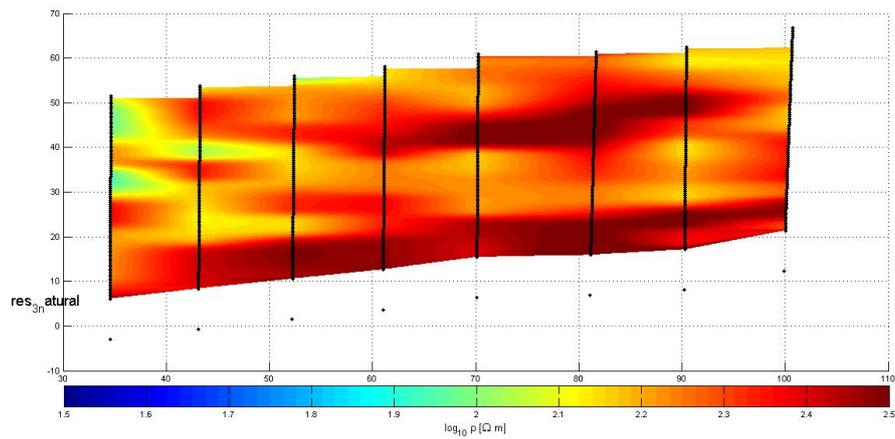
Karte der Profile #53 bis #57 (Ost - West Ausrichtung) mit natural Interpolation der Phasenverzögerungswerte



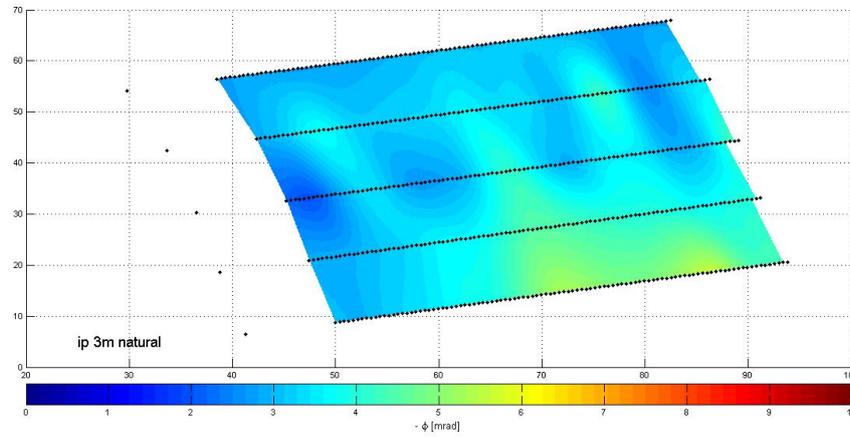
Karte der Profile #53 bis #57 (Ost - West Ausrichtung) mit natural Interpolation der spezifischen Widerstandswerte



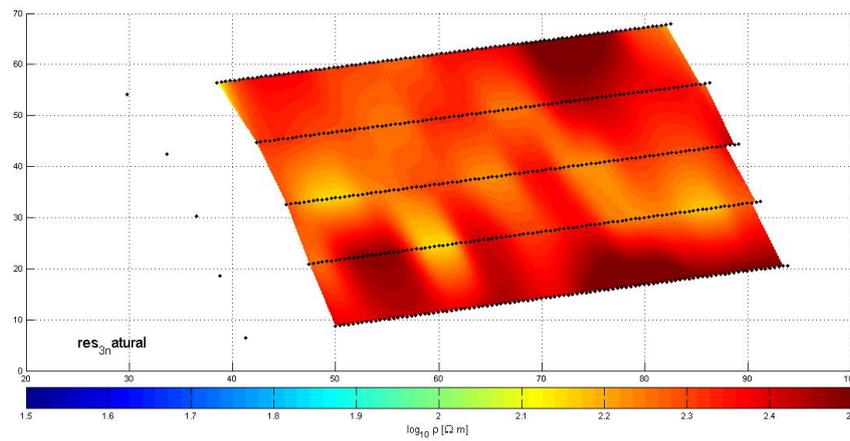
Karte der Profile #47 bis #62 (Nord - Süd Ausrichtung) mit linear Interpolation der Phasenverzögerungswerte



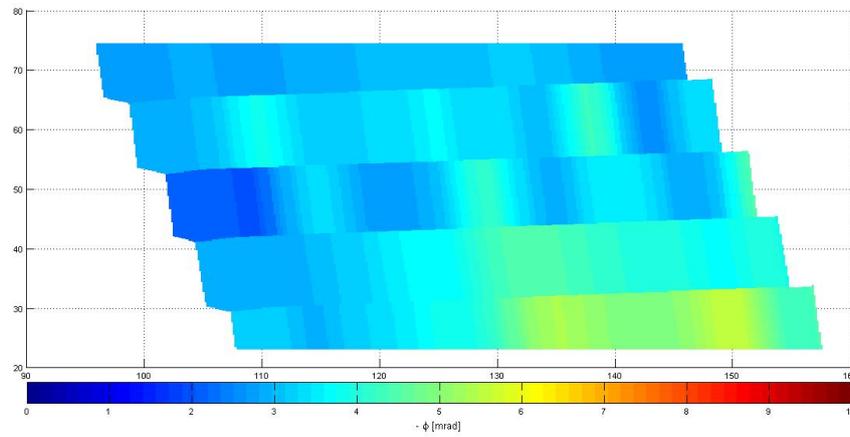
Karte der Profile #47 bis #62 (Nord - Süd Ausrichtung) mit linear Interpolation der spezifischen Widerstandswerte



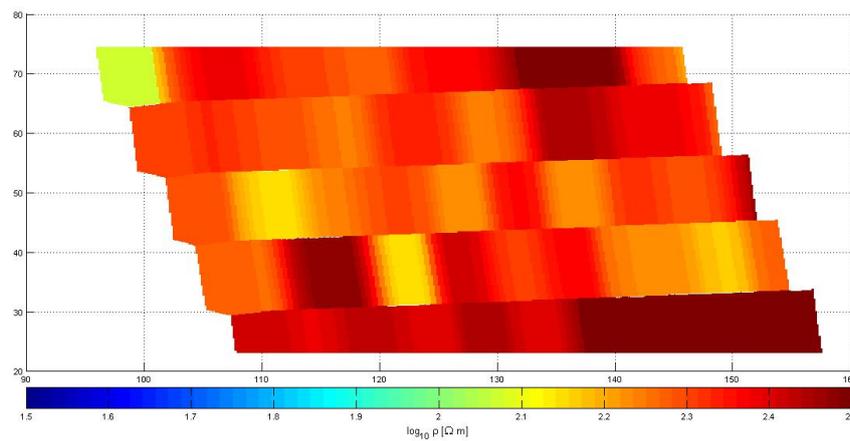
Karte der Profile #53 bis #57 (Ost - West Ausrichtung) mit linear Interpolation der Phasenverzögerungswerte



Karte der Profile #53 bis #57 (Ost - West Ausrichtung) mit linear Interpolation der spezifischen Widerstandswerte



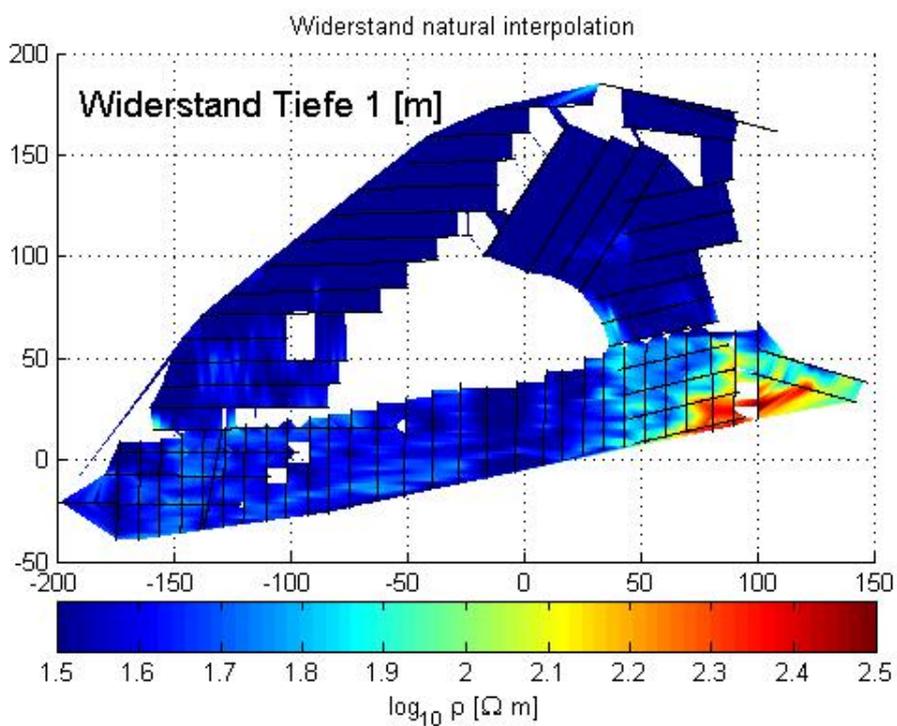
Karte der Profile #53 bis #57 (Ost - West Ausrichtung) mit nearest Interpolation der Phasenverzögerungswerte



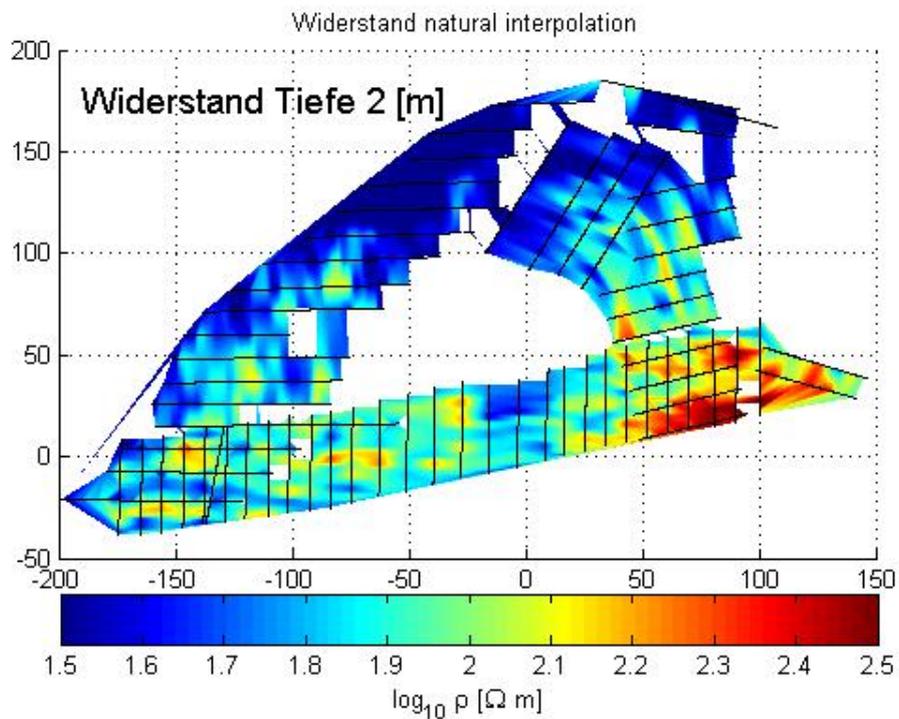
Karte der Profile #53 bis #57 (Ost - West Ausrichtung) mit nearest Interpolation der spezifischen Widerstandswerte

D. Tiefschnitte für scheinbaren spezifischen Widerstand und Phasenverzögerung

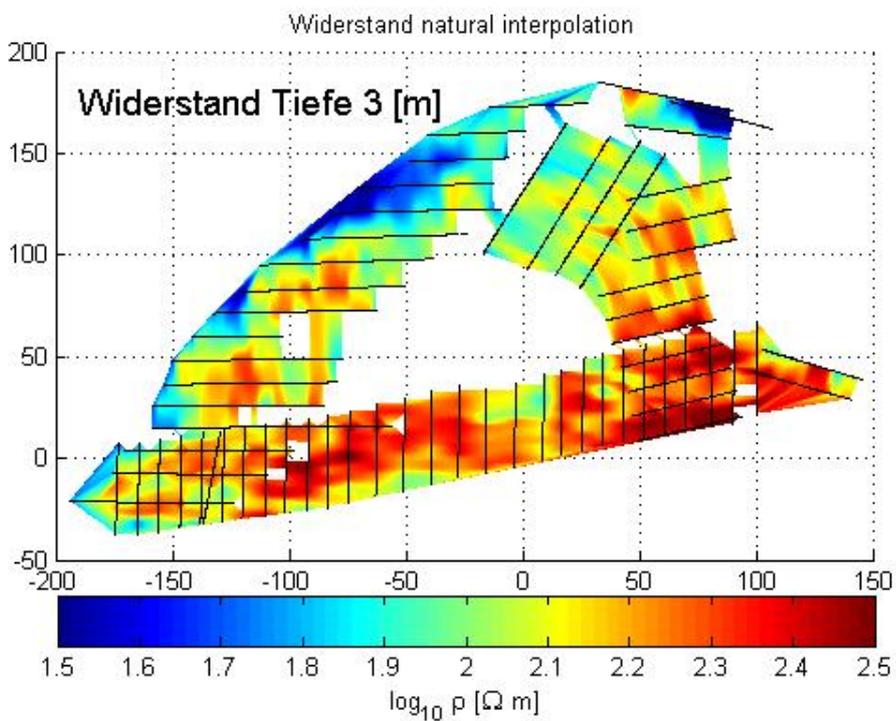
Dieses Kapitel des Anhangs beinhaltet alle Tiefschnitte die, für scheinbare spezifische Widerstände und Phasenverzögerung, im Messareal erzeugt worden sind.



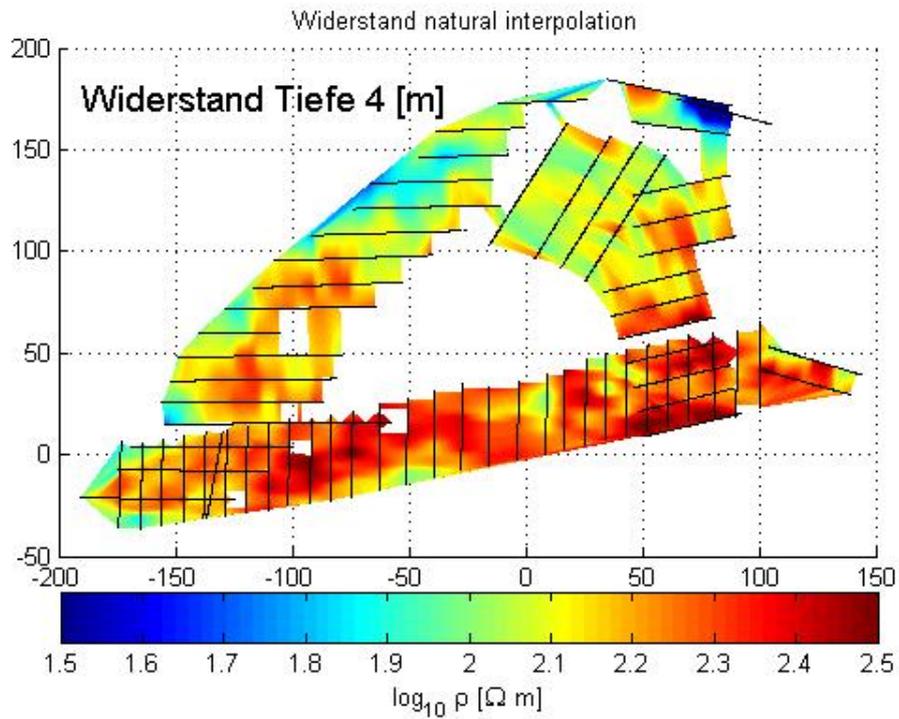
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 1 m



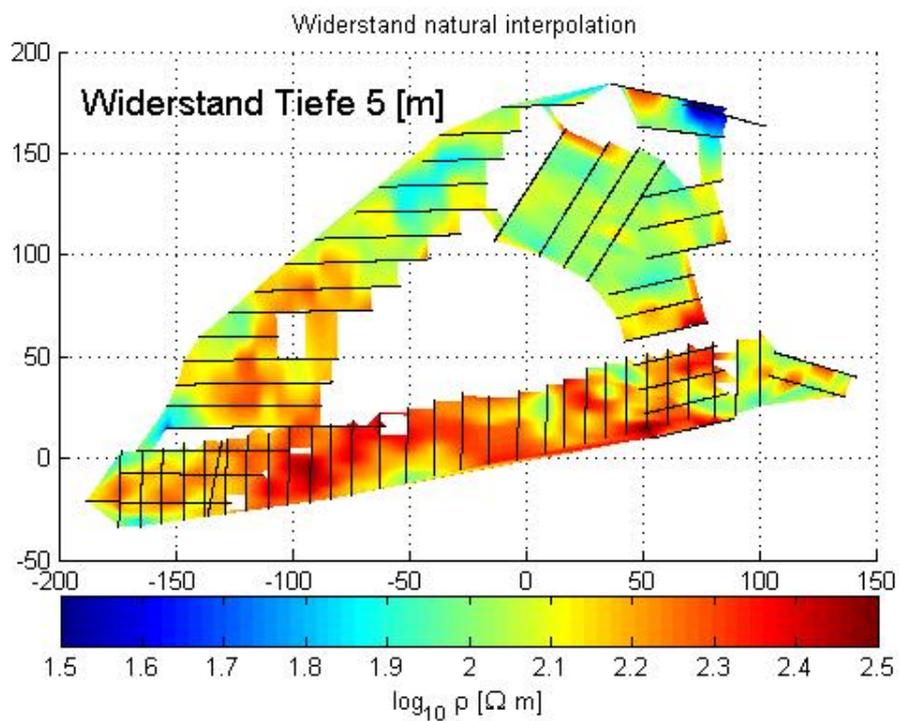
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 2 m



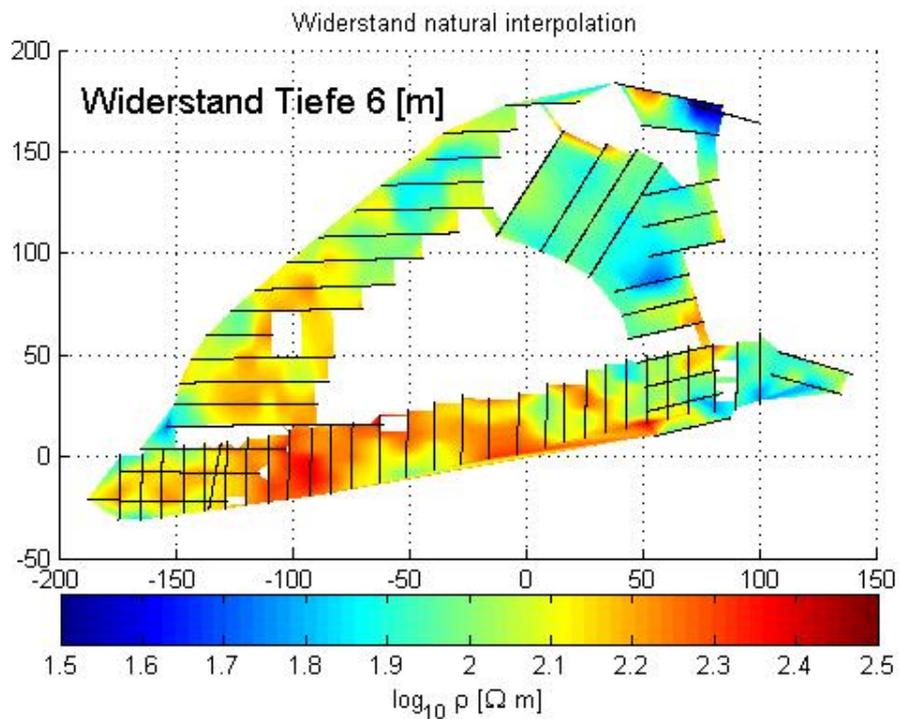
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 3 m



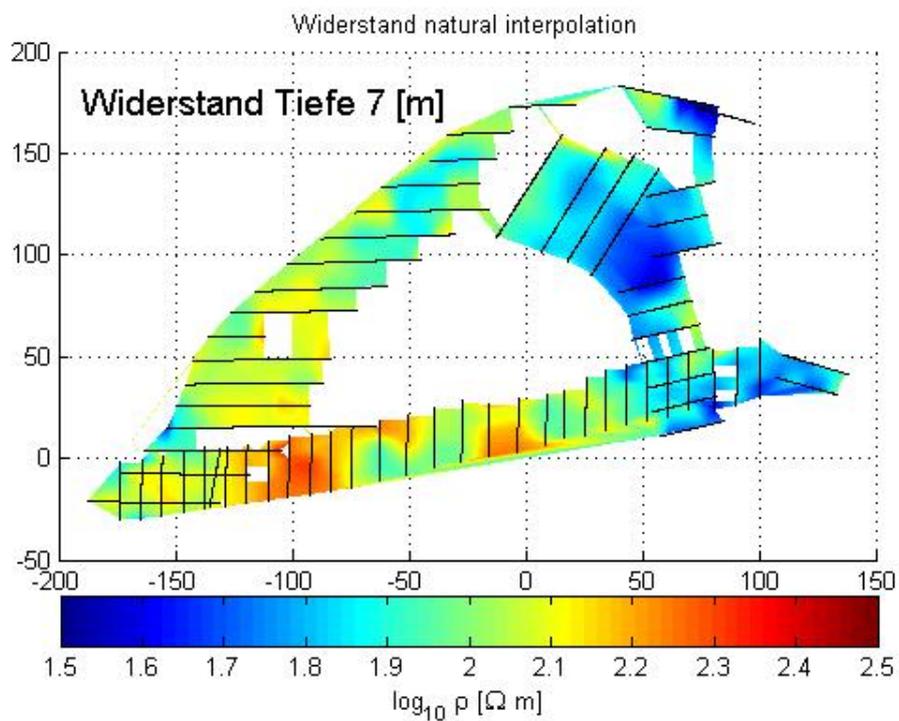
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 4 m



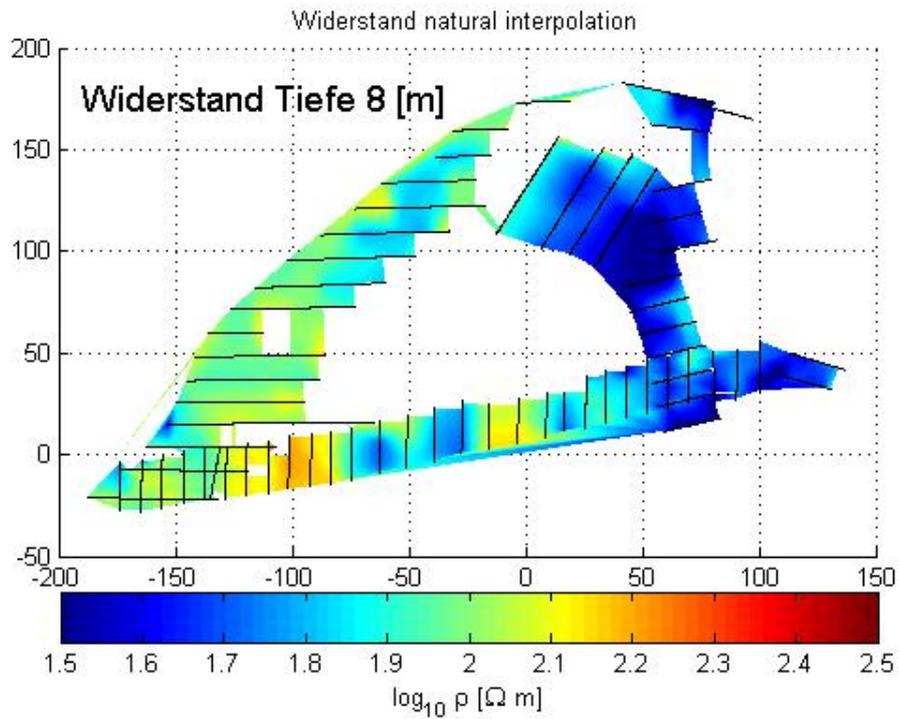
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 5 m



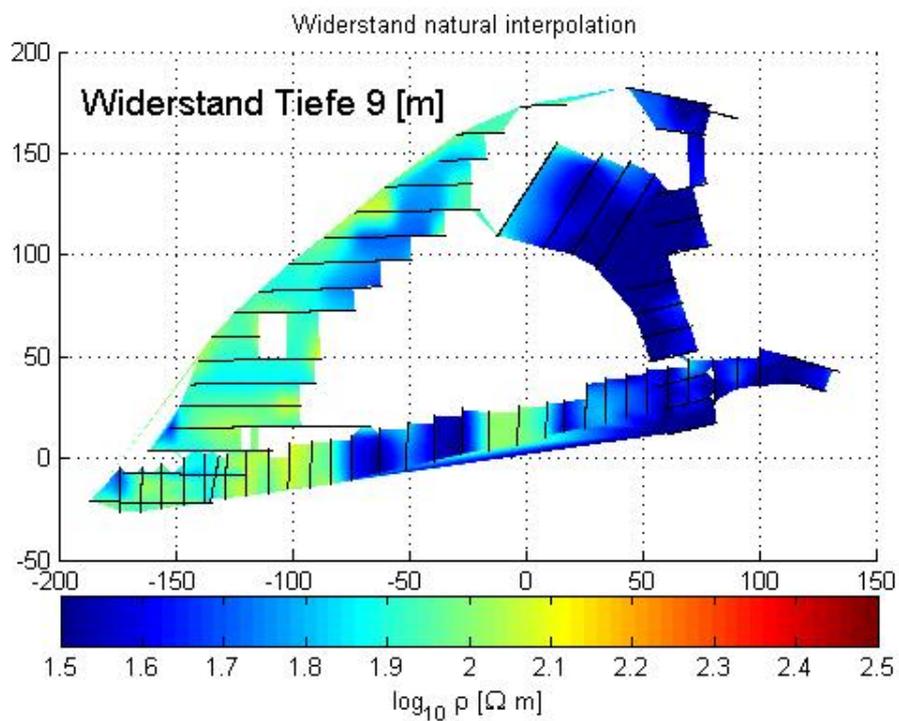
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 6 m



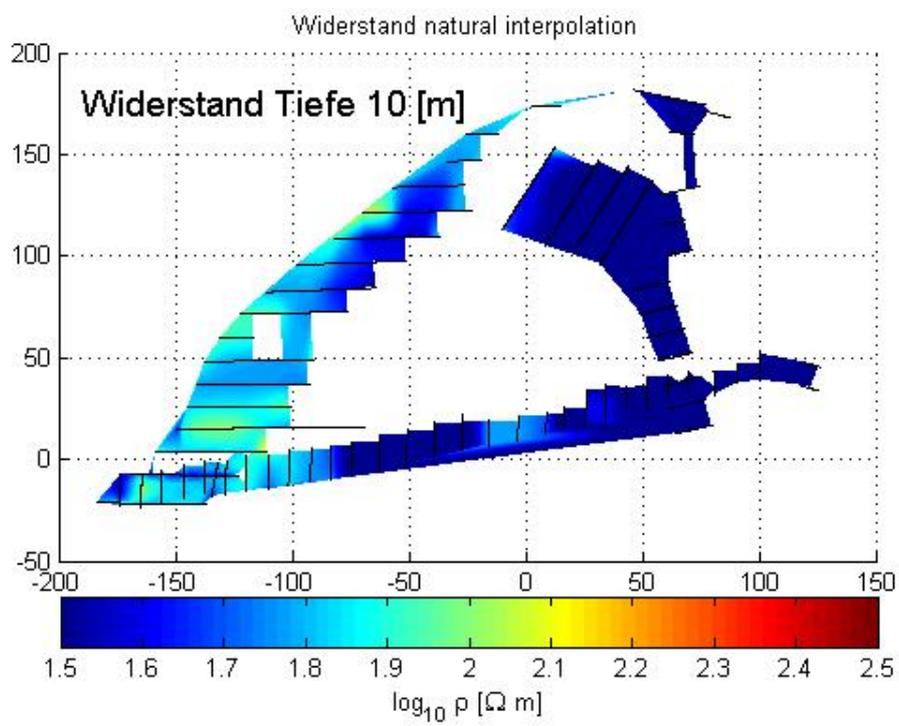
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 7 m



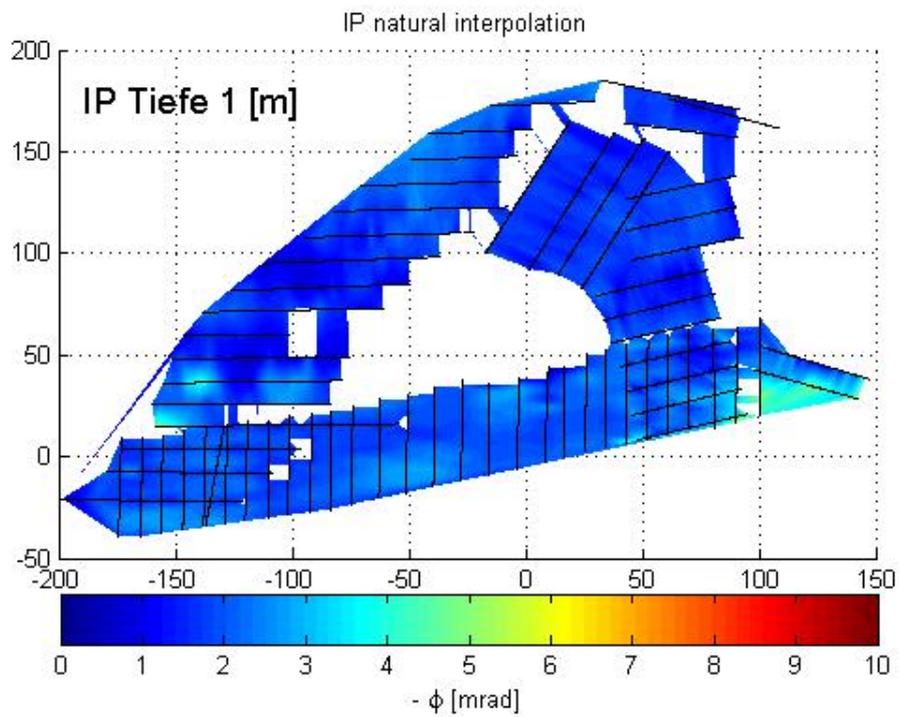
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 8 m



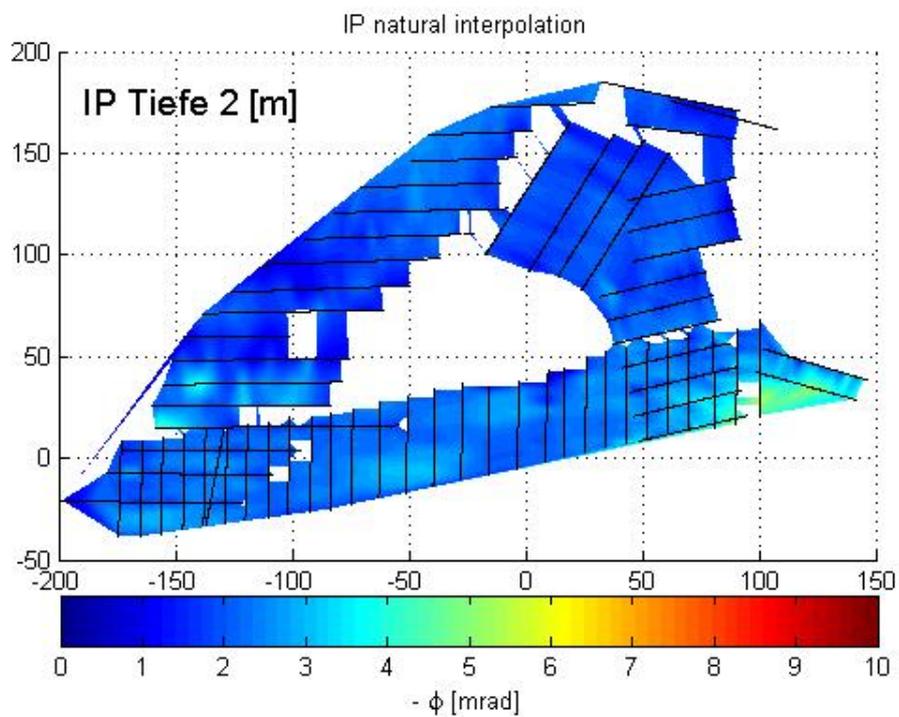
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 9 m



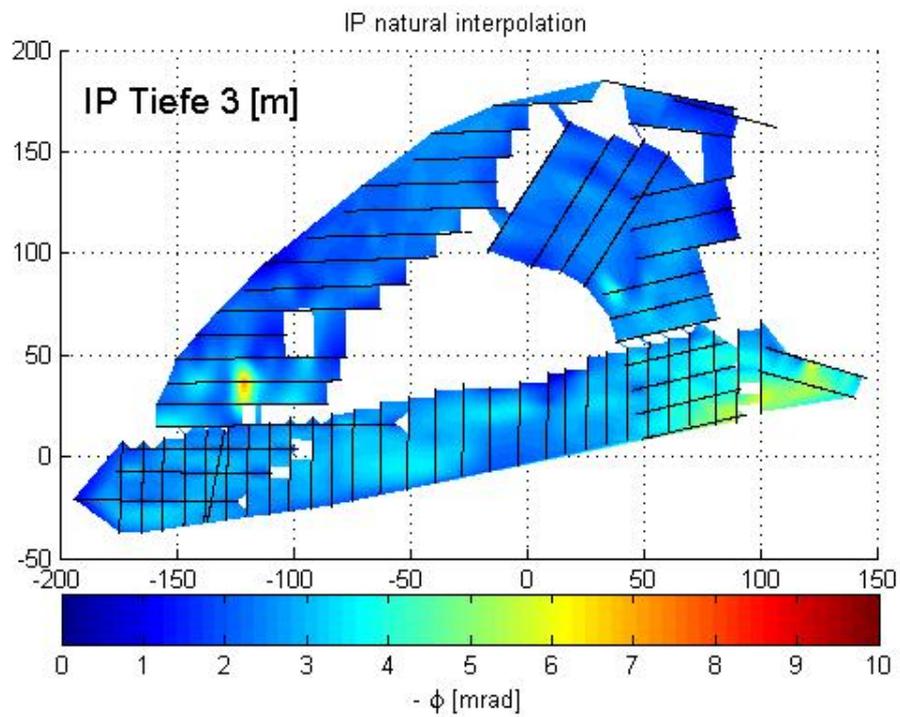
Scheinbare spezifische Widerstandskarte in einer Tiefe von 10 m



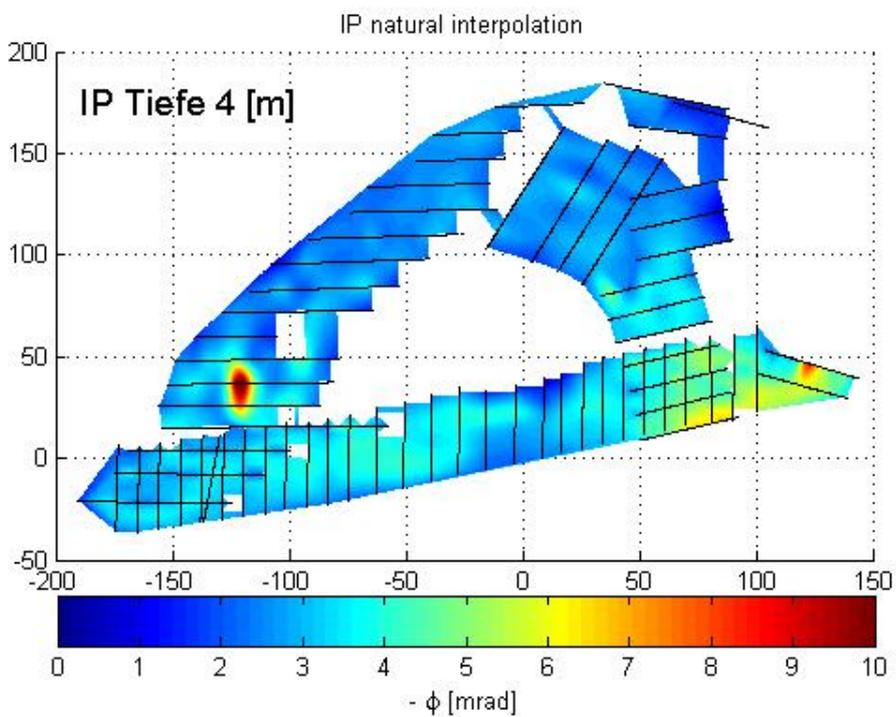
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 1 m



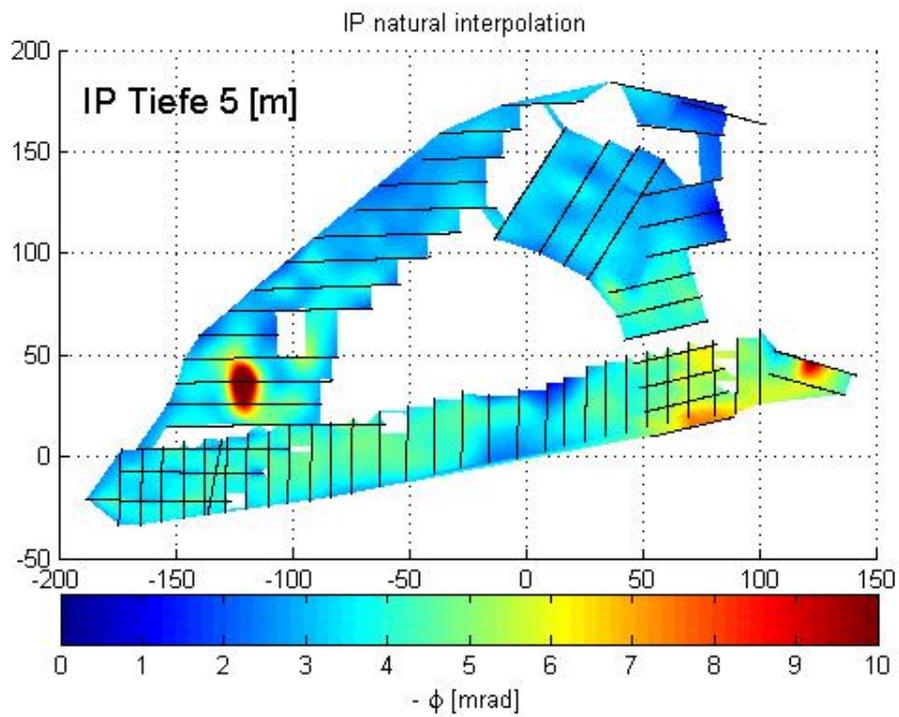
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 2 m



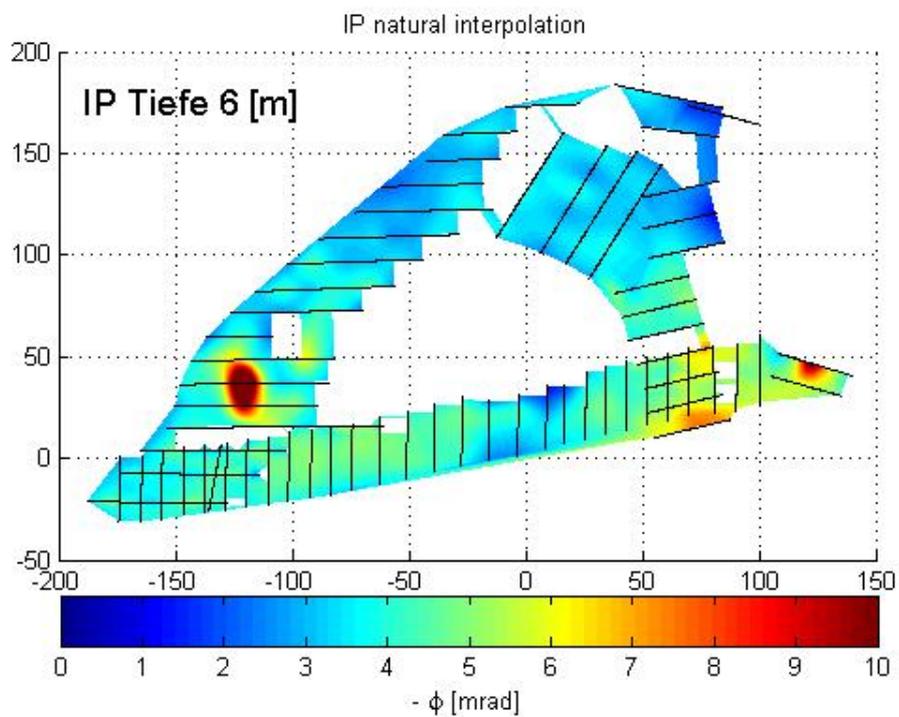
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 3 m



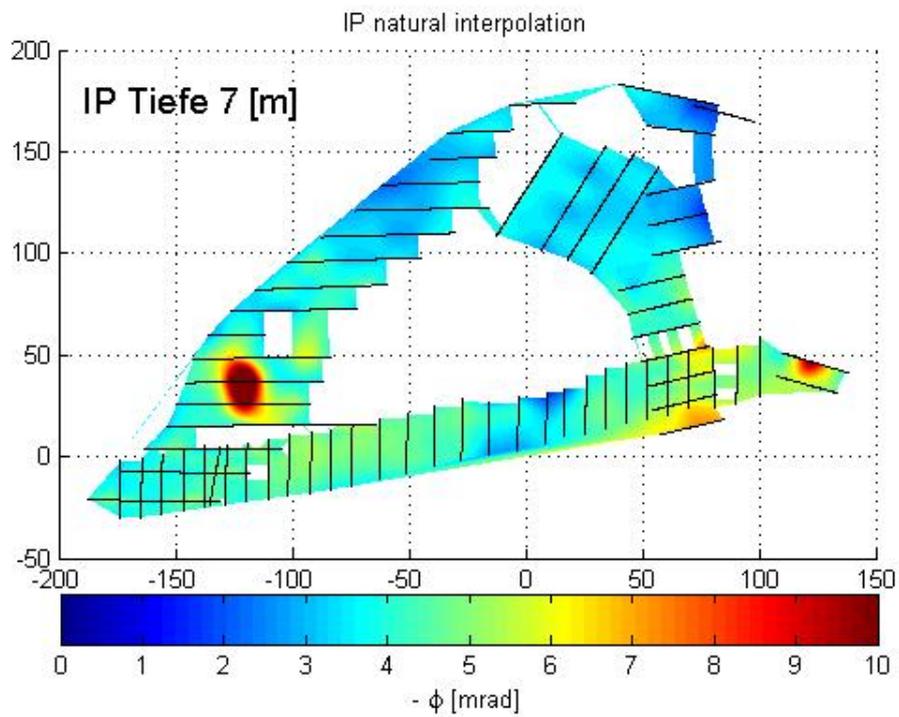
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 4 m



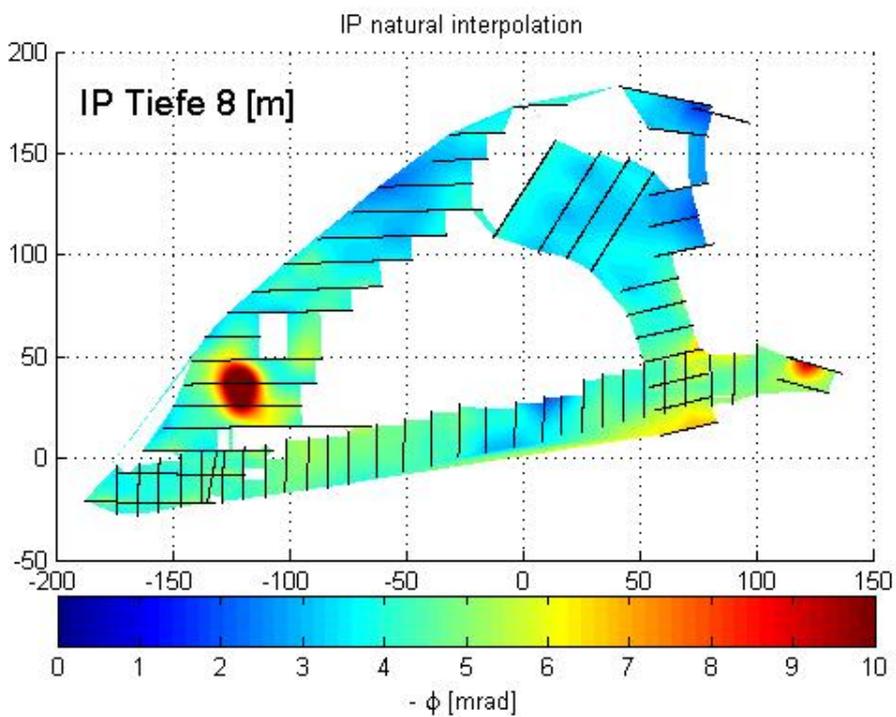
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 5 m



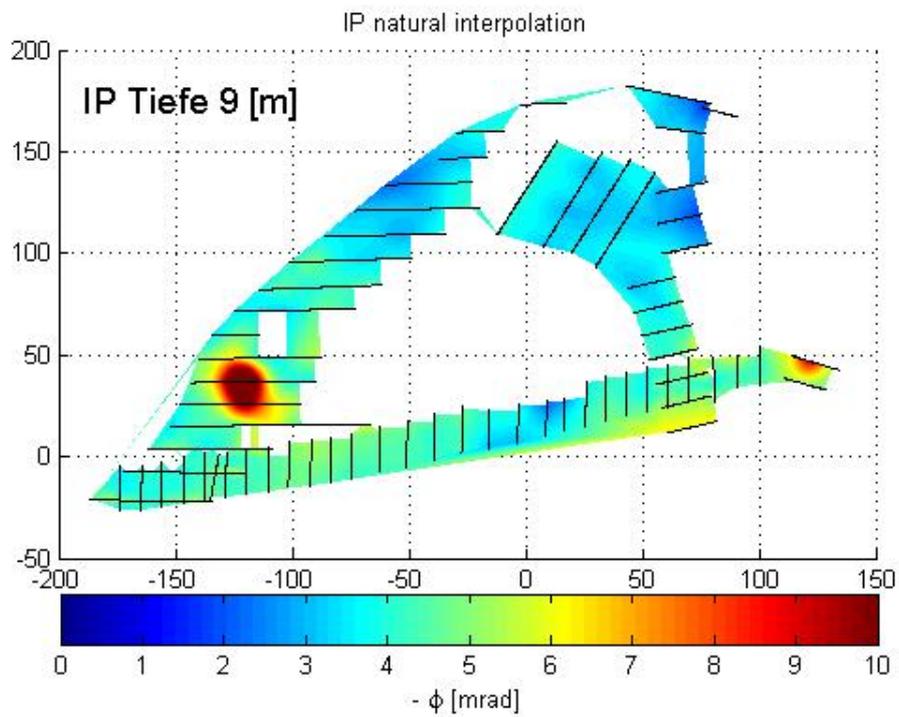
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 6 m



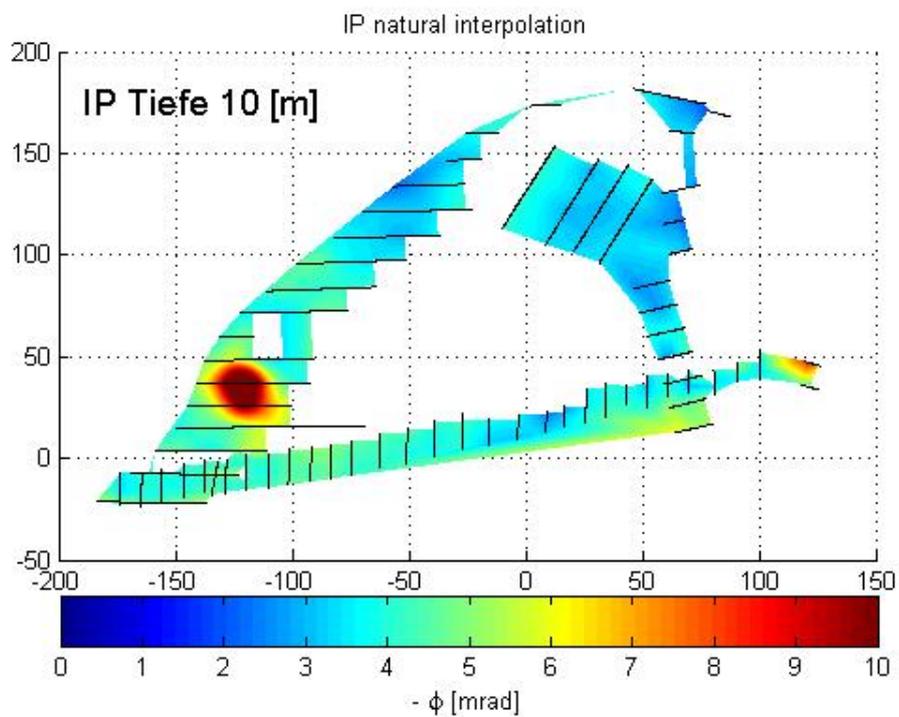
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 7 m



Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 8 m



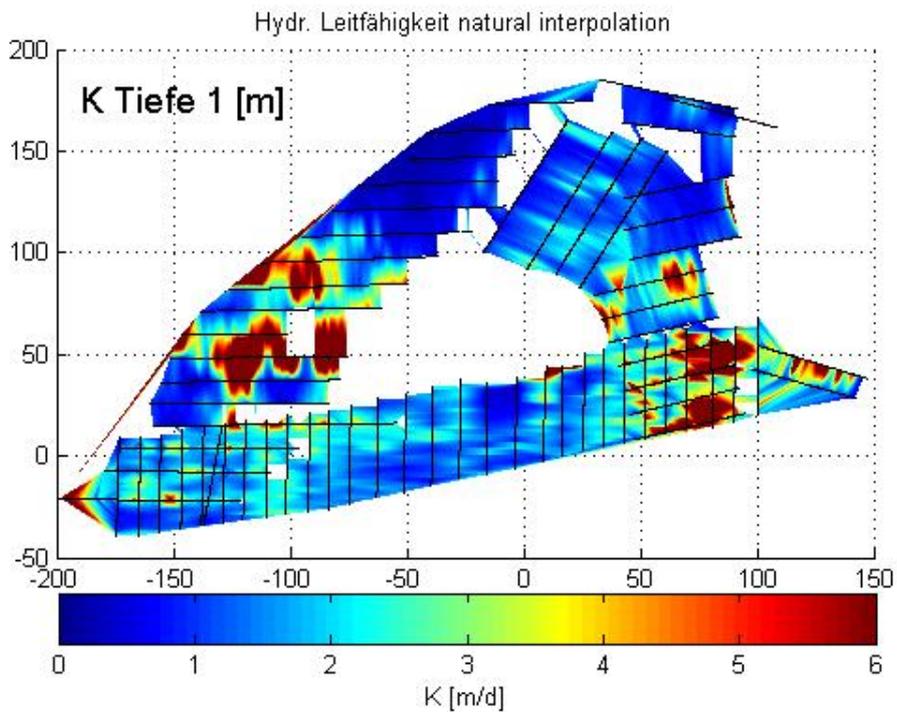
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 9 m



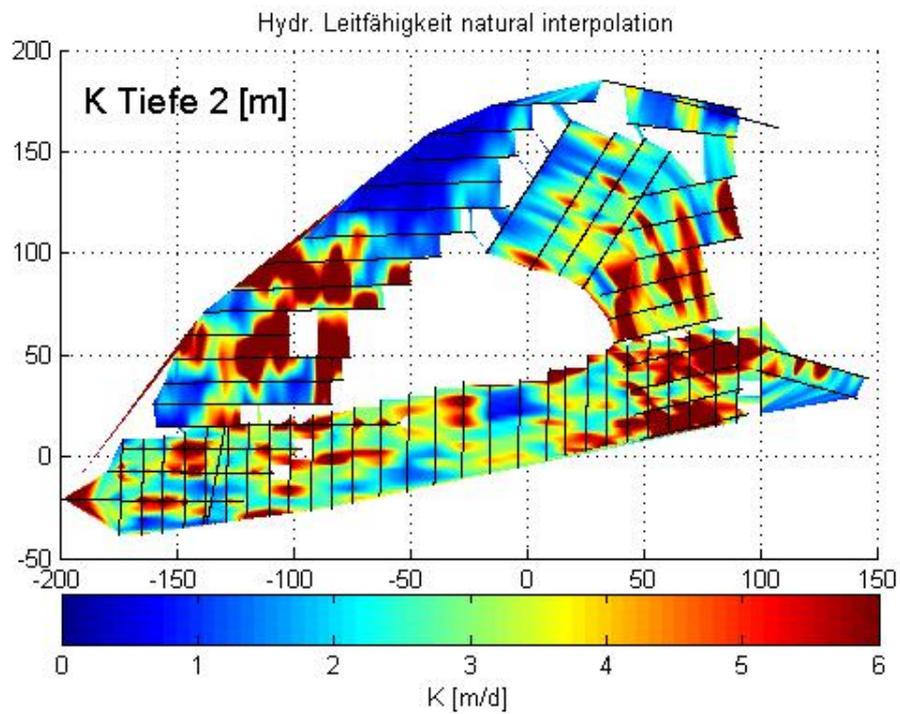
Phasenverzögerungskarte in einer Tiefe von 10 m

E. Tiefschnitte der hydraulischen Leitfähigkeit

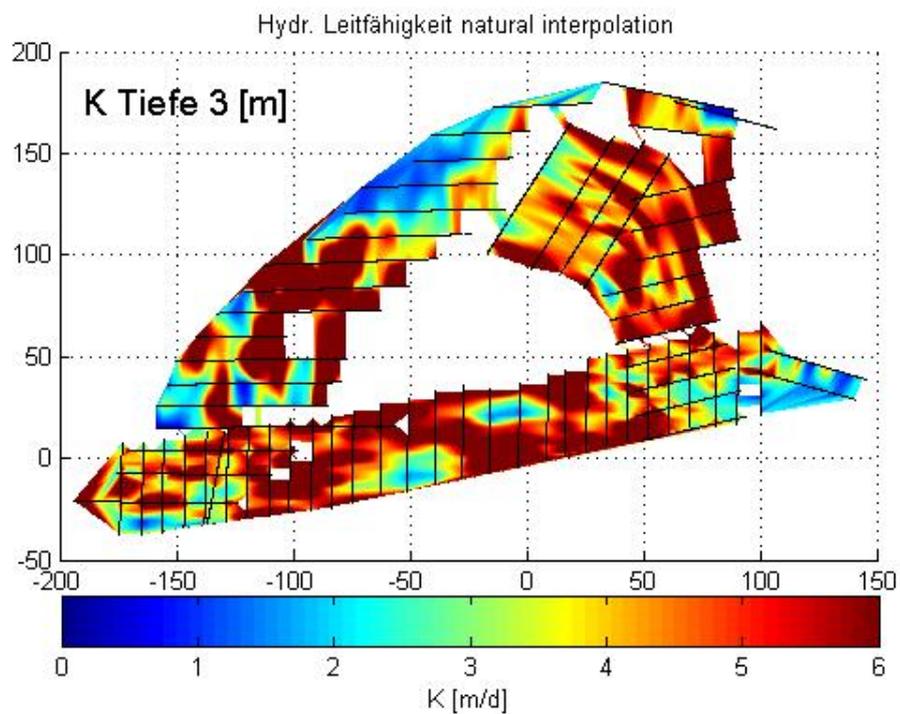
Ähnlich zum vorhergehenden Teil des Anhangs werden hier die alle Tiefschnitte präsentiert, die für den Parameter der hydraulischen Leitfähigkeit K erzeugt worden sind.



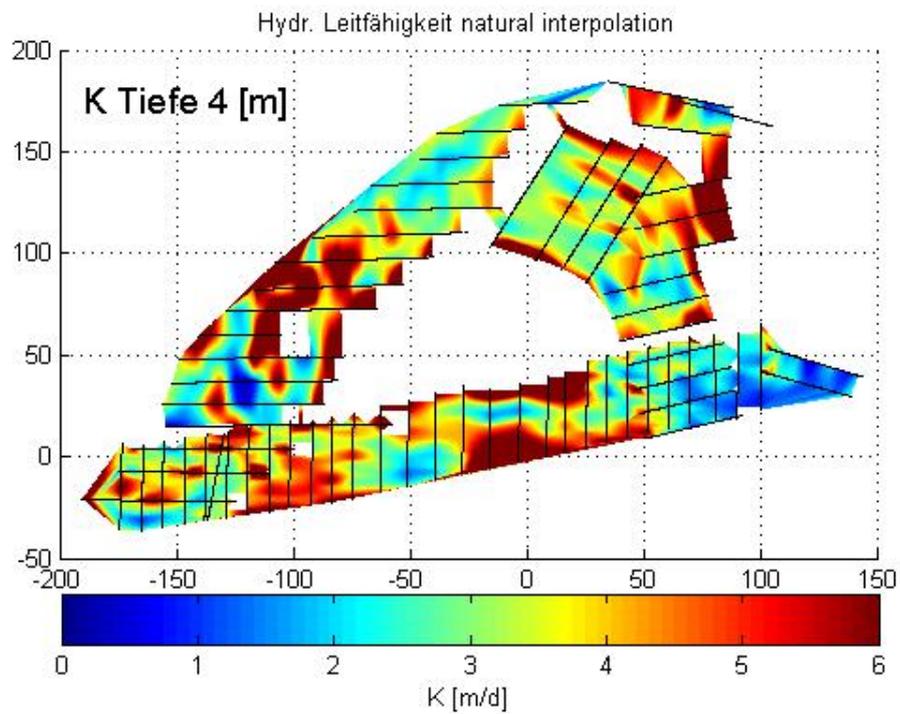
Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 1 m



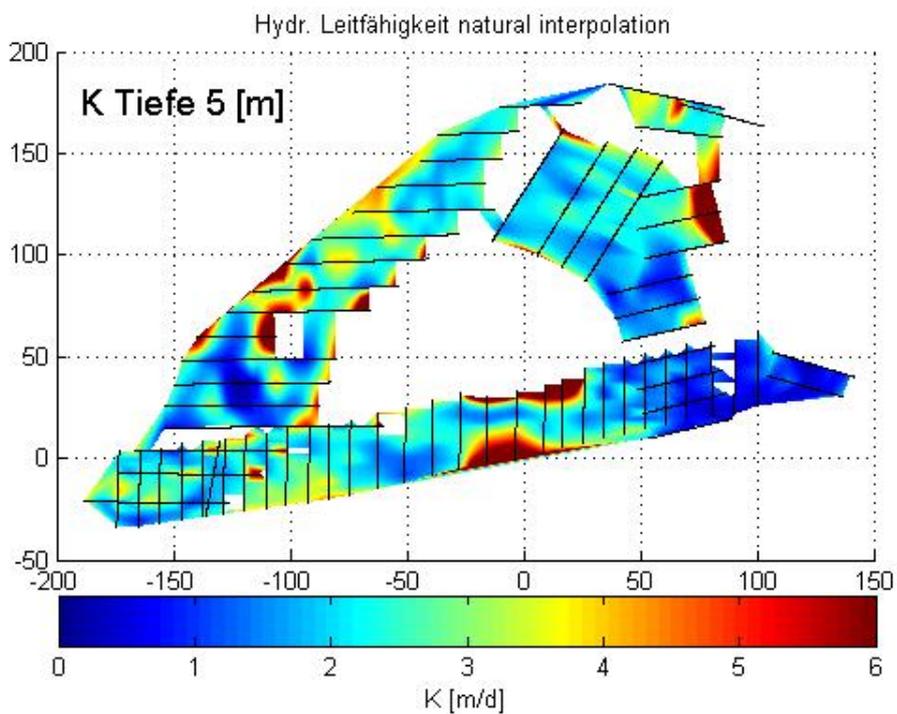
Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 2 m



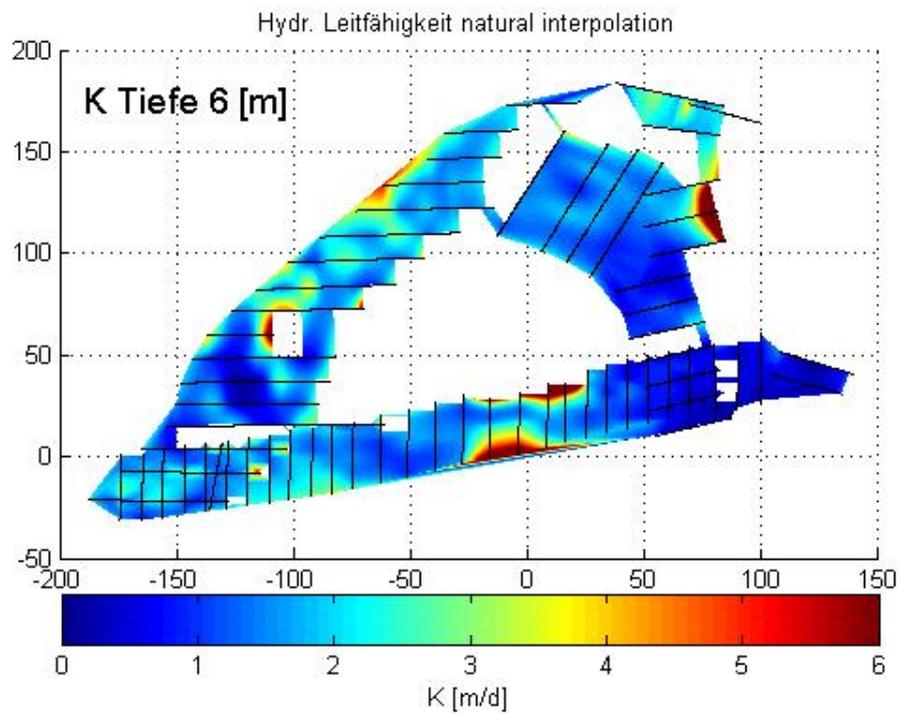
Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 3 m



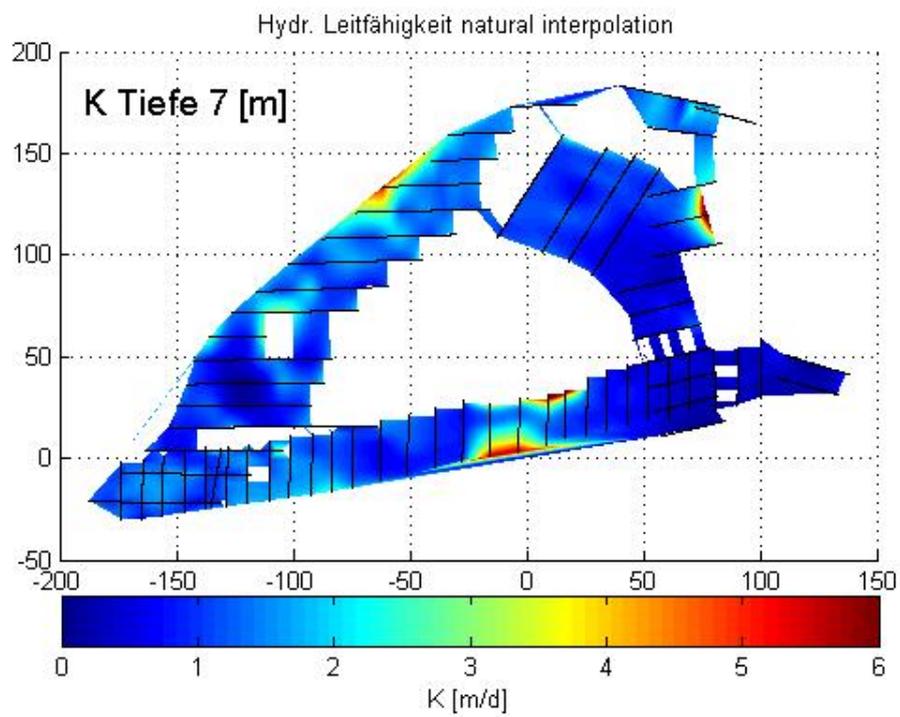
Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 4 m



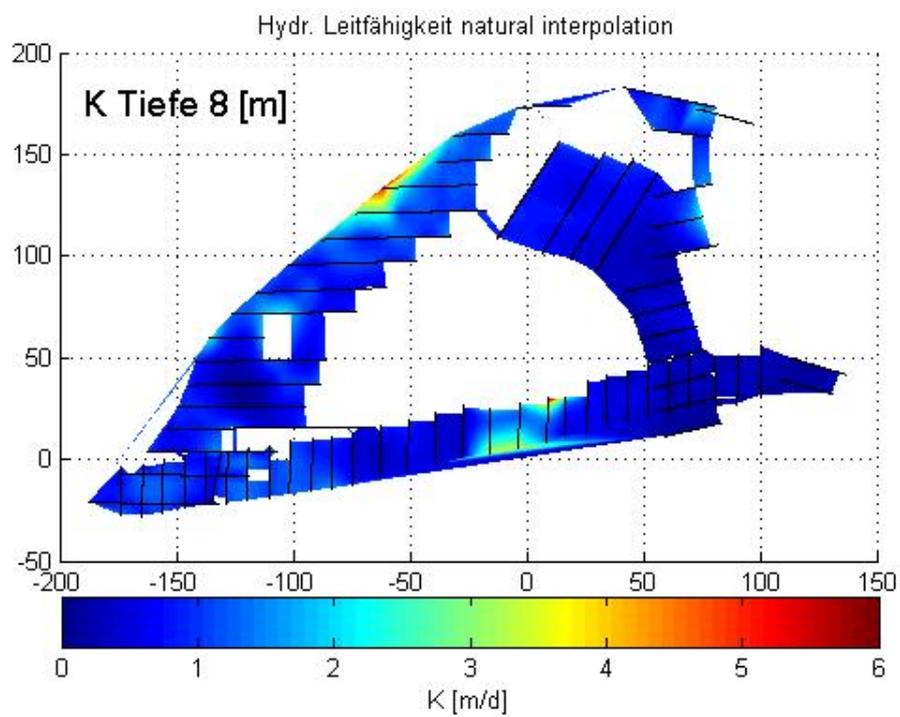
Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 5 m



Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 6 m



Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 7 m



Hydraulische Leitfähigkeitskarte in einer Tiefe von 8 m